

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DEL
VIENTO ALREDEDOR DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE
GRANDES DIMENSIONES”**

**Proyector Integrador Profesional
presentado por**

**FERNANDO MONTESINO
CYNTHIA WAIMAN**

ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
para acceder al título de

INGENIERO CIVIL

Dirección de tesis:

Directora
Dra. Ing. Jaca Rossana Claudia

Codirectora
Dra. Ing. Pernich Adriana

NEUQUÉN, AÑO 2017

RESUMEN

El propósito de este trabajo es obtener la distribución de presiones sobre la superficie de tanques de almacenamiento de fluidos mediante técnicas computacionales (CFD) utilizando un software multipropósito para tal fin. Se realizó un estudio fluidodinámico de variadas configuraciones de los tanques para estudiar la influencia de la acción del viento sobre los mismos, los resultados obtenidos luego se compararon con ensayos experimentales realizados en túnel de viento. En primer lugar se expuso la problemática abordada y se mencionaron algunos casos ocurridos en la región patagónica de fallas de tanques en etapa constructiva por cargas de viento inferiores a las de diseño de la estructura. Luego se describieron los ensayos realizados en túnel de viento que sirvieron para comparar los resultados y validar los modelos utilizados en el estudio. Antes de comenzar con la modelación en el software, se definieron los conceptos de flujo en capa límite y turbulencia, se presentaron las ecuaciones básicas que gobiernan los principios de mecánica de fluidos, los métodos numéricos y modelos de turbulencia que se utilizan para resolver problemas por medio de dinámica de fluidos computacional. La modelación se realizó mediante el uso del programa Ansys R18.0 Academic que implementa el método de volúmenes finitos. En una primera etapa se modelaron tanques con techo cónico, aislados y en grupo, y en una segunda etapa se modelaron tanques en etapa constructiva, es decir sin techo. Los resultados obtenidos mostraron buena correlación con los valores experimentales y que la distribución de presiones en las paredes se ve fuertemente influenciada por la existencia de otros obstáculos y por la presencia o ausencia del techo del tanque.

Palabras clave: CFD, Tanques, Viento, Dinámica de Fluidos, Turbulencia.

ABSTRACT

The aim of this work project is to acquire the pressure distribution on fluids storage tanks surfaces through computational fluid dynamics (CFD) techniques by using a multipurpose software. A fluid-dynamic study was performed, considering different configurations of the tanks to study the influence of the wind action onto them, the results were compared to experimental tests performed in wind tunnel. The approached problematic is exposed and failure cases in the patagonic region of tanks in construction under wind action lower than the design load are mentioned. A description of the methodology applied to the wind tunnel essays is given. The latter were used to compare and validate the models used in the study. The assumptions regarding the limit boundary layers and turbulence were defined before the computer software simulation. In the same manner the equations that explain the fluid mechanics basics are presented as well as the numerical methods and turbulence models used to solve problems of computational fluid dynamics. The modelling and analysis was performed with the commercial software Ansys, which implements the finite volume method. In the first stage, isolated and grouped tanks with conic roof were analyzed while in a second stage tanks in construction without roof were modelled. The results show a faire match when compared to the experimental values. It was observed that pressure distribution on the walls is strongly influenced by the existence of other obstacles and the presence or absence of the tank roof.

Keywords: CFD, Tanks, Wind, Fluid Dynamic, Turbulence.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional.

A Rossana y Adriana por acompañarnos en este proyecto.

A la facultad de ingeniería por darnos la oportunidad.

A nuestros guías por todo lo aprendido.

A nosotros por el tiempo compartido.

Muchas Gracias.

Cynthia y Fernando.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1	1
INTRODUCCION	1
1.1. FUNDAMENTOS	1
1.2. OBJETIVO GENERAL	2
1.3. OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.4. METODOLOGIA	3
1.5. AMBITO DE DESARROLLO	4
1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	4
CAPITULO 2	6
TANQUES DE ALMACENAMIENTO	6
2.1. INTRODUCCIÓN	6
2.2. GENERALIDADES	7
2.3. TIPOS DE TANQUES ATMOSFÉRICOS	9
2.4. PROCESO CONSTRUCTIVO	11
2.5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	13
2.6. EVALUACIÓN DE LA ACCIÓN DEL VIENTO	14
2.6.1. Variación Circunferencial	15
2.6.2. Variación de la Presión del Viento en el Techo de Tanques	16
2.7. PANDEO DE CÁSCARAS	17
2.8. PROBLEMÁTICA REGIONAL	19
2.9. DISTANCIAMIENTO ENTRE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO	24
2.10. ANALISIS DE VIENTOS REGIONALES	25
CAPITULO 3	27
ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO	27
3.1. INTRODUCCIÓN	27
3.2. GENERALIDADES	28
3.3. CLASIFICACIONES BÁSICAS DE UN TÚNEL DE VIENTO	30
3.4. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO	31
3.5. ESTUDIOS REALIZADOS	34
3.5.1. Descripción Túnel de Viento UNCO	35
3.5.2. Descripción del Túnel De Viento UNLP	37
3.5.3. Descripción del Túnel de Viento UNNE	38
3.5.4. Ensayos Realizados	39

CAPITULO 4	42
CARACTERIZACION DEL VIENTO	42
4.1. INTRODUCCION	42
4.2. FLUJO	42
4.3. NUMERO DE REYNOLDS RE	44
4.4. FLUJO EN CAPA LIMITE	45
4.5. TURBULENCIA	52
4.6. LEY DE CAPA LOGARITMICA	55
4.7. CAPA LIMITE TERRESTRE	58
CAPITULO 5	61
MODELACION COMPUTACIONAL DEL FLUJO	61
5.1. INTRODUCCION	61
5.2. ECUACIONES	62
5.3. CONCEPTOS DE ANALISIS NUMERICO	62
5.4. MODELOS DE TURBULENCIA	66
5.5. CASOS DE VALIDACION	70
5.5.1. Condiciones de Contorno	70
5.5.2. Mallado	72
5.5.3. Resultados Cilindro	73
CAPITULO 6	74
CASOS DE ESTUDIO	74
6.1. GENERALIDADES	74
6.2. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE TANQUES CON TECHO	74
6.2.1. Dimensiones de los Modelos	74
6.2.2. Modelación Sobre Tanque Aislado	75
6.2.2.1. Perfiles de Velocidad	81
6.2.2.2. Coeficientes de Presión Para Tanque Aislado	83
6.2.3. Modelación de Tanque Apantallado	84
6.2.3.1. Coeficientes de Presión Para Tanque Apantallado	86
6.2.4. Comparación de Resultados con Otros Autores	90
6.3. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE TANQUES SIN TECHO	95
6.3.1. Modelación Sobre Tanque sin Techo – Ensayos UNLP	95
6.3.1.1. Dimensiones del Modelo	95
6.3.1.2. Perfiles de Velocidad	98
6.3.1.3. Coeficientes de Presión	100
6.3.1.4. Comparación con Ensayos	103
6.3.2. Modelación Sobre Tanque sin Techo – Ensayos UNNE	104
6.3.2.1. Dimensiones del Modelo	105
6.3.2.2. Coeficientes de Presión	108

CAPITULO 7	115
CONCLUSIONES	115
7.1. INTRODUCCION	115
7.2. RESUMEN DE CONTENIDOS	116
7.3. CONCLUSIONES	117
7.3.1. Conclusiones Generales	117
7.3.1.1. Conclusión Principal	117
7.3.1.2. Conclusiones Particulares	117
7.3.2. Conclusiones Particulares Para Tanques con Techo Cónico	118
7.3.3. Conclusiones Particulares Para Tanques Sin Techo	119
7.4. RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFIA	121

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. FUNDAMENTOS

Las estructuras laminares forman parte de muchas aplicaciones industriales en aviación, tuberías, recipientes a presión, recipientes para almacenamiento de sólidos y/o fluidos, naves industriales y cerramientos de establecimientos de grandes dimensiones. Muchas de estas cáscaras están sometidas a sollicitaciones que comprometen su respuesta estructural frente a acciones extremas como pueden ser vientos intensos, sismo, presión interna o externa excesiva, descenso de apoyos, explosiones y/o acción del fuego.

El gran desarrollo y disponibilidad de software y hardware ha hecho posible la simulación más realista de materiales y comportamientos no lineales geométricos de estructuras y fluidos, permitiendo el abordaje de problemas multifísica a través de desarrollos que vinculan campos de mecánica estructural, transferencia de calor y de dinámica de fluidos, de manera cada vez más integrada.

Una manera de simular situaciones complejas, en las que los estudios experimentales resultan limitados, es mediante técnicas computacionales a través de simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics). Ambas técnicas, computacionales y experimentales, son complementarias de modo que es posible ajustar el modelo numérico con los datos experimentales y posteriormente simular numéricamente diferentes situaciones cubriendo posibilidades que para la metodología experimental serían de costosa realización.

Una de las tipologías de interés del trabajo son los tanques de almacenamiento metálicos usados en la industria petroquímica. Se trata de tanques de grandes dimensiones con relaciones de esbeltez radio-espesor del orden de 2000, en los que el problema de pandeo bajo viento trae complicaciones en la funcionalidad de los mismos o colapso bajo vientos intensos.

El presente trabajo aborda el estudio del flujo de viento entre tanques dispuestos en baterías y tanques en etapa constructiva. En estos casos se produce aumento o disminución de las presiones de viento, respecto a las correspondientes a un tanque aislado y con techo, que es importante tener en cuenta en el cálculo del tanque ya que no están considerados específicamente en la reglamentación (CIRSOC 102). La posibilidad de obtener coeficientes de presión mediante CFD permite una representación más exacta del flujo y su posible influencia en el colapso. Este tipo de situaciones fueron estudiadas en trabajos experimentales en túnel de viento (Cicerone 2011, Burgos 2012, Hernández 2017) y los resultados obtenidos permiten ajustar los modelos numéricos.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este estudio es caracterizar el patrón de flujo del viento y evaluar numéricamente la distribución de presiones resultantes en la envolvente cilíndrica de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones.

1.3. OBJETIVOS PARTICULARES

- Efectuar la simulación numérica del flujo del viento sobre tanques de almacenamiento mediante el uso de software utilizando técnicas de fluodinámica computacional (CFD).
- Ajustar los modelos de turbulencia con los parámetros obtenidos de los ensayos experimentales realizados en túnel aerodinámico y de otros estudios complementarios.
- Obtener los perfiles de velocidad del viento mediante CFD y comparar con los resultados obtenidos empíricamente y con modelos teóricos.
- Determinar la distribución de presiones sobre un grupo de tanques, tanto en aquellos que se encuentran directamente expuestos a la acción de viento así como también sobre los que sufren el efecto de apantallamiento.
- Obtener la envolvente de presiones sobre tanques de almacenamiento en etapa constructiva, es decir sin techo.

- Evaluar la influencia de los flujos, producidos en el interior de los recipientes abiertos, sobre las presiones generadas en las paredes.
- Analizar y comparar las características del flujo, velocidades y presiones obtenidas para diferentes configuraciones de los tanques en estudio.

1.4. METODOLOGÍA

El enfoque de este trabajo es numérico, orientado a determinar la distribución de presiones sobre los tanques de almacenamiento modelados y validar los resultados obtenidos de ensayos experimentales, a través del uso de un software que permitió modelar el fluido mediante técnicas de volúmenes finitos.

Para iniciar el estudio fue necesaria la búsqueda de bibliografía e información relacionada con los temas involucrados, esto incluye publicaciones generales sobre mecánica de fluidos, estudios específicos de la temática abordada y reglamentaciones vigentes.

Para la modelación en software se adoptaron los modelos físicos de trabajos previos experimentales realizados sobre tanques cerrados y tanques sin techo. En ambos casos se reprodujeron las condiciones de flujo correspondientes para poder generar en primer lugar los perfiles de velocidades y de esta forma calibrar los modelos de turbulencia $k-\varepsilon$ (épsilon) utilizados para luego obtener los patrones de distribución de presiones. Los perfiles de velocidades fueron comparados con modelos teóricos y con resultados empíricos.

Una vez calibrados los modelos de turbulencia se procedió a evaluar diferentes situaciones de configuración de los tanques, esto implicó modelar tanques con y sin cubierta, y tanques aislados y con apantallamiento de otro tanque en diferentes orientaciones y velocidades del viento.

Finalmente se compararon las distribuciones de presión obtenidas entre los diferentes arreglos para poder concluir en que situaciones se producen las condiciones más desfavorables.

El objeto del uso del software es obtener la distribución espacial de coeficientes de presión que posteriormente puede ser usada en análisis de inestabilidad del equilibrio. En el caso

de contenedores sin cubierta es importante evaluar la contribución al colapso de los posibles efectos del vórtice interior.

1.5. ÁMBITO DE DESARROLLO

Las actividades se desarrollaron en el ámbito del Grupo de Métodos Numéricos y Experimental que realiza actividades de investigación dentro del Programa de Investigación de la Facultad de Ingeniería “Análisis Numérico y Experimental de Sistemas Estructurales” (04/I194), con interacción con el Laboratorio de Ingeniería del Viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue a cargo del Dr. Jorge Lassig.

Además de los objetivos nombrados en relación con el estudio de la dinámica de fluidos y los parámetros que intervienen, cabe destacar que también una de las etapas esenciales del presente trabajo consistió en el aprendizaje y optimización del uso del software, durante la elaboración de los modelos geométricos, creación de las mallas para la resolución del problema por cálculo de elementos finitos, los procesos de introducción de los datos y condiciones de borde y finalmente el postproceso de los resultados obtenidos.

1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis se encuentra organizada en ocho capítulos y un anexo. El *Capítulo 2* presenta una descripción de las tipologías de tanques en estudio y particularidades constructivas, características de la variación de las presiones en la estructura exterior de los mismos y algunas nociones básicas de pandeo. También se muestran algunas baterías de tanques que se pueden encontrar en las cuencas petrolíferas de la región y características de vientos típicos de la zona.

En el *Capítulo 3* se describen los ensayos realizados en los túneles de viento de la Universidad Nacional del Comahue y de La Plata por Esteban Cicerone (2011), Carlos Burgos (2012) y Facundo Hernández (2017) y las características de los túneles.

En el *Capítulo 4* se presentan los principales parámetros que describen el flujo del viento, número de Reynolds, coeficiente de presión y algunos conceptos sobre capa límite atmosférica y turbulencia.

En el *Capítulo 5* se dan conceptos sobre análisis numérico, ecuaciones de gobierno y modelos de turbulencia. Además se presenta la validación de un caso práctico conocido mediante la aplicación del software utilizado en esta tesis.

En el *Capítulo 6* se encuentran los resultados de la modelación de tanques en etapa constructiva y tanques agrupados. Esto incluye la obtención de los perfiles de velocidad de capa límite para cada caso, los mapas de presiones y comparación con resultados empíricos y teóricos.

Finalmente en el *Capítulo 7* se presentan las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones.

CAPITULO 2

TANQUES DE ALMACENAMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

Los tanques cilíndricos verticales de acero soldados son ampliamente usados para almacenamiento en plantas industriales y agrícolas. Estos consisten generalmente de un piso delgado, una pared cilíndrica de espesor constante o variable y un techo que puede ser cerrado o abierto (con o sin techo flotante). Con el desarrollo económico y de la industria petrolera, cada vez más tanques de almacenamiento de fluidos y derivados del petróleo fueron puestos en servicio durante los últimos años, muchos de ellos especialmente de gran tamaño. Algunos tanques llegan a alcanzar diámetros superiores a 100 m, con volúmenes mayores a $100 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Como sucede en estructuras de pared delgada, los tanques son muy susceptibles al pandeo bajo cargas de viento especialmente cuando se encuentran vacíos o parcialmente llenos. En las últimas décadas las fallas por pandeo en tanques y silos cilíndricos de acero durante tormentas de viento han ocurrido en muchos países y regiones del planeta. Incluso, a veces, el pandeo de la estructura se produjo durante su construcción bajo velocidades moderadas de viento.

Debido a las importantes pérdidas económicas y a los problemas ambientales que resultan de la destrucción de los tanques, diversos investigadores han venido realizando extensos estudios sobre el pandeo de tanques bajo cargas de viento.

En este capítulo se presenta una descripción de los diferentes tipos de tanques que pueden encontrarse en servicio; la forma más sencilla de clasificarlos y de identificarlos es por la forma de su techo. También se sintetizan algunas recomendaciones dadas por la norma API 650 sobre el proceso constructivo y consideraciones de diseño. Luego se describen las distribuciones de presión producidas por viento encontradas por diferentes investigadores, tanto en el techo de los tanques como en el depósito cilíndrico de los mismos. Por otro lado, el fenómeno de pandeo es una de las principales causas de colapso de este tipo de estructuras, por lo tanto se exponen las

principales características que definen este efecto y cómo influye en las estructuras en estudio. Se presenta una descripción de las cuencas petrolíferas de Argentina y se muestran algunas de las plantas donde se reciben, almacenan y procesan los hidrocarburos extraídos. Finalmente se muestran algunos resultados de estudios de vientos regionales realizados por Lassig et al. (1999) y Palese et al. (2000).

2.2. GENERALIDADES

Este trabajo se concentra en analizar las presiones generadas por el viento en tanques metálicos de almacenamiento aéreos construidos principalmente en acero. Estos tanques tienen grandes dimensiones y son usados para almacenamiento de fluidos principalmente en la industria petroquímica para petróleo, productos intermedios en la producción o finales como gasoil, nafta, etc. La necesidad de almacenamiento es de importancia en la industria de hidrocarburos ya que actúa como un pulmón entre producción y transporte absorbiendo las variaciones de consumo. También permite la sedimentación de agua y barros del crudo antes de despacharlo en oleoductos o a destilación y en las refinerías brinda flexibilidad operativa. Estos tanques generalmente se encuentran formando parte de una batería de tanques o en plantas industriales junto a otros de diferentes tamaños, como se muestra en la *Figura 2.1*.



Figura 2.1: Baterías de Tanques de Petróleo

Hay diferentes formas de clasificar tanques de almacenamiento. Una primera clasificación es en tanques aéreos o subterráneos, relativa a la ubicación del tanque arriba del suelo o enterrados. Por otro lado, también se pueden clasificar según la presión interior a la que están sometidos, así se clasifican en tanques atmosféricos, de baja presión y recipientes a presión. En este trabajo se consideran tanques aéreos atmosféricos. Este tipo de tanques que son más fácilmente construidos, permiten lograr capacidades mayores que los subterráneos y con menor costo. Al estar expuestos, la acción del viento es una carga que debe ser tenida en cuenta cuidadosamente en la etapa de diseño.

Estos tanques se diseñan según las normas API (American Petroleum Institute), en las mismas se establece que los materiales están regulados por las normas ASTM (American Society for Testing Materials) y además, deben adecuarse a las normas de seguridad dadas por NFPA (National Fire Protection Association). API 650 regula los requisitos mínimos para diseño, fabricación, instalación, materiales e inspección de tanques cilíndricos verticales sobre tierra para almacenar crudo y sus derivados. También se debe considerar la norma API 653 para inspección y reparación. Ambas normas se aplican a tanques atmosféricos de acero fabricados por soldadura. API 620 se refiere al diseño y construcción de grandes tanques de baja presión. Estas normas suelen ser complementadas por publicaciones o revistas, que aportan información de aspectos generales sobre las prácticas o tecnología asociadas.

Generalmente estos tanques están compuestos por una cascara cilíndrica destinada a la contención del fluido y un techo de diferente tipo como cerramiento superior. En particular, los fluidos que intervienen en la industria del petróleo son inflamables y producen gases que generan presión de vapor en el espacio por encima del líquido en recipientes cerrados, esta característica es importante al seleccionar el tipo de techo. Además, los productos del petróleo tienen alto riesgo de combustibilidad y explosión y requieren especiales demandas de ventilación y medidas adicionales de seguridad por derrame o percolación. A los criterios establecidos por los códigos de práctica se adiciona un análisis de riesgo, que examina estadísticamente la probabilidad de falla y sus consecuencias, que pueden ser modificadas por un diseño adecuado. También existen restricciones legislativas sobre manejo del suelo para evitar riesgo de potencial contaminación.

2.3. TIPOS DE TANQUES ATMOSFÉRICOS

La selección del tipo de tanques cilíndricos depende del volumen requerido, el espacio disponible, las inversiones exigidas, etc., que hace que en algunas situaciones un tipo determinado sea más indicado que otro. Un criterio sencillo de clasificación de tanques (Myers, 1997) es por observación visual, según la forma del techo, que se determina en parte por la presión de vapor. Una primera clasificación es respecto a si el techo es fijo o flotante, que a su vez puede ser flotante interior (IFR) o exterior (EFR). Los techos fijos pueden ser planos, con forma cónica o esférica, siendo estos últimos más adecuados cuando la presión interna aumenta. Los tanques de techo flotante son usados por la industria petrolífera para evitar la acumulación de gases en el interior del tanque.

Tanques de techo cónico: son los más usados para almacenar cantidades relativamente grandes de fluido. El fondo suele ser plano y la altura del cono es reducida. Por esa razón el techo está soportado por vigas rigidizadoras radiales y/o anulares, sustentadas por una columna central y columnas dispuestas en círculo. En los de menor tamaño no se requiere estructura de soporte del techo. Existe una gran cantidad de estos tanques porque son económicos para construir y hay gran disponibilidad de constructores. *Figura 2.2a.*

Tanques de techo paraguas: similares a los de techo cónico cuya base es un polígono regular de n lados, como se puede ver en la *Figura 2.2b.* Estos techos son autoportantes.

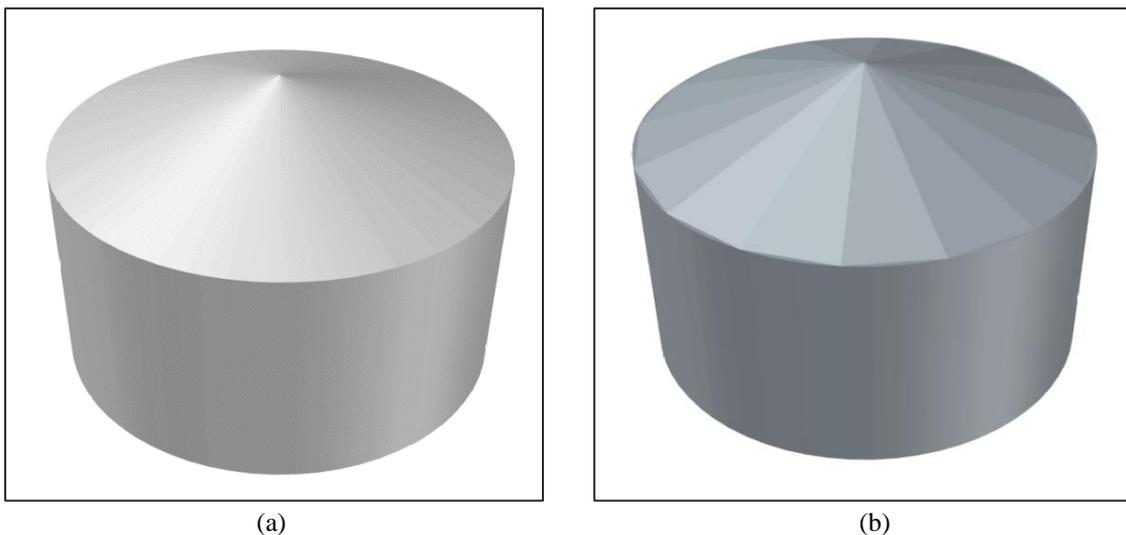


Figura 2.2: (a) Tanque de techo cónico. (b) Tanque de techo paraguas.

Tanques de techo esférico: estos tanques son parecidos a los anteriores pero se aproximan más a una superficie esférica. En la *Figura 2.3a* se puede ver un tanque de este tipo.

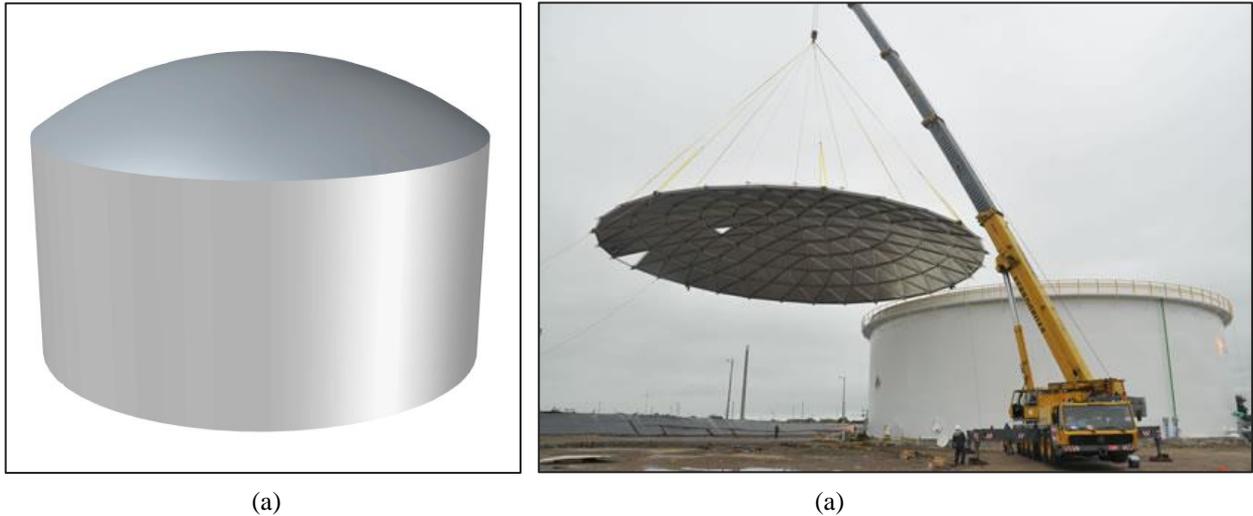


Figura 2.3: (a) Tanque de techo esférico. (b) Tanque de techo esférico geodésico en etapa de montaje.

Tanques de techo esférico geodésico de aluminio: tiene mayor resistencia a la corrosión y son una opción económica. Son estructuras libres que no requieren soportes internos, la *Figura 2.3b* muestra un tanque de este tipo.

Tanque de techo flotante: estos tanques tienen una cobertura que flota sobre la superficie del líquido, entre esta cubierta y la cáscara cilíndrica existe un espacio que se cierra herméticamente. El techo flotante puede ser interno (existe un techo fijo colocado en el tanque) o externo (se encuentra a cielo abierto). Los techos externos flotantes más usados para almacenamiento de crudo son los de pontón simple, que consisten en un anillo hueco perimetral formado por secciones estancas y una placa circular que completa el techo flotante. Hay otros techos externos flotantes contruidos con doble placa con compartimientos estancos que son más adecuados para diámetros grandes y resultan más fuertes y durables. En ambos casos se requiere un sistema de drenaje para eliminar el agua de lluvia y suelen tener una viga de borde para rigidizar el extremo superior, para reducir los problemas de pandeo por viento cuyas deformaciones pueden afectar el normal funcionamiento de los techos flotantes. Los techos flotantes internos se construyen en aluminio y se coloca un domo geodésico como techo fijo del tanque. Este cerramiento exterior es autoportante y también se construye en aluminio. La *Figura 2.4* muestra tanques de techo flotante externo e interno respectivamente.

El fondo de los tanques puede ser plano, con forma de cono hacia arriba o hacia abajo, o pendiente simple. El fondo suele tener algo de forma y pendiente debido a los sedimentos, agua y fases más pesadas que se sitúan en el fondo. La corrosión es usualmente más importante en el fondo y puede producir pérdidas que necesitan ser detectadas.

La fundación de tanques cilíndricos varía según algunas aplicaciones específicas siendo algunas de las más usadas: suelo compactado, anillo de piedras, anillo de hormigón o losa. En el caso de suelo compactado se retira una capa de material y reemplaza por arena o relleno granular. Este tipo de fundación suele llamarse colchón de arena y es el de menor costo. La fundación de anillo de piedras permite incorporar un sistema de detección de pérdidas y tiene menor costo que un anillo de hormigón. Provee un apoyo uniforme para disipar las cargas que transmite la cáscara, pero puede producirse una falla catastrófica si hay pérdidas que lavan el material de apoyo. El anillo de hormigón es de los más usados como fundación, ya que reduce los problemas de asentamientos diferenciales y provee una base para comenzar la construcción del tanque. La fundación por losa es de mayor costo, razón por la cual suele usarse para tanques de menor tamaño. La losa provee una superficie de trabajo plana y nivelada que facilita la construcción.



(a)



(b)

Figura 2.4: (a) Tanques de techo flotante externo. (b) Tanque de techo flotante interno.

2.4. PROCESO CONSTRUCTIVO.

La norma API 650 establece que el proceso constructivo es propuesto por el constructor del tanque para que sea aprobado por el propietario, si ya no ha sido especificado por escrito previamente. La soldadura debe asegurar la completa fusión del material. Las soldaduras del fondo del tanque son a tope si el espesor es menor de 10 mm y son uniones soldadas solapadas para espesores de hasta 16 mm. Después de presentadas las placas de fondo se hacen puntos de

soldadura para mantenerlas en su lugar y posteriormente se unen por soldadura en una secuencia que el constructor establece que genera la menor distorsión y que permite que la superficie sea lo más plana posible. Esta etapa se puede observar en la *Figura 2.5a*.

Durante la construcción se colocan riendas para sostener la cáscara a medida que aumenta la altura, que deben ser retiradas posteriormente, y las placas de la cáscara se mantienen en posición con la ayuda de sujetadores. En la ejecución de las juntas horizontales, la norma establece una tolerancia para asegurar el alineamiento vertical de la cáscara. Estos aspectos son mostrados en la *Figura 2.5b* y en la *Figura 2.5c* se presenta el armado de las vigas rigidizadoras de techo.

La norma API 650 (1998), en su apartado 5.2.2.3, establece que la cáscara se puede unir por puntos de soldadura al fondo antes de comenzar la soldadura continua entre el borde inferior de la cáscara cilíndrica y el borde externo de las placas de fondo. Esta soldadura es la más crítica ya que soporta las mayores tensiones locales del tanque. Por esta razón para no crear tensiones adicionales durante la construcción de la envolvente cilíndrica, en algunos casos se mantienen los puntos de soldadura durante su construcción mientras se continúa elevando el cilindro y al final se termina el cordón de soldadura continuo.



(a)



Figura 2.5: (a) Fondo del tanque. (b) Envoltente cilíndrica. (c) Estructura del techo.

2.5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La norma API 650 (1998) considera cargas de viento para analizar la estabilidad al volcamiento global, no para el diseño de la envoltente. Para tanques sin anclaje se debe cumplir:

$$M \leq \frac{2}{3} \left(\frac{WD}{2} \right)$$

dónde M es el momento producido por la presión del viento, W es el peso de la cáscara más el peso muerto soportado por la cáscara menos las fuerzas de levantamiento producidas por condiciones de operación como presión interna sobre el techo, y D es el diámetro. Si se requieren anclajes la separación máxima es de 3 m.

El diseño del techo se realiza en base a la peor combinación de cargas entre peso propio, peso propio más carga viva o nieve, peso propio más viento o sismo y peso propio más carga viva o nieve más viento o sismo. API 650 indica una serie de recomendaciones para los diferentes tipos de techos para calcular el espesor requerido. Para la cáscara cilíndrica del tanque, la norma indica espesores mínimos en función del diámetro del cilindro y establece una metodología para calcular espesores considerando que para este tipo de tanques las tensiones circunferenciales son las más importantes y limitan la selección de los espesores de la cáscara. Los espesores de la cáscara cilíndrica bajo presión hidrostática se obtienen a partir de las tensiones circunferenciales admisibles, considerando una corrección por la eficiencia de la junta y por la tolerancia a la corrosión. Una de las metodologías propuestas por la norma para evaluar

los espesores es el método de un pie. Por la presión hidrostática, las tensiones circunferenciales y deformaciones radiales aumentan hacia el fondo del tanque, pero las restricciones del fondo las anulan. El método de un pie propone evaluar el espesor de la virola del fondo con las tensiones calculadas a una distancia de un pie del fondo para considerar esa reducción de las tensiones por la presencia del fondo.

2.6. EVALUACIÓN DE LA ACCIÓN DEL VIENTO

La bibliografía referida a pandeo bajo la acción del viento de cáscaras cilíndricas se desarrolló en los últimos 40 años con contribuciones basadas en evidencia experimental, analítica y computacional. Un problema general es la variación que se presenta en la distribución de la presión del viento tanto en la pared externa de la cáscara cilíndrica como en el techo, que depende fuertemente de la geometría del tanque.

Estudios detallados relacionados con carga de viento sobre cilindros incluyen ensayos en túnel de viento como los realizados por Maher (1966) sobre tanques cilíndricos con techo cónico y esférico. Purdy et al. (1967) estudió la distribución de presión del viento sobre tanques de techo flotante, variando la relación altura-radio desde cilindros cortos (tanques) hasta largos (silos) para cuantificar el efecto de las dimensiones sobre la distribución de presión. Estudios más recientes fueron realizados por Esslinger et al. (1971), Gorenc (1986), Greiner (1982) y Pircher et al. (1998). MacDonald et al. (1998) presentó distribuciones de presiones en tanques con techo cónico.

Portela y Godoy (2005, 2007) publicaron resultados de ensayos en túnel de viento para tanques con techo cónico y esférico, presentando distribución de presiones en la cáscara cilíndrica y en el techo, y haciendo verificaciones de cargas de pandeo mediante análisis de bifurcación y análisis no lineal geométrico. Una manera de modelar situaciones más complejas, en las que los estudios experimentales resultan limitados por las dimensiones del túnel o sus características, es mediante técnicas computacionales a través de simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics). En esa línea de trabajo Falcinelli et al. (2002, 2003) presentó distribuciones de presión de viento sobre tanques cilíndricos con techo cónico aislados analizando también la influencia de la topografía para considerar la ubicación de la estructura con respecto a accidentes topográficos, como sierras o lomadas.

2.6.1 Variación Circunferencial

La variación de la presión del viento depende de una serie de parámetros, que afectan a la relación presión-succión a lo largo de la circunferencia: número de Reynolds del flujo de viento, rugosidad de la superficie de la pared, relación de aspecto del cilindro (altura-diámetro), posición del cilindro respecto al terreno, condiciones del terreno circundante, forma del techo y tamaño de las aberturas del techo. Aunque todos estos aspectos influyen en las expresiones encontradas por los diferentes investigadores, se han encontrado patrones similares para la cascara cilíndrica independientemente de las dimensiones de la estructura. El parámetro adimensional utilizado para cuantificar la distribución de la acción del viento, se denomina Coeficiente de Presión C_p . Distintos investigadores han encontrado diferentes valores para dichos coeficientes a partir de ensayos experimentales, por lo que en la *Figura 2.6* se muestran algunas de las distribuciones presentes en la bibliografía.

En general las presiones toman, en la generatriz a barlovento, un coeficiente 1 con una presión máxima positiva en la dirección del viento y a los 30° y 45° cambia a valores negativos (succión) cuyo valor máximo ocurre a 80° - 90° desde la dirección del viento. Los coeficientes de presión positivos indican presiones, y los negativos indican succiones.

Es una práctica común suponer una distribución constante de la presión del viento en la altura de los tanques para simplificar los cálculos. Purdy, Maher y Frederick (1967) estudiaron distribuciones de presión de viento en cilindros con techo plano variando la relación de aspecto altura-diámetro (h/d) para cuantificar los efectos dimensionales sobre la distribución de presión. Si bien las distribuciones encontradas muestran cierta variación en altura, es posible suponer distribuciones constantes como una buena aproximación.

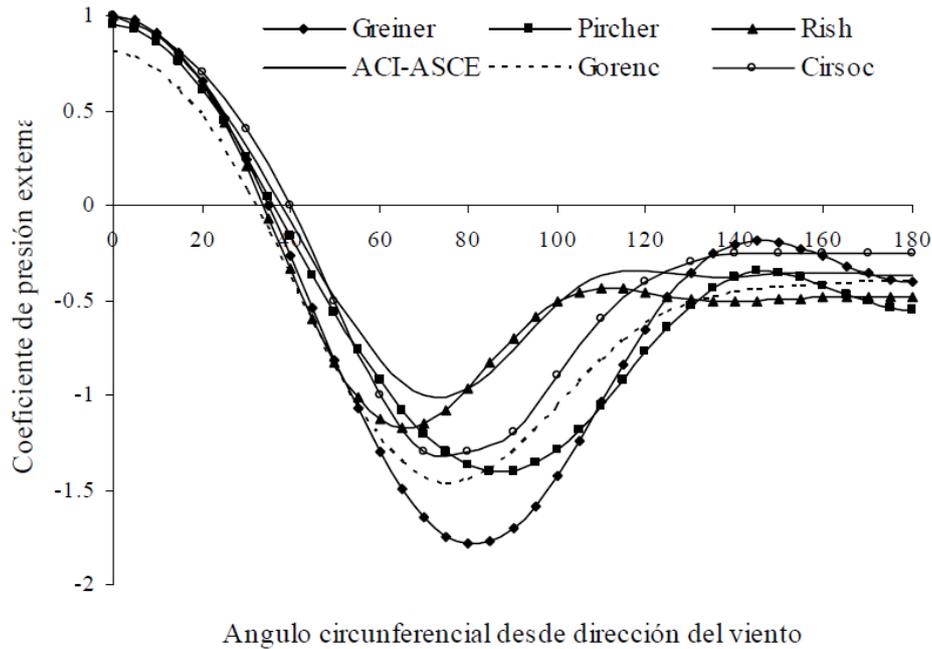


Figura 2.6: Distribución circunferencial de coeficientes de presión.

2.6.2 Variación de la Presión del Viento en el Techo de Tanques

Distribuciones de coeficientes de presión para techo cónico y esférico fueron presentadas por Maher (1966), para diferentes relaciones de aspecto (h/D). Purdy et al. (1967) también mostraron distribuciones de presión incluyendo expresiones numéricas para silos y tanques que dependen de la rugosidad del techo. Mostraron que para relaciones de aspecto mayores a 1.5 los resultados convergen mientras que para valores menores existen variaciones. Posteriormente Esslinger et al. (1971) presentaron valores de coeficientes para silos pero no para tanques. Godoy y Méndez (2001) usaron diferentes distribuciones de presión en el techo cónico para analizar cargas de pandeo, comparando los resultados con evidencias de tanques reales que fallaron por efecto de huracanes. Mostraron que los resultados son altamente sensibles a la elección de presiones y que las distribuciones presentadas por Esslinger dieron una adecuada representación. Los coeficientes usados en ese caso correspondían a presiones negativas en la zona a barlovento y positivas a sotavento con una región de presiones nulas en el centro del techo.

Sabransky y Melbourne (1987) encontraron distribuciones con todos coeficientes negativos con valores máximos a barlovento y en el centro, para relaciones de aspecto de 0.66 y 1.16. Resultados similares fueron encontrados por MacDonald (1998) para una relación de aspecto 0.5. Portela et al. (2002, 2005) realizó pruebas experimentales de tanques aislados con techo cónico y esférico. Mostraron que la geometría del techo de un tanque corto influye en el

patrón de distribución de presiones, especialmente en el techo, y que la altura de la parte central del techo es importante en cuanto a la magnitud de succiones que se producen en el mismo. Asimismo mostraron la influencia de la transición de la cáscara cilíndrica con el techo cuando hay un cambio de la forma hemisférica a una pendiente constante. La *Figura 2.7* presenta los resultados de coeficientes de presión obtenidos por Portela et al. (2005) en el techo cónico de un tanque aislado con relación $h/D=0.43$ y un ángulo de inclinación de 10.7° (3/16), una distribución similar fue hallada por MacDonald (1998).

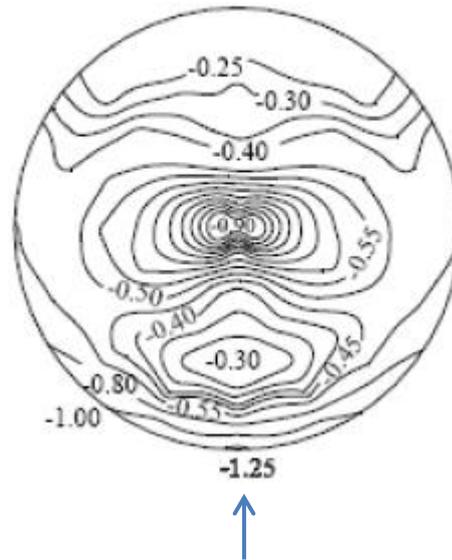


Figura 2.7: Distribución de coeficientes de presión en techo cónico ($h/D=0.43$). Portela y Godoy (2005).

2.7 PANDEO DE CÁSCARAS

Las cáscaras son estructuras espaciales tridimensionales en las que una de sus dimensiones, el espesor t , es significativamente pequeño con respecto a las otras dimensiones. Las cáscaras delgadas se caracterizan por su comportamiento tridimensional frente a la carga, determinado por la geometría, por la manera en que están apoyadas y por la naturaleza de la carga aplicada.

Cada estructura es diseñada con una forma específica y se espera que conserve su forma durante su vida de servicio. Por ejemplo, un tanque que es diseñado con un cilindro circular y un techo cónico se espera que conserve esta forma bajo las cargas consideradas en el diseño. El pandeo es un proceso por el cual una estructura no puede soportar cargas con su forma original, en consecuencia cambia esta forma para encontrar una nueva configuración de equilibrio. Es un proceso no deseado y ocurre para un valor bien definido de la carga. Las consecuencias del

pandeo son básicamente geométricas; hay desplazamientos grandes en la estructura, al punto que cambia la forma. También puede haber consecuencias para el material, en el sentido de que las deflexiones en el tanque pueden inducir plasticidad en las paredes de la estructura. La *Figura 2.8* muestra estructuras de cáscaras (tanques) que han pandeado por acción del viento y con distinto nivel de daño estructural. Todas las imágenes muestran que el daño por pandeo se produce en la parte superior del cilindro.

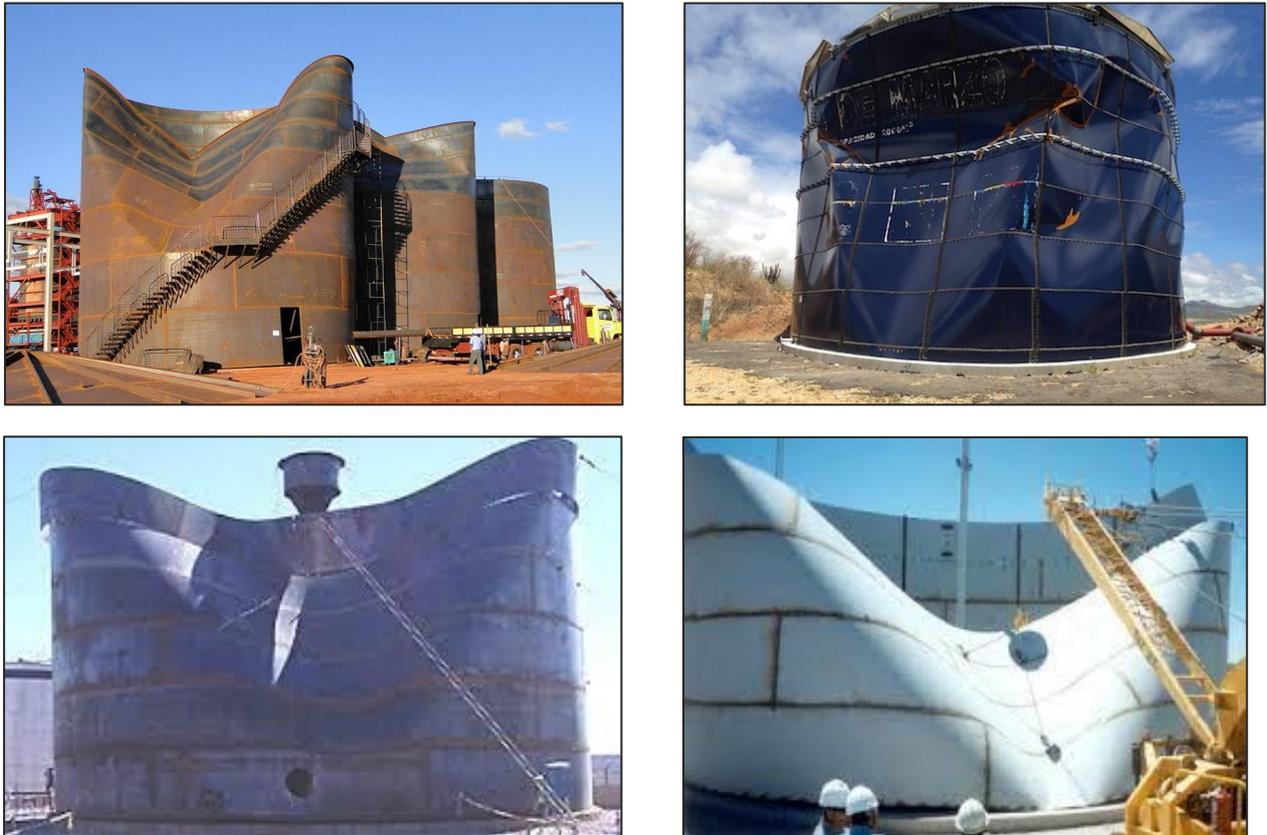


Figura 2.8: Tanques en etapa constructiva con daños estructurales por efecto de pandeo causados por presiones de viento.

En la mayoría de las cáscaras de pared delgada el pandeo es un proceso que se inicia en los estados críticos con propiedades elásticas del material, es decir que la inestabilidad se produce antes de la plasticidad. Si la estructura alcanza deformaciones plásticas, éstas se originan en estados poscríticos avanzados.

El daño debido a presión de viento sobre tanques de almacenamiento ha sido observado y estudiado por diferentes autores (Flores y Godoy, 1998, Godoy y Méndez, 2001). Estos daños son variables dependiendo de la geometría del techo, la topografía y de la localización de un

tanque rodeado por un grupo de tanques. Algunos aspectos a tener en cuenta en el comportamiento de tanques bajo acción de viento son:

- (a) El tipo de inestabilidad depende de la geometría del tanque, principalmente de la relación radio-altura.
- (b) El comportamiento sufre grandes variaciones por la presencia de anillos rigidizadores o techo en la parte superior.
- (c) El líquido almacenado en el interior del tanque produce un efecto estabilizante.

Muchos de los tanques con evidencia de pandeo son tanques de grandes dimensiones con techo cónico en los que el daño aparece en la parte superior de la cáscara cilíndrica, próxima al techo, donde la cáscara tiene menor espesor por estar diseñada para resistir la presión hidrostática producida por el fluido interior.

Otros casos estudiados son tanques que fallaron en la etapa de construcción. Estos tanques estaban diseñados con techo cónico pero en el momento del colapso solamente estaba la cáscara cilíndrica resistiendo la acción del viento. Algunos de estos casos se produjeron en el norte de la Patagonia argentina. El modo de falla corresponde a los registrados para cilindros sin techo pero el colapso se produjo a velocidades bajas con respecto a las de diseño correspondiente a la zona donde estaban emplazados.

Otro tipo de falla se produce en algunas ocasiones bajo vacío interior, generado muchas veces por problemas operacionales.

En las zonas tropicales del continente americano también se han registrado múltiples casos de fallas de tanques de almacenamiento producidos por el paso de huracanes, por ejemplo Marilyn en 1995, Georges en Puerto Rico en 1998 y Katrina y Rita en 2005. Diversos investigadores estudiaron estos sucesos, Méndez y Godoy (2001); Godoy (2006, 2007); Flores y Godoy (1998).

2.8 PROBLEMÁTICA REGIONAL

En Argentina, las cuencas petrolíferas con mayores reservas comprobadas de petróleo son la cuenca Neuquina y la cuenca del Golfo San Jorge, ambas ubicadas en la Patagonia. La Cuenca Neuquina conforma una extensa región petrolífera que comprende Neuquén, sur de Mendoza y

oeste de la Pampa y Río Negro. La Cuenca del Golfo San Jorge se ubica en la Patagonia central, entre los paralelos 53°S y 47°S, al sur de Chubut, norte de Santa Cruz y parte de la plataforma continental del golfo. Otra cuenca presente en la Patagonia es la Cuenca Austral que se desarrolla gran parte en la provincia de Santa Cruz, como se observa en la *Figura 2.9* (IAPG, 2012). La cuenca Neuquina y la cuenca del Golfo de San Jorge, contienen el 75 % del total de las reservas comprobadas en el país, un 39 % y un 36 % respectivamente. También estas cuencas son las que aportan la mayor cantidad de petróleo (la cuenca Neuquina, un 43 % y la cuenca el Golfo de San Jorge, un 35 %) del total de la producción petrolera argentina. A lo largo de estas cuencas se pueden encontrar gran número de plantas con tanques metálicos de diferentes dimensiones destinados a almacenamiento o producción de petróleo o productos intermedios.

En los tanques de producción se produce la primera recolección y primer procesamiento de separación donde los fluidos del pozo son tratados y separados para enviarlos a la refinería. Este primer paso se realiza generalmente en una batería de tanques cerca del cabezal del pozo o en lugares donde se trata la producción de varios pozos a la vez. En estos conjuntos de tanques y separadores son separados el petróleo, el agua y el gas. Por otro lado, los tanques de almacenamiento son diseñados para el almacenamiento y manipulación de grandes volúmenes de petróleo y son de mayores dimensiones. La infraestructura de los tanques de almacenamiento exige elevadas inversiones.

En cada cuenca petrolífera, próximo a la zona de pozos de extracción, se pueden encontrar plantas de baterías de tanques de diferentes dimensiones. En la *Figura 2.10a y b* se muestra un grupo de baterías en una zona ubicada en la cuenca neuquina, próxima a Rincón de los Sauces en el norte de la provincia de Neuquén, pertenecientes a diferentes empresas operadoras de yacimientos petrolíferos. Se observa que en cada caso se presentan tanques de diferentes dimensiones y solamente en esa localización mostrada se distinguen 17 tanques de diámetro superior a 20 m. En las figuras se puede observar la diferente disposición relativa de un tanque respecto al otro, propia del uso a que están destinados cada uno.



Figura 2.9: Cuencas productivas (amarillo) y no productivas (marr6n) de la Rep6blica Argentina

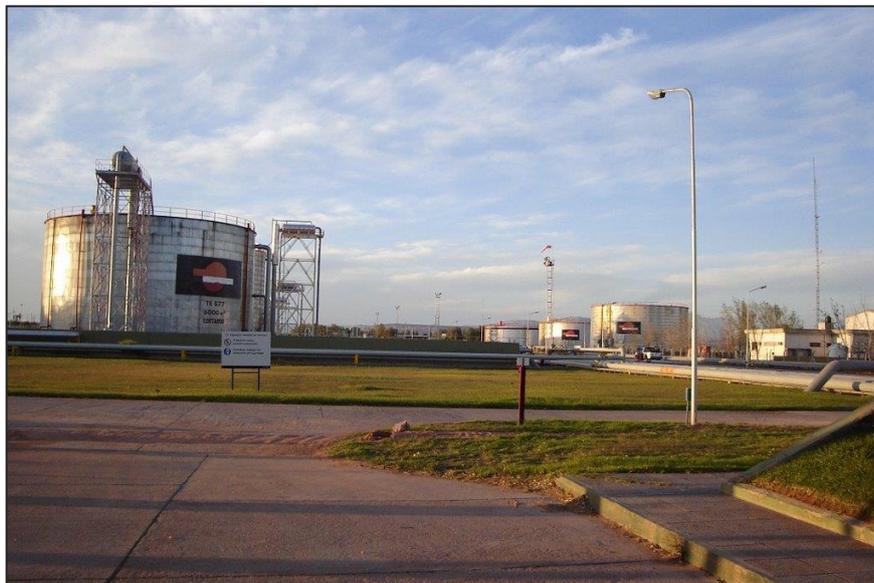
Plantas similares a las mostradas se pueden encontrar a lo largo de las diferentes cuencas petrol6feras, la *Figura 2.11a* muestra una de ellas ubicada en la zona de Colonia Catriel, al Norte de la provincia de R6o Negro y en la *Figura 2.11b* se distingue una planta de tratamiento al norte de la ciudad de General Roca. La imagen de la *Figura 2.11c* y *d* presenta una planta y vista, respectivamente de una destiler6a de Plaza Huincul, en la provincia de Neuqu6n, donde se observa una gran cantidad y variedad de tanques.

Otra zona con elevada producci6n petrol6fera es la pr6xima a Comodoro Rivadavia en la cuenca del Golfo San Jorge. All6 tambi6n se pueden observar gran cantidad de tanques dispuestos en bater6as pr6ximas a la zona de producci6n como las mostradas en las *Figuras 2.12a* y *b*.

En la *Tabla 2.1* se resumen los resultados de un relevamiento realizado por una empresa operadora de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos en sus distintas etapas de producción. El relevamiento fue realizado en yacimientos ubicados en las localidades de Rincón de los Sauces y Colonia Catriel. El relevamiento solo tiene en cuenta ciertas características del tanque, tales como: volumen de almacenamiento, diámetro, altura de la pared, relación de esbeltez. No se relevó el tipo de techo, pendientes, distanciamiento entre tanques, etc., en algunos casos existe información de volumen del tanque, pero no las otras características mencionadas anteriormente.



(a)



(b)

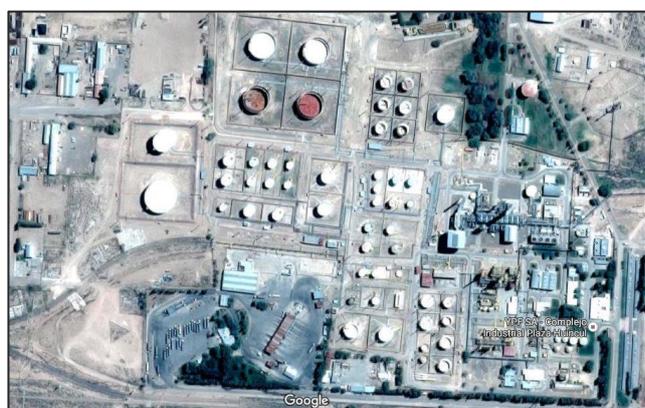
Figura 2.10: Planta Deshidratadora de Petróleo Puesto Hernández, Rincón de los Sauces.
(a) Planta. (b) Vista



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.11: (a) Planta de Tratamiento en Colonia Catriel. (b) Batería de Tanques en General Roca. (c) Planta Destilería en Plaza Huincul. (d) Vista Destilería Plaza Huincul.



(a)



(b)

Figura 2.12: Baterías de Tanques en Chubut (a) Comodoro Rivadavia. (b) Al norte de Diadema Argentina.

En los yacimientos ubicados en Rincón de los Sauces se contabilizaron 277 tanques y en los yacimientos de Colonia Catriel la cantidad de 103, por lo cual, existen un total de 380 tanques en operación al momento de realizar el relevamiento.

Volumen (m ³)	Cantidad	Razón de esbeltez media H/D
0 a 200	325	0,40:1
201 a 1000	18	0,63:1
1001 a 3000	13	0,84:1
3001 a 5000	5	0,66:1
5001 a 10000	13	0,52:1
10001 a 21000	6	0,44:1
	380	

Tabla 2.1: Resumen de Tanques de Almacenamiento.

2.9 DISTANCIAMIENTO ENTRE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO

El distanciamiento entre los tanques de almacenamiento es un parámetro importante en la construcción de baterías de almacenamiento de hidrocarburos. Generalmente se busca reducir el tamaño de las locaciones, ya sea por factores económicos, de la empresa operadora del área productiva (relación costo/beneficio) o por restricciones ambientales, y de seguridad fijadas por la reglamentación vigente en nuestro país.

Según el Artículo 321 (Ley Nacional N° 13.660), los distanciamientos entre tanques deben ser como mínimo una vez el diámetro del tanque mayor más cercano, medido de pared a pared de tanque. No se admiten almacenamientos de más de 10000 m³, cuando se trate de agrupamientos en un solo recinto. Existen además especificaciones particulares dependiendo del tipo de fluido a almacenar y distancias mínimas de separación a otras instalaciones y caminos.

Según estudios y relevamientos realizados en la Patagonia, se observan separaciones entre tanques que varían entre 1.0 D a 1.8 D, cumpliéndose los requisitos mínimos establecidos por la ley Nacional N° 13.660.

2.10 ANALISIS DE VIENTOS REGIONALES

La topografía de la región patagónica se presenta como una meseta muy extendida interrumpida por los valles de ríos. La climatología de la región se caracteriza por la presencia de fuertes vientos, principalmente entre septiembre y marzo en la zona Norpatagónica con episodios de tormentas de viento. Lassig et al. (1999) y Palese et al. (2000) han estudiado las características de los vientos en la zona norte de la Patagonia, correspondiente a la cuenca neuquina, analizando frecuencias y distribución de las velocidades medias de viento incluyendo también un análisis estadístico de vientos intensos. En su trabajo usaron series de datos observacionales de diferentes ubicaciones, concluyendo que en esta región no existen datos correspondientes a períodos muy prolongados salvo en el aeropuerto de la ciudad de Neuquén, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional. Las menores intensidades se dan en otoño mientras que las mayores velocidades se presentan en verano; esta última característica se vincula con el hecho que las estaciones del año más ventosas son la primavera y el verano. En la ciudad de Neuquén, las estadísticas climatológicas del período 1961-1990 presentan una velocidad media mensual de 3.8 m/s (13.7 km/h) con un máximo de 5 m/s (18 km/h) correspondiente a los meses de noviembre a enero, con dirección predominante del sector oeste. Un análisis de la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad muestra que las mayores frecuencias se presentan para velocidades que varían entre 3.6 y 4.5 m/s.

Para la caracterización de los vientos intensos, los autores consideraron como tormenta de viento al episodio en el que la velocidad media horaria se mantiene ininterrumpidamente por encima de 5 m/s. En la *Tabla 2.2* se muestran los resultados obtenidos por los autores para las localizaciones estudiadas, cuya ubicación se muestra en la *Figura 2.13*. Se puede observar que la duración y velocidad media y máxima en Neuquén y Mari Menuco son similares, mientras que en Cutral Có las tormentas son más intensas y más largas.

	Duración Media (h)	Velocidad Media (m/s)	Desviación Standard (m/s)	Ráfaga Media (m/s)	Desviación Standard (m/s)	Ráfaga Máxima (m/s)
Neuquén	6,33	7,4	1,7	14,7	4,3	33,3
Mari Menuco	7,08	7,7	1,1	13,8	3,4	31,1
Cutral Co	9,41	8,9	2,9	-	-	-

Tabla 2.2: Tormentas de viento observadas en Neuquén (1983-84, Mari Menuco (1996-97) Y Cutral Co (1995-96), (Palese et al., 2000)

En Neuquén en el 47% de los casos de episodios de tormenta se alcanzan velocidades entre 10 y 15 m/s y en un 32% se presentan velocidades entre 15 y 20 m/s. Además, analizando la distribución de frecuencias de tormentas de viento en el año se muestra que en Neuquén y Mari Menuco la mayor frecuencia de tormentas ocurrió en los meses de primavera y verano mientras que en Cutral C6 la frecuencia es mas pareja a lo largo de todo el año. Si bien los datos aportados por Palese et al. (2000) corresponden solamente a tres ubicaciones definidas de la provincia de Neuquén, permiten hacer una caracterización de la región. Los puntos donde se produjeron los colapsos de tanques en etapa constructiva están próximos a las ciudades de General Roca y Rinc6n de los Sauces que también se muestran en la *Figura 2.13*.



Figura 2.13: Ubicaci6n de puntos de estudio de vientos y ciudades donde se produjeron colapsos de tanques.

En particular los datos de Neuquén, medidos al norte de la ciudad sobre la meseta en una torre a 30 m del nivel de la ciudad, pueden ser extrapolados a la zona en estudio en General Roca ya que ambas localizaciones pertenecen a la barda que limita los valles de los r6os Limay y Negro respectivamente. Para la determinaci6n de las caracter6sticas del viento en Rinc6n de los Sauces se recurre a un mapa e6lico de la provincia de Neuquén (Palese et al. 2006), elaborado conjuntamente por la Universidad Nacional del Comahue y el Centro Regional de Energ6a E6lica, d6nde se pueden obtener par6metros medios para caracterizar los vientos en toda la provincia. En particular la zona de Rinc6n de los Sauces, al norte de la provincia, presenta una velocidad media anual de 3.7 m/s equiparable a la de Neuquén o Mari Menuco.

CAPITULO 3

ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

3.1. INTRODUCCIÓN

Los túneles de viento son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y, más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante.

En el proceso de diseño de una estructura existen muchas situaciones en las que, de la aplicación de las normas de cálculo de las acciones del viento, no se pueden predecir con la precisión necesaria las cargas aerodinámicas sobre la misma, normalmente porque la forma de la estructura dista mucho de las formas básicas que se contemplan en las normas. En tales circunstancias de incertidumbre el proceso de diseño deberá avanzar asumiendo los riesgos que supone el desconocimiento de las cargas del viento, bien aplicando factores de seguridad exagerados que den lugar a un diseño en extremo conservador (y con toda seguridad más caro), o bien intentando determinar con más precisión las cargas aerodinámicas, para lo que habrá que acudir, normalmente, a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos.

Así pues, la finalidad de los ensayos en túnel de viento es suministrar información sobre las particularidades del viento en las proximidades del objeto en consideración, proveer información sobre la distribución de presiones y sobre las cargas globales producidas por el viento en el obstáculo objeto de interés.

El uso de los túneles de viento como ayuda para el diseño estructural y la planificación de entornos urbanos ha ido creciendo de forma sostenida en los últimos años. No existe una respuesta única a la pregunta de cuándo es necesario hacer un ensayo en túnel de viento, ya que la respuesta depende de la importancia relativa de muchos factores, entre los cuales se pueden considerar al menos, el costo de la estructura, incertidumbre en las cargas, importancia de la

estructura (en términos de seguridad para las personas) y criterios de funcionamiento especiales dictados por el uso.

Aunque no es posible una clasificación cerrada de los tipos de ensayos que se pueden llevar a cabo en un túnel debido a la amplia variedad de estructuras y a la multiplicidad en los requisitos, algunos de los tipos de ensayos en túnel que con más frecuencia se realizan son; ensayos de edificios altos rodeados de otras edificaciones, cubiertas y revestimientos de edificios especiales (como estadios, plataformas marinas, monumentos, etc.), ensayos de puentes, ensayos para evaluar las condiciones de ventilación de edificios, amplificación de los efectos del viento y modificación del flujo debido a obstáculos naturales próximos, ensayos en edificios y entornos industriales en los que se generan productos contaminantes, y entornos urbanos.

En el presente capítulo se describen las características generales de los túneles de viento, componentes principales y los tipos de túneles que se pueden encontrar. Además se describen los túneles usados en la Universidad Nacional del Comahue (UNCO) y Universidad Nacional de la Plata (UNLP) y los distintos tipos de ensayos realizados en cada uno de ellos, así como también una descripción general de los resultados obtenidos.

3.2. GENERALIDADES

Un túnel de viento es un sistema que genera una corriente de aire, limitada por un conducto de sección constante y/o variable, para lograr condiciones especiales de flujo y simular el movimiento relativo a objetos dentro del mismo. En general la sección de la cámara de ensayos es menor que la del resto del túnel, ya que por conservación de caudal, esto genera una velocidad mayor cerca del modelo; ahorrando energía en el ventilador y generando el mismo efecto en la sección de pruebas con una menor potencia.

Sus componentes son:

- **Toma de aire**, enderezador y uniformador de corriente: la toma debe poseer una forma acampanada para evitar el desprendimiento de vórtices durante la entrada del fluido. La turbulencia en la sección de pruebas se reduce instalando enderezadores antes de la contracción.
- **Cono de contracción**: su función es producir una aceleración en el flujo pero debe ser tal que se evite el desprendimiento del flujo de las paredes.

- **Cámara de ensayos:** la sección puede tener muchas formas (circular, elíptica, rectangular, cuadrada, hexagonal u octogonal) ya que las pérdidas debidas a su forma son mínimas. La elección de su geometría obedece principalmente a consideraciones aerodinámicas y a la utilidad marginal que represente. El techo y piso planos hacen muy fácil la instalación de modelos, balanzas aerodinámicas y su calibración. En especial una sección que tenga un alto igual a dos tercios de su ancho es aún más ventajosa pues requiere de menores correcciones. La longitud usual de una sección de pruebas varía entre una y dos veces la dimensión mayor de la sección. Es preferible que la sección de ensayos sea transparente o con suficientes ventanas para la observación.

- **Difusor:** debido a que las pérdidas a través de un ducto varían proporcionalmente con el cubo de la velocidad, el objetivo del difusor es reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática, el difusor está dividido en dos partes por el ventilador. Los difusores son muy sensibles a errores de diseño, pueden crear separación de la capa límite de manera intermitente o estable, lo cual es difícil de detectar y puede causar vibración en el túnel, oscilación del ventilador y variación de la velocidad en la sección de pruebas. El diseño del difusor resulta ser clave en el éxito del túnel, pues es necesario encontrar el punto óptimo para aumentar el área, sin permitir que la capa límite se desprenda.

- **Ventilador:** es el ventilador el que produce el flujo de aire mediante succión. Puede ser único o múltiple.

En la *Figura 3.1* se pueden observar los componentes descritos.

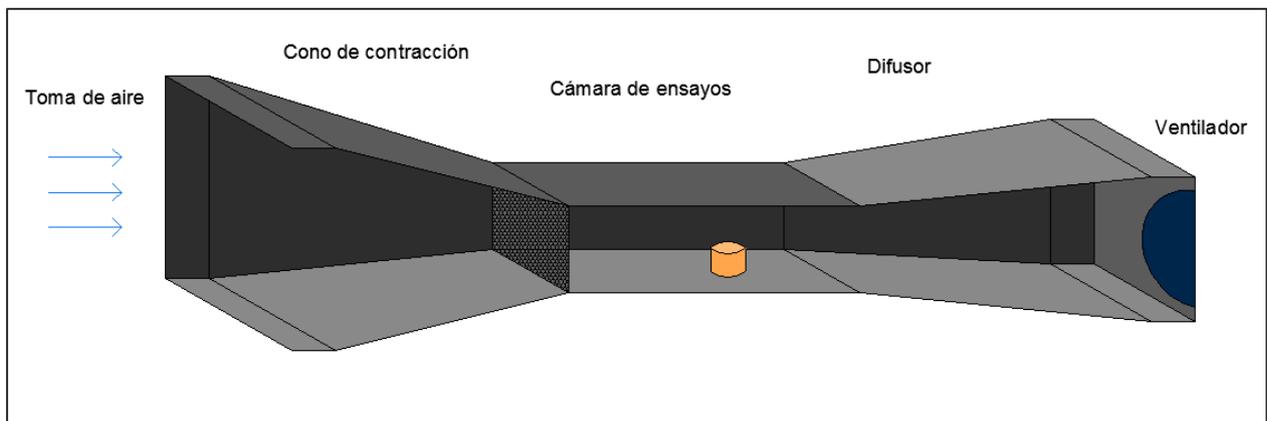


Figura 3.1: Túnel de viento, componentes.

3.3. CLASIFICACIONES BÁSICAS DE UN TÚNEL DE VIENTO

(1) Modo de circulación del flujo:

- (a) Circuito abierto: existe una renovación continua de aire. También llamado tipo Eiffel. Tiene la ventaja de ser relativamente más barato en su construcción pero requiere de más aire disponible, más energía y genera más ruido.
- (b) Circuito cerrado: el aire realiza siempre el mismo recorrido. Ahorra más energía (solo gasta la necesaria para restaurar las pérdidas por fricción) y no necesita de tanto aire disponible. Se produce calentamiento, y por ende cambio de densidad del fluido, lo cual es un factor a tener en cuenta. Por otro lado, su fabricación y montaje resultan mucho más costoso.

(2) Perfil de velocidades:

- (a) Aerodinámicos: se simula un perfil de velocidad constante, con un nivel de turbulencia bajo.
- (b) Meteorológicos: se simula un perfil de viento de la capa límite atmosférica, por lo que también son llamados “túneles de capa límite”. El nivel de turbulencia es graduado según el ensayo.

(3) La velocidad del flujo:

- (a) Subsónico: velocidades en la cámara de ensayo de hasta 100 m/s.
- (b) Transónico: también llamados túneles de viento subsónicos altos, están diseñados con los mismos principios que los túneles de viento subsónicos. Pueden alcanzar velocidades cercanas a la del sonido. La prueba a velocidades transónicas presenta problemas adicionales, principalmente debido a la reflexión de las ondas expansivas en las paredes de la cámara de ensayo. Por lo tanto, paredes perforadas o ranuradas se requieren para reducir la reflexión de la onda de choque en las paredes. También ocurren interacciones viscosas o no viscosas importantes (por ejemplo la interacción de las ondas expansivas o de la capa límite), por lo que el número de Mach y de Reynolds deben ser simulados correctamente. En ocasiones es necesario presurizar las instalaciones (cuando la escala es grande) o utilizar túneles de viento criogénicos.

- (c) Supersónico: las velocidades de flujo son superiores a la del sonido en la cámara de ensayo. La condensación o la licuefacción puede ocurrir. Esto significa que un túnel de viento supersónico necesita sequedad o ser precalentado. Generan una gran demanda de energía, por lo que se operan de forma intermitente.
- (d) Hipersónico: posee las mismas características que un túnel supersónico, solo que opera a mayores velocidades.

(4) Tamaño

- (a) Ordinarios
- (b) Escala real

(5) Precisión y error

- (a) Didácticos: se utilizan para observar cualitativamente los fenómenos.
- (b) Profesionales: al poseer mayor precisión permiten cuantificar los fenómenos observados.

Las dimensiones de la cámara de ensayos de un túnel de viento condicionan el tamaño de los modelos a ensayar. Esto se debe a que en las paredes de la misma también se genera una capa límite. Por ello, dentro de una cámara de ensayos se debe colocar un modelo de tamaño tal que las paredes no interfieran en el flujo en el que dicho modelo está inmerso.

3.4. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

En muchos problemas de ingeniería, la forma geométrica de la estructura que guía al fluido o las condiciones propias del fluido son tan particulares que se necesitan pruebas especiales sobre una réplica a escala de la estructura para poder predecir los patrones de flujo y las variaciones de presión. Cuando se hacen tales pruebas, la réplica a escala recibe el nombre de modelo y la estructura real empleada en el proyecto se denomina prototipo. El modelo suele hacerse a una escala mucho menor que el prototipo por razones económicas.

En un sentido general, semejanza significa la existencia de una relación entre dos o más fenómenos. Los principios de semejanza de uso común son los de geometría, cinemática y dinámica.

Semejanza Geométrica: existe si, y sólo si, todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen la misma relación de escala lineal. Es decir, uno y cada uno de los puntos conservan sus posiciones relativas respecto al resto. También deben conservarse todos los ángulos.

Semejanza Cinemática: existe cuando las relaciones entre longitudes homólogas tienen el mismo valor (semejanza geométrica) y las relaciones entre tiempos homólogos también. Es decir que partículas homólogas tienen movimientos y trayectorias proporcionales.

Semejanza Dinámica: se da cuando existe semejanza geométrica, cinemática y la misma relación de escalas de fuerzas.

Al realizar un estudio experimental en túnel de viento resulta necesario conocer el patrón de flujo alrededor de un único cilindro, el mismo ha sido ampliamente estudiado por su importancia en ingeniería y su simplicidad de montaje en el laboratorio tanto experimental como computacional. La *Figura 3.2* muestra un fluido ideal (no viscoso, estacionario, incompresible e irrotacional) que permanece siempre tangente a la superficie del cilindro. El flujo incide a barlovento en el punto A a 0° resultando la velocidad V igual a cero. La cantidad de movimiento se transfiere a la presión cuyo coeficiente de presión C_p resulta igual a $+1.0$. Luego el flujo se desliza hacia ambos lados del punto A sobre la superficie lisa, aumentando la velocidad hasta el punto B a 90° , siendo este punto el de menor presión, con un $C_p = -3.0$. En ese trayecto el flujo adquiere cantidad de movimiento a través del gradiente negativo de presión.

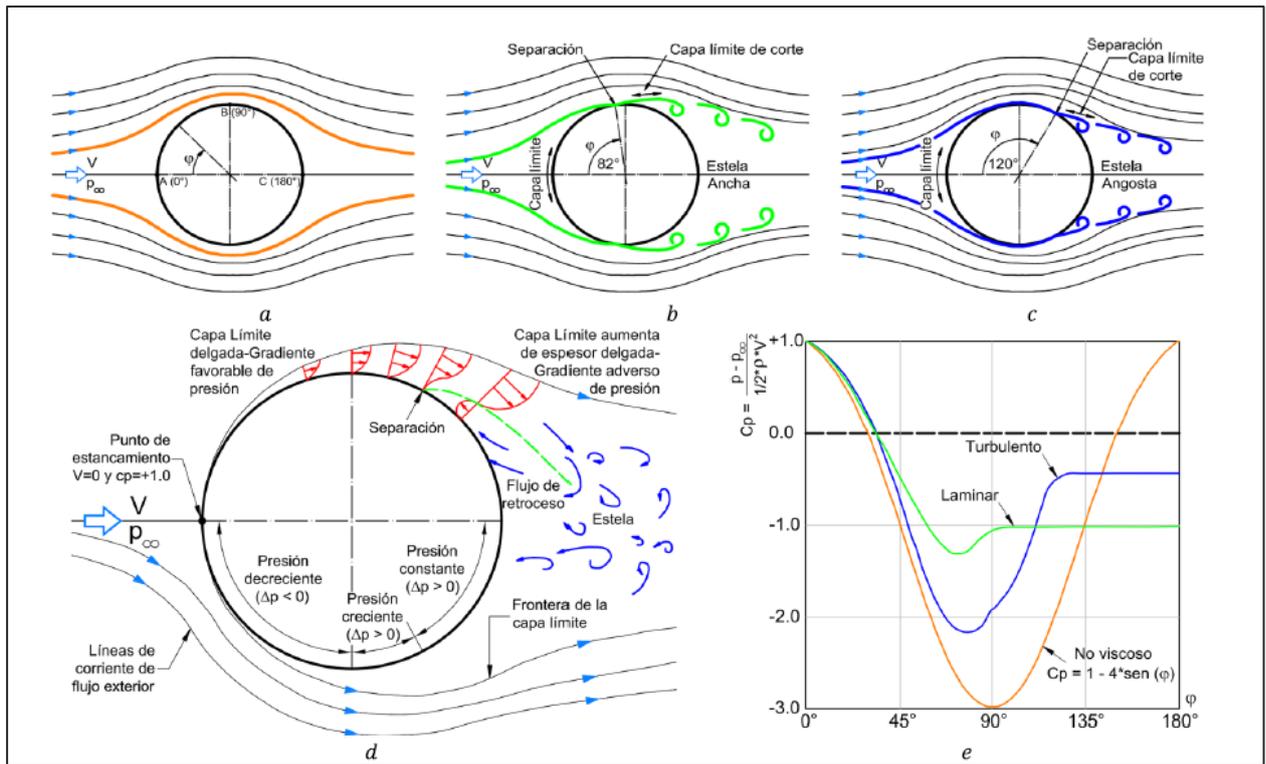


Figura 3.2: Flujo que rodea a un cilindro, (a) Flujo ideal. (b) Flujo viscoso, separación laminar. (c) Flujo viscoso, separación turbulenta. (d) Evolución de capa límite. (e) Distribución de presiones superficial teórico y real.

En cambio, entre los puntos B y C a 180° el gradiente de presión es positivo y pierde cantidad de movimiento hasta que a 180° se restituye la presión inicial, es decir que $C_p = +1.0$. Los puntos al frente y atrás del cilindro son puntos de estancamiento, debido a que $V=0$ y $C_p = +1.0$.

En realidad el fluido no es ideal y es necesario considerar los efectos viscosos. La evolución del fluido con el número de Reynolds alrededor del cilindro se muestra en la *Figura 3.2 b y c*. Las líneas de corriente no se mueven adheridas a la superficie y se alejan del cuerpo en un punto determinado, generándose capa límite, (donde influye la viscosidad), capa de corte y turbulencia.

La *capa límite* se define como la zona existente alrededor de un cuerpo que se desplaza por un fluido, en la cual la velocidad del fluido respecto al cuerpo varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente exterior V y la *capa límite de corte* se define como la capa que aparece entre dos láminas de fluido de distinta velocidad (flujo laminar) donde surgen vórtices que no llegan a constituir turbulencia, estos vórtices agregan velocidad a una lámina y la quitan a otra.

3.5. ESTUDIOS REALIZADOS

Se describen a continuación estudios realizados por diferentes investigadores sobre el comportamiento de los tanques de almacenamiento frente a diferentes problemáticas planteadas, en cada uno de estos trabajos se han elegido las dimensiones características del tanque en función de relevamientos realizados en la zona de interés o de acuerdo al criterio del investigador.

A continuación se resumen las principales características:

- Razón de esbeltez H/D, varían mayormente en un rango entre 0.25:1 y 0.75:1.
- Los diámetros de techos cónicos y planos flotantes existentes varían en su mayoría de 18.3 m a 36.6 m y las alturas de 6.1 m a 18.3 m.
- El ángulo de inclinación de los techos cónicos está en un rango de 3° a 12° aproximadamente.
- Los tanques con techos esféricos tienen dimensiones menores debido a que el peso propio de su techo es soportado en su totalidad por la cáscara cilíndrica, a diferencia del techo cónico y el plano flotante en los cuales el techo se apoya en un sistema secundario de cerchas y éstas a su vez en una columna central. Las dimensiones de los diámetros comunes de techos esféricos van desde los 9.61 m hasta 21.3 m, mientras que las alturas aumentan de 4.9 m a 14.6 m aproximadamente. Las alturas centrales de los techos domos son variables, diferenciándose éstos como domos y domos rebajados.

En general los ensayos en túnel de viento están limitados por las dimensiones del propio túnel, la obtención de una capa límite atmosférica adecuada, la fabricación de modelos con las propiedades adecuadas y otras dificultades asociadas al laboratorio. Si bien las formas experimentales de determinación de presiones en túnel de viento son importantes, cuando se trata de investigar la incidencia de diferentes parámetros sobre las presiones es conveniente contar también con herramientas computacionales que permitan una mayor flexibilidad en el tratamiento del problema. Esas herramientas han sido desarrolladas originalmente para la industria aeronáutica y forman parte de lo que se conoce como CFD.

Falcinelli et al. (2002) se ocuparon del modelado computacional de flujo de viento alrededor de tanques y silos de almacenamiento mediante CFD. Con los modelos numéricos se buscó determinar la distribución de presiones sobre las paredes de la estructura, a fin de proceder

a la evaluación de esfuerzos estructurales en las paredes y las cargas críticas de pandeo. En este trabajo se emplean esas herramientas (implementadas en el programa de propósitos múltiples NASTRAN) para investigar presiones en tanques con techo fijo. El tanque modelado por Falcinelli tiene un diámetro D de 0.2 m, una altura H de 0.2 m (relación de esbeltez $H/D=1:1$) con techo cónico a 25° .

En otro trabajo, Falcinelli et al. (2003) presenta un modelo computacional de flujo de viento alrededor de tanques de almacenamiento de petróleo o de agua, ubicados en terrenos accidentados. En este trabajo los autores tuvieron dos objetivos: **(a)** determinar la distribución de presiones sobre las paredes de la estructura. **(b)** determinar posiciones favorables y no favorables de emplazamiento de la estructura en relación al accidente geográfico considerado. El campo de aplicación del estudio está asociado al comportamiento estructural no lineal de tanques superficiales. En este caso la geometría del tanque tiene un diámetro de 30.48 m, una altura de 12.19 m (relación de esbeltez $H/D= 0.40:1$), con un techo cónico con una pendiente de $3:16= 10.62^\circ$.

3.5.1 Descripción Túnel de Viento UNCO.

En la *Figura 3.3* se observa el túnel de viento perteneciente al Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales – Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad Nacional del Comahue.

El propósito del túnel es didáctico, ya que por las dimensiones del mismo no se puede modelar la capa límite atmosférica. Se trata de un túnel de viento abierto (Eiffel), de tipo meteorológico y subsónico. En el interior de la sección de prueba se consigue un perfil de velocidades aproximadamente uniforme. Las dimensiones de la sección de prueba son de 0.3×0.3 m con una longitud de 0.6 m.



(a)



(b)



(b)

Figura 3.3: (a) Túnel de Viento, vista lateral. (b) Sección de prueba.
(c) Piezómetros hidráulicos.

El cono de contracción toma un volumen grande de aire de baja velocidad y lo reduce a un volumen pequeño de aire de alta velocidad sin crear turbulencia. Al final del compartimento se incluye una estructura de panal, con el objeto de reducir los grandes vórtices y desprendimientos que se originen en la entrada, para obtener un flujo más estable y con poca intensidad de turbulencia. La sección de prueba es donde se ubica el modelo a estudiar, con tomas de presión. Al fijar la velocidad, las tomas de presión ubicadas en el modelo indican la distribución de presión en los piezómetros del manómetro hidráulico. La cámara de prueba cuenta con una toma de presión con el objeto de determinar el nivel de referencia en los piezómetros del manómetro hidráulico. El *difusor* retarda la velocidad de la circulación de aire en el túnel de viento. El *mecanismo impulsor* proporciona la fuerza que hace al aire moverse a través del túnel. Este túnel de viento es del tipo abierto, es decir, que no se recircula el aire en su interior. El impulsor es un ventilador de siete aspas de 3 HP de potencia. Para poder fijar la velocidad del ensayo el mismo cuenta con un regulador de velocidad. Para realizar las mediciones de velocidad se utiliza un anemómetro de hilo caliente. Consiste en un hilo de platino o níquel calentado eléctricamente, la acción del viento tiene por efecto enfriarlo y hace variar así

su resistencia, por consiguiente, la corriente que atraviesa el hilo es proporcional a la velocidad del viento. El anemómetro de hilo caliente permite medir las siguientes magnitudes: velocidad del viento (m/s) y temperatura (°C). Cuenta con una sonda telescópica que permite realizar las mediciones en los puntos de interés.

3.5.2 Descripción del Túnel De Viento UNLP.

El túnel de viento del Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental de la Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata es de circuito cerrado y del tipo denominado de capa límite, tiene una sección de prueba de 7.5 m de largo y 1.4 m de ancho. El aire es impulsado por una hélice de seis palas accionada por un motor de corriente continua de 50 HP. Dicho motor posee un sistema de control de velocidad que permite variar la misma desde el reposo hasta un máximo de 20.0 m/s (medida al centro de la sección transversal). El aire pasa por un panel de abejas, a los efectos de entregarle simetría axial y, a posteriori, atraviesa un conjunto de perfiles horizontales, con capacidad de girar alrededor de sus ejes, cuyo objetivo es la generación de turbulencia, la cual se varía según la posición relativa de cada perfil respecto del viento incidente. Una vez producida la turbulencia deseada, el flujo atraviesa un conjunto de paralelepípedos dispuestos en el suelo del túnel con el propósito de simular la rugosidad del terreno. Con el túnel pueden reproducirse las distribuciones de velocidades medias con la altura correspondientes a las leyes de la potencia o logarítmica, según convenga. Asimismo pueden reproducirse los distintos tipos de turbulencia en la baja capa límite atmosférica. En la *Figura 3.4* se muestran las partes más representativas del túnel de viento de circuito cerrado, la *Figura 3.4a* exhibe en planta parte del circuito del túnel y la sección de prueba, mientras que la *Figura 3.b* muestra la puerta de acceso a la sección de prueba.



Figura 3.4: (a) Túnel de Viento, circuito cerrado. (b) Sección de prueba, puerta de acceso.

3.5.3 Descripción del Túnel De Viento UNNE.

El túnel de viento “Jacek P. Gorecki” [17] del Laboratorio de Aerodinámica de Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Se trata de un túnel de viento profesional de circuito abierto, de tipo meteorológico y subsónico. Tiene 2,4 m de ancho, 1,8 m de altura y 22,4 m de largo en la sección de trabajo. El aire ingresa al túnel por una contracción a través de un panel de abejas para orientar el flujo y una pantalla. Sigue hacia una superficie rugosa que permite establecer el perfil de flujo antes de alcanzar la sección de ensayo donde, sobre una tabla rotativa, se coloca el modelo a ensayar. La sección de ensayo está conectada con un regulador de velocidad de 2.25m de diámetro contando con un motor eléctrico de 92kW a 720 rpm. El aire pasa por un difusor antes de dejar el túnel. Este túnel fue utilizado por Hernández (2016) para obtener cuantitativamente la distribución de los coeficientes de presión en la estructura del tanque utilizando dos modelos rígidos; uno para obtener las presiones internas y otro para las externas. La *Figura 3.5* muestra una vista exterior del túnel de viento usado mientras que la *Figura 3.6* una vista interior del mismo.



Figura 3.5: Túnel de viento “Jacek P. Gorecki”, vista exterior.



Figura 3.6: Túnel de viento “Jacek P. Gorecki”, vista interior.

3.5.4 Ensayos Realizados

El propósito de este trabajo es obtener mediante herramientas de CFD la distribución de presiones en la cáscara de tanques de almacenamiento tanto para tanques con techo como tanques en etapa de construcción. Para obtener resultados aceptables en cuanto a la distribución de presiones y a la modelación de la capa límite atmosférica, se utilizaron los resultados obtenidos por Carlos Burgos (2012) y José Esteban Cicerone (2011) de ensayos realizados en los túneles de viento de la UNCO y de la UNLP. Conceptualmente los ensayos realizados en la UNLP fueron similares a los realizados en la UNCO. Las diferencias fueron que se contó con modelos más grandes, con mayor número de tomas estáticas (las cuales cubrían más posiciones), con mayor precisión y cantidad de mediciones (debido a la utilización de otro tipo de tecnología), y con condiciones más controladas, entre las que resaltan la velocidad y la capa límite meteorológica.

En los ensayos realizados por Cicerone (2011) se buscaba obtener un mapa de la distribución de presiones en la cáscara del cilindro y la velocidad del viento a la que se produce el pandeo en tanques en etapa constructiva. En el trabajo realizado por Burgos (2012) se buscó obtener la distribución de presiones en la cáscara y en el techo de los cilindros. Se realizaron

ensayos sobre modelos aislados y modelos de dos tanques para evaluar la influencia que la presencia de un tanque ejerce sobre el otro.

Los ensayos de túnel de viento se efectuaron en dos etapas. La primera etapa incluyó la realización de los ensayos en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. Si bien el propósito del túnel de viento es didáctico, el mismo permitió comprender el comportamiento del fluido sobre este tipo de estructuras y determinar de forma aproximada la distribución de presiones. La segunda etapa incluye la realización de los ensayos en un túnel de viento profesional, tanto el perteneciente al Departamento de Aeronáutica de la Universidad Nacional de La Plata (Cicerone, 2011; Burgos, 2012), como el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” del Laboratorio de Aerodinámica de Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) (Hernández, 2016), permitiendo realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados.

En la *Figura 3.7* se muestran imágenes de los ensayos realizados por Cicerone (2011) en el túnel cerrado de la UNLP, en la *Figura 3.7a* se puede observar un modelo que falló por pandeo de la cáscara, en la *Figura 3.7b* se puede ver el arreglo de paralelepípedos que simulan la rugosidad del terreno.

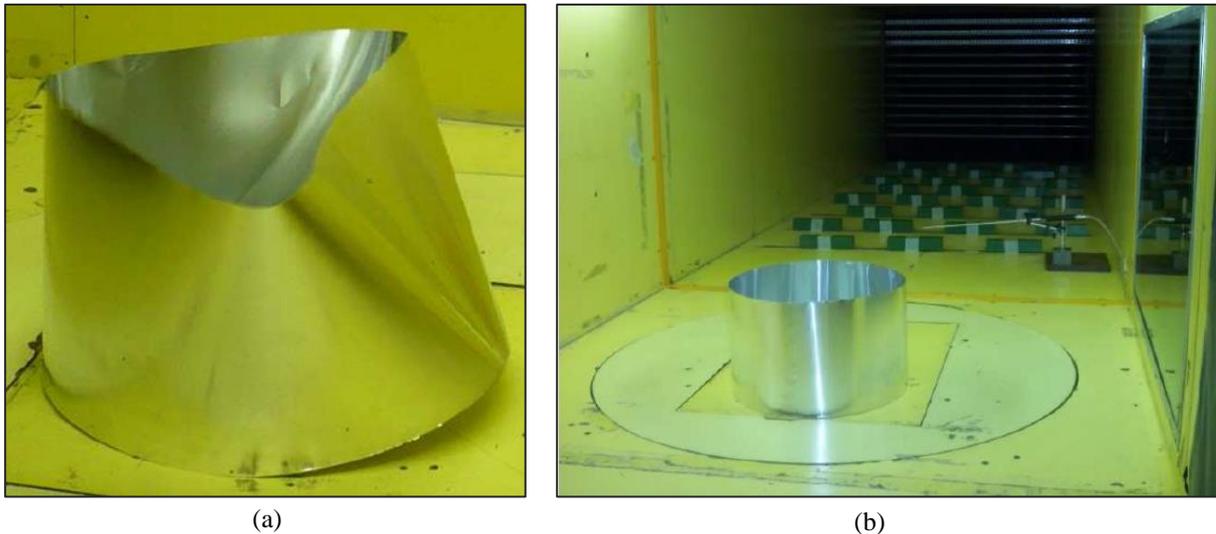


Figura 3.7: (a) Falla de un modelo ensayado. (b) Interior sección de prueba.

En las Figuras 3.7 se observan imágenes de los modelos ensayados por Burgos, en la Figura 3.7a se puede ver un arreglo de dos tanques y en la Figura 3.7b se observa la posición de un tanque para su ensayo en el túnel.

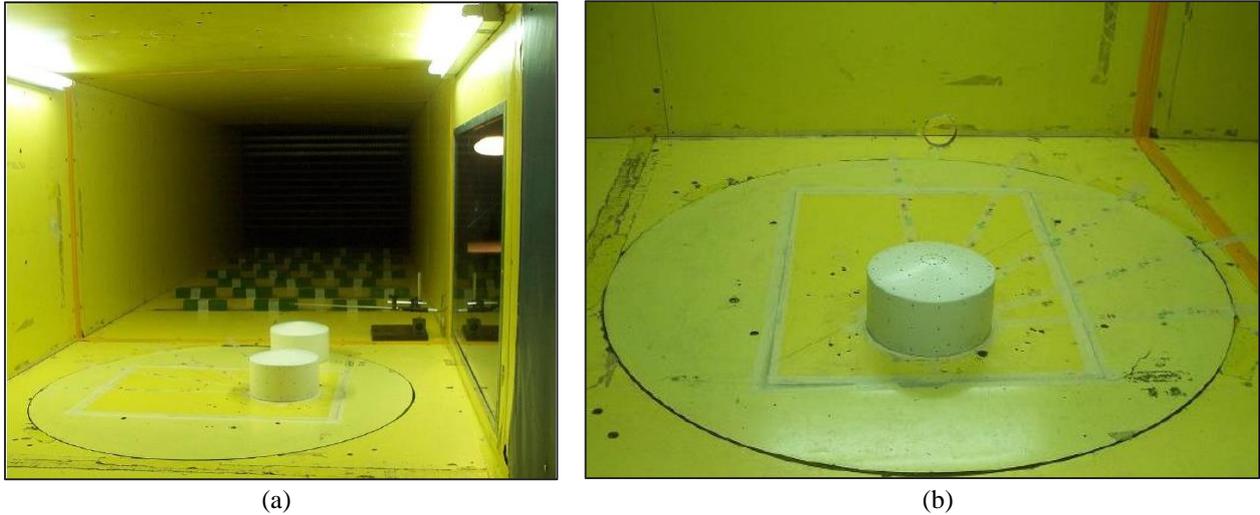


Figura 3.7: (a) Arreglo de dos tanques en sección de prueba. (b) Modelo aislado.

En los diferentes trabajos lograron representar y obtener resultados acordes a estudios previos realizados por otros investigadores. Parte fundamental de estos ensayos fue poder caracterizar de forma adecuada el patrón de flujo generado en la cámara de ensayos del túnel de forma tal que luego los resultados obtenidos sean semejantes y logren reproducir satisfactoriamente los efectos observados en los prototipos.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO

4.1. INTRODUCCIÓN

Para el ingeniero civil es importante conocer el estado de cargas producido por el viento sobre una determinada estructura. Será preciso, en general, determinar primero como es la distribución de presiones sobre la superficie de la misma para que luego se determinen las cargas globales. Para conocer estas presiones es necesario recurrir al conocimiento del viento que, como es sabido, es una masa de aire en movimiento, un fluido en fin y su comportamiento es estudiado por la mecánica y la dinámica de fluidos. En este capítulo se detallarán conceptos básicos sobre flujos y sus números adimensionales, flujos en capa límite, turbulencia y capa límite atmosférica, que dan el marco teórico para el análisis en CFD.

4.2. FLUJO

Las fuerzas y momentos presentes en el movimiento de los fluidos se expresan mediante la utilización de coeficientes adimensionales, la ventaja de la adimensionalización reside en modelar el movimiento alrededor de obstáculos, caracterizar e identificar el flujo con unos pocos parámetros, lo que confiere una gran generalidad a los resultados.

El primero de esos parámetros es el coeficiente de presión C_p . Para definir el coeficiente de presión se recurre a la ecuación de Bernoulli que relaciona, a lo largo de una línea de corriente en un fluido incompresible ($\rho = \text{const}$), no viscoso, a caudal constante, la presión p y la velocidad U , en un punto del dominio del fluido con las condiciones de presión y velocidad, p_0 y U_0 , existentes corriente arriba, lejos del cuerpo:

$$p + \frac{1}{2}\rho U^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho U_0^2 = p_R \quad (4.1)$$

donde ρ es la densidad del fluido. Al término $\rho U^2/2$ se le llama presión dinámica y p es la presión de remanso (presión donde la velocidad es nula).

La ecuación (4.1) es válida a lo largo de una línea de corriente en aquellas situaciones en las que el flujo del aire pueda ser considerado como potencial, esto sucede cuando las condiciones del flujo incidente son uniformes y constantes corriente arriba, p será, de acuerdo con (4.1), constante en todo el dominio fluido.

Una excepción son las capas límites y las estelas que se forman corriente abajo de los obstáculos, donde la viscosidad del aire juega un papel importante, produciendo un efecto disipativo cuya consecuencia más inmediata es la aparición de pérdidas de presión en el flujo o, dicho de otra forma, en una disminución del valor de la presión de remanso.

Como se sabe el coeficiente de presión en un punto, se define como la presión en el punto considerado, $p(x,y,z)$, menos la presión de referencia, normalmente la presión estática de la corriente incidente, p_0 , dividida por la presión dinámica de la misma corriente, $\frac{1}{2}\rho U_0^2$, es decir:

$$c_p(x, y, z) = \frac{p-p_0}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (4.2)$$

Un coeficiente positivo sobre un determinado punto de la geometría de un obstáculo es un indicador de sobrepresión, es decir que sobre ese punto, el perfil de la corriente se desacelera, por lo que la presión local es mayor que la presión estática de la corriente incidente. Mientras que uno negativo indica que la presión local es menor que la de la corriente, produciéndose una aceleración del perfil de la corriente dando como resultado un efecto de succión en el punto.

Conocida la presión sobre el cuerpo e integrando la misma según un sistema de referencia (x,y,z) , da como resultado la fuerza global sobre dicho cuerpo y el momento según cada eje se obtiene integrando el producto de la proyección de la presión sobre el eje deseado por la distancia al punto donde se refiera el momento. Adimensionalizando las componentes de fuerza global en función del producto de la presión estática y el área frontal del cuerpo, se obtienen los coeficientes de resistencia aerodinámica C_D en dirección del flujo de la corriente y el coeficiente de sustentación C_L en dirección normal vertical a la dirección del flujo. Como así también se obtiene el coeficiente de momento C_M respecto al eje considerado y a L una longitud característica del obstáculo.

$$c_D(x, y, z) = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (4.3)$$

$$c_L(x, y, z) = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (4.4)$$

$$c_M(x, y, z) = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 LA} \quad (4.5)$$

Se sabe que matemáticamente el flujo del aire se describe por las ecuaciones de Navier-Stokes (ver capítulo 5), estas ecuaciones expresan la conservación en un volumen de control de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Al escribirlas de modo adimensional se obtienen otros parámetros adimensionales que junto a los parámetros geométricos del cuerpo permiten caracterizar el flujo.

4.3. NÚMERO DE REYNOLDS RE

Las ecuaciones de cantidad de movimiento expresan el equilibrio, según cada uno de los ejes del sistema de coordenadas empleado, entre la variación de la cantidad de movimiento, las fuerzas de presión y las de fricción. De estos tres términos, el de presión es el de mayor importancia, ya que desde el punto de vista macroscópico se considera que la presión es la responsable de equilibrar las demás. Descontada la presión queda la pregunta, si puede haber situaciones en las que de los dos efectos restantes, fuerzas inerciales y fuerzas de fricción, uno sea dominante frente al otro.

Para medir la importancia de un término frente a otro se han de comparar los órdenes de magnitud de ambos términos mediante el teorema de PI, que sin entrar en detalles resulta ser el cociente entre las fuerzas inerciales y las viscosas, dando un número adimensional al cual se denomina Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (4.6)$$

donde μ es la viscosidad y ρ la densidad del fluido.

Interpretando el Número de Reynolds, se obtiene que valores muy bajos del mismo ($Re < 0,01$) indican que la fuerza viscosa es muy grande en comparación con la fuerza inercial, tanto que esta última puede ignorarse. Por lo tanto el equilibrio de cada partícula del fluido se da entre la fuerza de presión neta que actúa sobre el fluido y la fuerza viscosa neta que resiste a la deformación. Valores mayores del número de Reynolds ($Re > 1000$), indican que la fuerza viscosa

neta podría depreciarse (excepto en la capa límite), teniéndose un equilibrio entre la fuerza de presión neta y la resistencia inercial a la aceleración.

Para el caso de fuerzas ejercidas sobre un objeto inmerso en un flujo, se sabe que las mismas se aplican a la superficie del objeto a través de aquellas partículas fluidas que están en contacto directo con dicha superficie. Sobre cada elemento de superficie la partícula de fluido (inmediatamente adyacente) ejerce en general una fuerza normal (de presión) y otra tangencial (de fricción). Cada una de estas fuerzas tiene una componente en la dirección del flujo.

La suma de todas las componentes en la dirección del flujo de la fuerza tangencial constituye lo que se conoce como *Arrastre Viscoso* sobre el cuerpo. Y la suma de todas las componentes en la dirección del flujo de la fuerza normal constituye lo que se conoce como *Arrastre De Presión* sobre el cuerpo. Es importante notar que el arrastre viscoso está siempre presente ya que todos los fluidos poseen alguna viscosidad, pero el arrastre de presión depende mucho de la forma del cuerpo, por ello también se lo llama “arrastre de forma”.

A la hora de modelar la corriente alrededor de los obstáculos, el hecho de que el Número de Reynolds sea alto permite introducir importantes simplificaciones, pues se puede entonces desprestigiar el efecto de los términos viscosos en las ecuaciones de movimiento y analizar éste, añadiendo determinadas hipótesis adicionales y utilizando todo el arsenal matemático disponible para el análisis de fenómenos potenciales. Sin embargo, el que se pueda considerar el aire como no viscoso en la mayor parte del flujo no significa que la viscosidad no sea dominante en otras regiones del dominio fluido.

4.4. FLUJO EN CAPA LÍMITE

Como se menciona anteriormente, existen regiones del dominio fluido donde las fuerzas viscosas no resultan despreciables, la región cercana a la pared de los obstáculos es un ejemplo de ello, dicha región se denomina *Capa Límite*. Se analiza una corriente bidimensional que discurre paralelamente a un obstáculo plano, como indica la *Figura 4.1*. El término que mide los efectos viscosos será proporcional al producto de la viscosidad por la derivada transversal de la velocidad, según esto, la viscosidad será despreciable donde los gradientes transversales de la velocidad sean pequeños, es decir donde las variaciones transversales de la velocidad no sean significativas. Precisamente en la superficie de un cuerpo esto no sucede, ya que la condición de contorno a imponer es la no existencia de deslizamiento entre partículas fluidas y el sólido, es

decir, la velocidad del fluido ha de ser nula en la pared del cuerpo, por lo que los gradientes de velocidad resultaran ser altos y, en consecuencia, los efectos viscosos importantes.

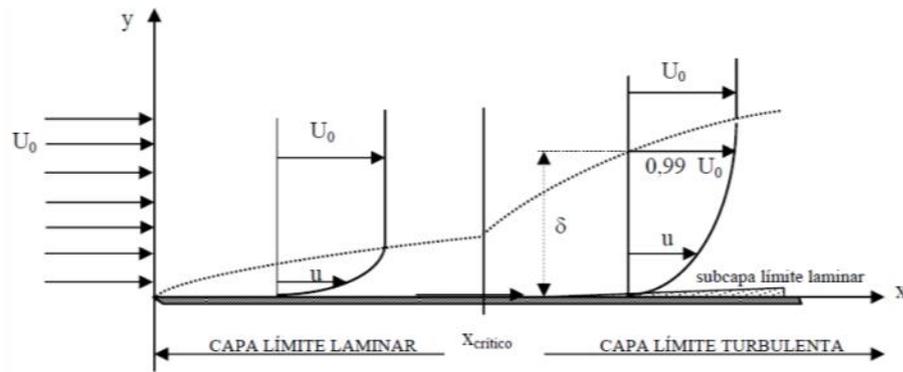


Figura 4.1: Desarrollo de una capa límite.
(Página Internet: <http://es.pfernandezdiez.es/>)

Las capas límites pueden ser laminares o turbulentas. En una capa límite laminar las partículas fluidas contiguas siguen trayectorias casi paralelas a la superficie del cuerpo, mientras en una capa límite turbulenta se produce un complicado movimiento de agitación, dado por las pequeñas perturbaciones que presentan los cuerpos, que se superpone al movimiento principal. En un movimiento turbulento la velocidad de la partícula es la suma de la velocidad media y las componentes de la agitación turbulenta, razón por la cual se produce un mezclado efectivo de las diferentes capas o láminas fluidas, por lo que la corriente resulta mucho más homogénea. La capa límite turbulenta presenta un perfil de velocidades mucho más uniforme que la capa laminar, lo que se traduce en mayores variaciones de velocidad en una zona más próxima a la pared del cuerpo y por lo tanto, mayor la fricción.

De estas primeras aproximaciones se dependen dos propiedades de la capa límite, una es que la presión en una capa límite adherida es constante a lo largo de las rectas perpendiculares a la superficie del obstáculo, y otra es que toda capa límite se ensancha a medida que avanza sobre la superficie del obstáculo, en un razonamiento bidimensional, esto se explica por dos motivos:

- a. Las fuerzas de fricción: cada lámina fluida dentro de la capa límite desacelera por viscosidad a la lámina inmediata exterior y es desacelerada por la lámina inmediata interior. La cantidad de movimiento que pierde el fluido se emplea en equilibrar la acción tangencial que la pared ejerce sobre él, permaneciendo la presión constante.
- b. Un posible desprendimiento de la capa límite: esto depende del campo de presiones que va encontrando la capa límite en su avance a lo largo del cuerpo. Si la presión disminuye al avanzar, se cuenta con un gradiente favorable de presiones, ya que el fluido ganará

cantidad de movimiento, caso contrario si aumenta la presión, este perderá cantidad de movimiento lo cual resultara en un gradiente desfavorable.

Teniendo en cuenta estos dos razonamientos, se puede ver que en presencia de un gradiente adverso de presión, las láminas fluidas más cercanas a la pared, que tienen menor cantidad de movimiento, se desaceleraran comparativamente más que las más alejadas. A consecuencia de esta desaceleración las partículas próximas a la pared terminan por retroceder en vez de avanzar, y en la zona donde ocurre este retroceso la capa límite está desprendida, como se ve en la *Figura 4.2*.

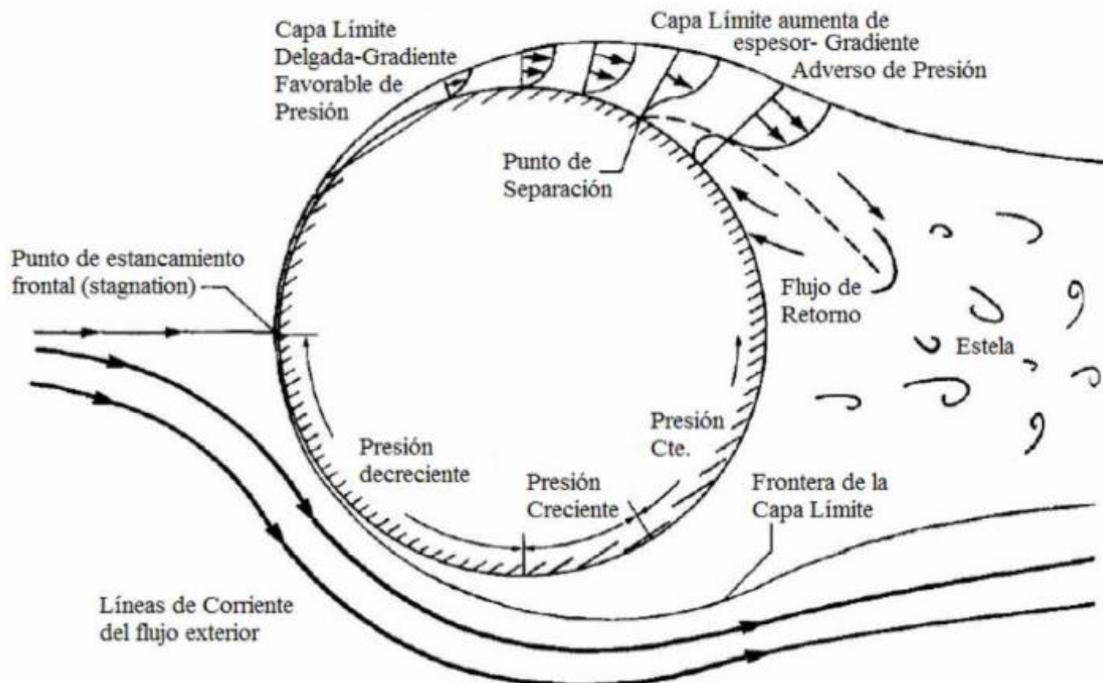


Figura 4.2: Desprendimiento de una capa límite.

Para aclarar algo más del fenómeno del desprendimiento de la capa límite, se supone el caso de un cilindro circular de radio a sometido a una corriente incidente uniforme y constante de velocidad U_0 , como el de la *Figura 4.3*.

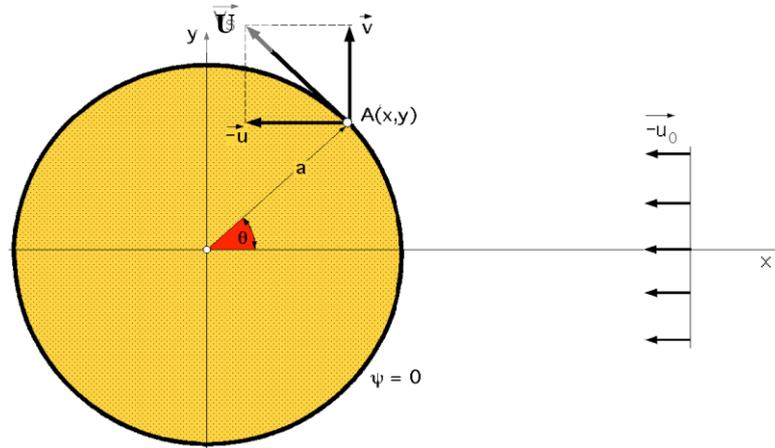


Figura 4.3: Distribución de velocidades en un cilindro circular.

(Página Internet: <http://es.pfernandezdiez.es/>)

Se supone también que se cumplen las condiciones necesarias para que este movimiento se pueda considerar como potencial, es decir, el Número de Reynolds es elevado, lo que permite desprestigiar los efectos de la viscosidad, y que se cumplen las condiciones de incompresibilidad y las propiedades termodinámicas del fluido. La definición de flujo potencial puede encontrarse en cualquier libro de Mecánica de los Fluidos básico, como puede ser, *Mecánica De los Fluidos – Pedro Fernández Díez (s.f.)*.

Antes de continuar con la explicación del desprendimiento de la capa límite en un cilindro, se retomaran conceptos de flujo potencial. Despreciando los efectos viscosos y el flujo es incompresible, el movimiento es irrotacional es decir, $\nabla \times \mathbf{U} = \mathbf{0}$, y teniendo en cuenta un potencial de velocidades φ , tal que:

$$\mathbf{U} = \nabla \varphi \quad \text{o} \quad u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (4.7)$$

La ecuación de continuidad, $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$, se convierte en la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.8)$$

Si el flujo está descrito sólo por dos coordenadas, existe también la función de corriente ψ . Para el flujo irrotacional plano en coordenadas cartesianas xy , la forma apropiada es:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4.9)$$

La condición de irrotacionalidad se reduce de nuevo a la ecuación de Laplace para ψ :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.10)$$

donde las condiciones de contorno son la velocidad conocida en la corriente libre y flujo nulo a través de cualquier superficie sólida, es decir, $\frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial \psi}{\partial x}$ conocidas y $\psi_{\text{cuerpo}} = \text{cte}$. Que la función de corriente sea constante puede interpretarse como la pared del cuerpo. La solución de esta ecuación es una red ortogonal de flujo, donde cualquier conjunto de líneas puede considerarse como equipotencial y las ortogonales a ese conjunto serán las líneas de corriente. De esta manera se puede construir una variedad de flujos potenciales interesantes sin más que sumar los potenciales de velocidad y las funciones de corriente de una corriente uniforme, y de fuentes, sumideros y torbellinos.

Un caso útil de esa variedad de flujos potenciales interesantes, que se utilizara más adelante, es la solución del doblete. Esta solución se obtiene cuando el observador se sitúa lejos del par fuente-sumidero, la configuración de este flujo se asemeja a una familia de círculos tangentes en el origen y en el límite en que la distancia, a la cual se encuentran separados entre sí la fuente y el sumidero, se hace muy pequeña, el par se denomina doblete.

Ahora es posible construir una gran variedad de cuerpos cerrados mediante la superposición de una corriente uniforme con fuentes, sumideros y torbellinos. El cuerpo será cerrado solo si el caudal neto suministrado por las fuentes es igual al recogido por los sumideros, es el caso del Ovalo de Rankine, una fuente y un sumidero alineados en la dirección de una corriente, se obtiene una forma cilíndrica, que es más largo que ancho, cuando se dibujan las líneas de corriente ψ constante. Cuando la intensidad de la fuente es muy grande el ovalo de Rankine se convierte en un círculo de diámetro mucho mayor que la distancia entre fuente y sumidero. Mirando con la escala del cilindro, esto es equivalente a una corriente uniforme más un doblete. Por lo tanto, la función de corriente para el flujo alrededor de un cilindro circular, de radio a , con circulación centrado en el origen es la de una corriente más un doblete y un torbellino situados en el origen. Y el potencial de velocidad total para el flujo combinado y la función de corriente total para el mismo, resulta:

$$\varphi = -U_0 x \left(1 - \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right) \quad (4.11)$$

$$\psi = U_0 y \left(-1 + \frac{a^2}{x^2 + y^2} \right) \quad (4.12)$$

Siendo las coordenadas de un punto cualquiera A(x;y):

$$x = a \cos \theta \quad (4.13)$$

$$y = a \sin \theta \quad (4.14)$$

A su vez, por flujo potencial: $u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ y $v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$, derivando y operando se obtiene:

$$u = -2U_0 \sin^2 \theta \quad (4.15)$$

$$v = 2U_0 \sin \theta \cos \theta \quad (4.16)$$

Y la velocidad en dicho punto:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} = 2U_0 \sin \theta \quad (4.17)$$

donde u y v son las componentes horizontal y vertical de la velocidad y θ el ángulo medido a partir del punto de estancamiento. Aplicando Bernoulli entre un punto situado en el infinito aguas arriba y otro situado sobre el cilindro circular, se obtiene que la presión sobre el cilindro vale:

$$p_R = p_0 + \frac{1}{2} \rho U_0^2 - 2\rho U_0^2 \sin^2 \theta \quad (4.18)$$

y por lo tanto, según la expresión (4.2), el coeficiente de presión sobre el cilindro será:

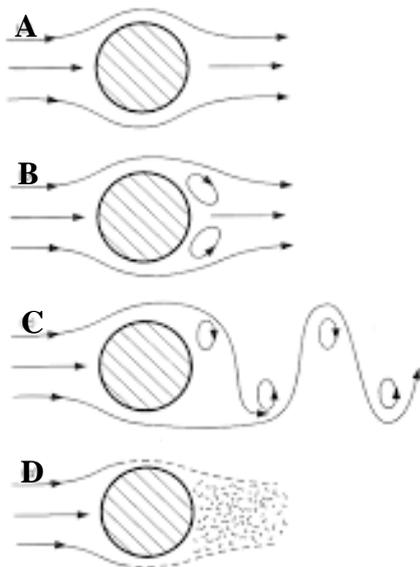
$$c_p = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (4.19)$$

Esta solución teórica muestra dos puntos característicos, donde $c_p=1$ cuando $\theta=0$ y $\theta=\pi$, esto indica que sobre la superficie del cilindro se presentan puntos de remanso, tanto en la cara anterior como la posterior.

Según la solución potencial, conforme una partícula fluida próxima al cilindro sobrepasa la posición de remanso anterior, su velocidad va aumentando y, en consecuencia, de acuerdo a la expresión (4.18), la presión disminuye y por lo tanto el coeficiente de presión, expresión (4.19),

también disminuye. Esta situación se mantiene en la cara anterior del cilindro cuando $0 \leq \theta \leq \pi/2$, siendo el gradiente de presión favorable. El máximo de la velocidad se alcanza en $\theta = \pm\pi/2$, donde la velocidad es el doble de la corriente incidente, $U=2U_0$, y el coeficiente de presión vale $c_p=-3$. A partir de este punto de mínima presión, la velocidad comienza a disminuir hasta que se anula en el punto de remanso posterior.

La solución anterior es válida a barlovento del cilindro, pero poco realista a sotavento debido al comportamiento de la capa límite. En realidad, como se sabe, por muy pequeño que sea el valor de la viscosidad existe una capa límite ligada al obstáculo que es muy sensible a los gradientes desfavorables de presión. En un movimiento real la capa límite no es capaz de vencer este gradiente desfavorable y se desprende cerca de $\theta = \pm\pi/2$, formándose aguas abajo del cilindro una estela turbillonaria, *Figura 4.4*.



A.- Régimen de corriente no desprendida, $Re < 5$.

B.- Aparición de torbellinos desprendidos en la estela, $5 < Re < 40$.

C.- Formación de torbellinos alternados, configuración conocida como calle de torbellinos de Kármán, $40 < Re < 300$.

D.- A valores más altos del número de Reynolds, $Re > 300$, la estela es turbulenta, variando el punto de desprendimiento según sea la capa límite laminar o turbulenta. La transición se produce a un número de Reynolds del orden 3×10^5 .

Figura 4.4: Desprendimiento de una capa límite.

(Aerodinámica de Inst. Aeroportuarias, Meseguer Ruiz et al. 2000)

Cuando la capa límite se desprende, el campo de presiones en la zona desprendida es radicalmente distinto al que predice la solución potencial, como se puede apreciar en la *Figura 4.5*, donde se han representado las distribuciones del coeficiente de presión sobre un cilindro circular en el caso potencial y para flujo real, donde θ se mide a partir del punto de remanso. Como se puede observar, en la realidad la presión en la cara posterior del cilindro es mucho menor que la que habría si fuera válida la solución potencial, y esta descompensación de las presiones a barlovento del obstáculo es la causa principal de la aparición de la resistencia aerodinámica.

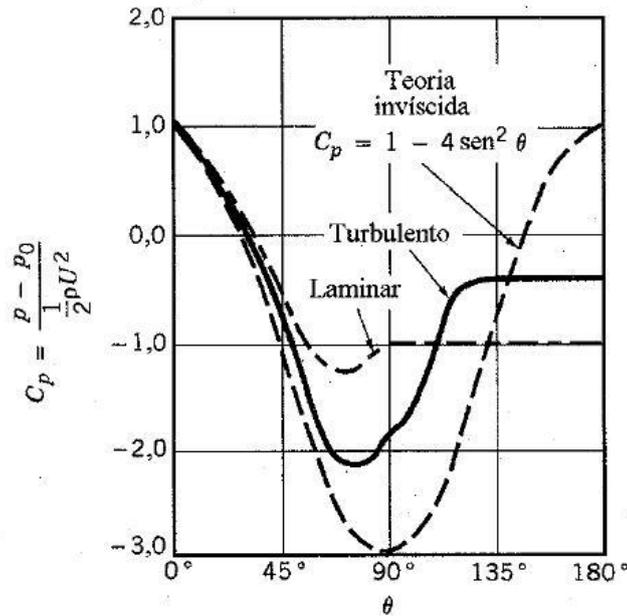


Figura 4.5: Comparación de coeficientes de presión: Solución Potencial vs Real.
(Aerodinámica de Inst. Aeroportuarias, Meseguer Ruiz et al. 2000)

Se ha dicho que la capa límite laminar es inestable cuando el número de Reynolds supera el valor crítico, por lo que más tarde o más temprano pasará a turbulenta. Si el número de Reynolds es suficientemente alto, dicha transición se produce antes del desprendimiento, y como la capa límite turbulenta es más resistente a los gradientes adversos que la laminar, el desprendimiento se retrasa, dando lugar a una estela más estrecha.

4.5. TURBULENCIA

Para realizar una primera aproximación al concepto de turbulencia, se analizará el caso de flujo en conductos, con densidad y viscosidad constantes, sin efectos térmicos, de forma que las ecuaciones de continuidad en el espacio (4.16) y de movimiento (4.17) son suficientes para poder determinar la velocidad y la presión, sujetas a la condición de no deslizamiento en la pared y con condiciones de entrada y salida conocidas:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.20)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 U \quad (4.21)$$

siendo $\mathbf{U} = (\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$, la velocidad, donde $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ las correspondientes componentes de la misma en los ejes (x,y,z), ρ la densidad del fluido, p la presión, μ la viscosidad cinemática y g la aceleración de la gravedad.

Como se sabe la presión realiza un trabajo para mover el flujo a través del conducto, el cual no es transmitido al flujo a través de los esfuerzos cortantes en la pared, ya que no realizan trabajo dado que la velocidad en la misma es nula. Pero si existe un balance entre el trabajo de las fuerzas de presión y la disipación viscosa en el interior del flujo, dado por la igualdad entre la integral de la función disipación para un fluido viscoso newtoniano e incompresible y dicho trabajo.

En un flujo turbulento, debido a las fluctuaciones, cada término de presión o velocidad de las ecuaciones (4.20) y (4.21) varía rápida y aleatoriamente en función de la posición y del tiempo. Para resolver el problema de que las matemáticas actuales no admiten variables fluctuantes, Reynolds reescribió estas ecuaciones en términos de medias temporales de las variables turbulentas, dado que a altos números de Reynolds la atención está dirigida a los valores promediados o medios.

A continuación, se describe el caso para la componente de velocidad en x u , que es la dirección del flujo en un conducto y la predominante, por lo que la media temporal \bar{u} de la función turbulenta $u(x,y,z,t)$ se define como:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt \tag{4.22}$$

donde T es un periodo promediado que debe ser mayor que cualquier período significativo de las fluctuaciones.

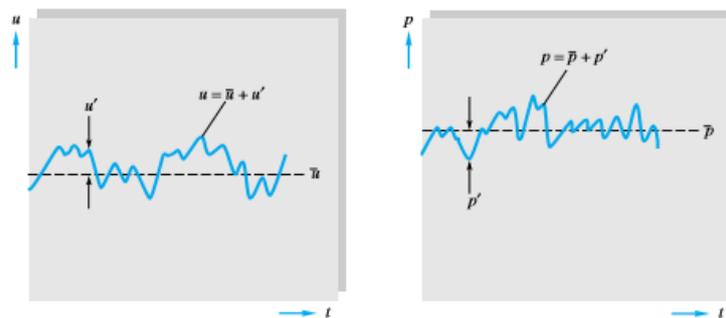


Figura 4.6: Definición de media y fluctuación en flujo turbulento: velocidad y presión.
(Fluid Mechanics, White 1998)

La fluctuación \mathbf{u}' se define como la desviación de \mathbf{u} de su valor medio:

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}} \quad (4.23)$$

como muestra la *Figura 4.6*. Por definición, la media de la fluctuación es cero, sin embargo la media del cuadrado de la fluctuación no lo es y es una medida de la intensidad de la turbulencia. La idea de Reynolds fue separar cada propiedad en sus medias más las fluctuaciones correspondientes, de esta manera cuando se sustituye en las ecuaciones (4.20) y (4.21) y se toman las medias temporales, la ecuación de continuidad se reduce a:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4.24)$$

que es idéntica a la expresión laminar.

Después de tomar la media temporal, cada componente de la ecuación de movimiento (4.21) contendrá, además de los valores medios de las variables, los valores medios de tres productos de las fluctuaciones de velocidad, siendo en la dirección del movimiento principal (x) la más importante de estas ecuaciones:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u'w'} \right) \quad (4.25)$$

A los términos de las fluctuaciones de velocidad $\overline{\rho u'^2}$, $\overline{\rho u'v'}$, $\overline{\rho u'w'}$ se los denomina esfuerzos turbulentos τ_{turb} , porque tienen esas dimensiones y aparecen conjuntamente con los esfuerzos τ_{lam} (laminares) newtonianos $\mu(\partial \bar{u}/\partial x)$. Realmente son términos de aceleración convectiva, ya que aparecen con la densidad, pero tienen el mismo efecto matemático.

Los esfuerzos τ son a priori incógnitas que deben relacionarse experimentalmente con las condiciones y la geometría del flujo. Afortunadamente, en los flujos en conductos y en capas límites, los esfuerzos turbulentos τ_{turb} asociados con la dirección y normal a la pared son dominantes, y la ecuación de cantidad de movimiento longitudinal puede ser aproximada fielmente por una expresión más sencilla:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} \approx -\frac{d\bar{p}}{dx} + \rho g_x + \frac{d\tau}{dy} \quad (4.26)$$

donde:

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \tau_{lam} + \tau_{turb} \quad (4.27)$$

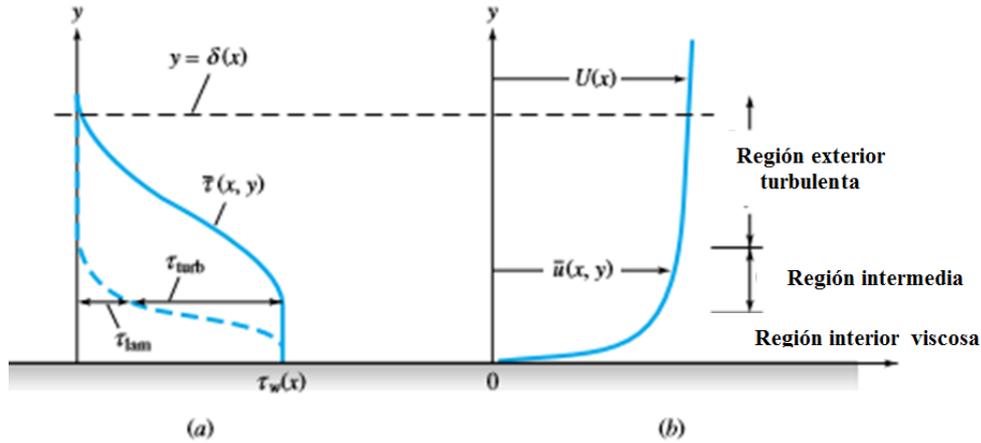


Figura 4.7: Distribuciones típicas de (a) esfuerzo cortante y de (b) velocidad en un flujo turbulento. (Fluid Mechanics, White 1998)

La *Figura 4.7* muestra la distribución de τ_{lam} y τ_{turb} tomadas como medidas típicas a través de una capa límite turbulenta cerca de la pared. Los esfuerzos viscosos son dominantes cerca de la pared (región interior viscosa) y los esfuerzos turbulentos lo son en la región exterior. Entre ambas existe una región de transición, denominada región intermedia o de solape, donde tanto los esfuerzos viscosos como los turbulentos son importantes.

En la región exterior τ_{turb} es dos o tres órdenes de magnitud mayor que τ_{lam} , y en la región de la pared ocurre lo contrario. Estos datos experimentales nos permiten establecer un modelo, simple pero efectivo, de distribución $\bar{u}(x, y)$ a través de la capa límite turbulenta.

4.6. LEY DE CAPA LOGARÍTMICA

Ahora sabiendo que existen tres regiones en el flujo turbulento cerca de la pared, analizaremos conceptos deducidos por Prandtl en 1930, por Kármán en 1933 y por C.B. Millikan en 1937.

Continuando con el concepto de flujo en conductos, sea τ el esfuerzo cortante en la pared y sean δ y $U(x)$ el espesor y la velocidad en el borde de la región exterior, $y = \delta(x)$, *Figura 4.7*.

Para Prandtl, en la región interior, \bar{u} debe ser independiente del espesor de la capa límite, siendo entonces $\bar{u} = f(\mu, \tau, \rho, y)$. Por análisis dimensional, esto equivale a:

$$\mathbf{u}^+ = \frac{\mu}{u^*} = F\left(\frac{yu^*}{\nu}\right) \text{ con } \mathbf{u}^* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4.28)$$

donde ρ la densidad del fluido, p la presión, μ la viscosidad cinemática, ν la viscosidad dinámica.

Esta ecuación (4.24) se denomina *Ley de la pared*, y la magnitud \mathbf{u}^* recibe el nombre de *velocidad de fricción* porque tiene dimensiones (LT^{-1}), aunque no es realmente una velocidad de flujo. Subsecuentemente, Kármán dedujo que en la región exterior, \bar{u} debe ser independiente de la viscosidad y su diferencia con la velocidad de la corriente libre U debe depender del espesor δ y de las otras propiedades, $(U(x) - \bar{u})_{\text{exterior}} = f(\delta, \tau, \rho, y)$. De nuevo por análisis dimensional reescribimos esta ecuación en la forma:

$$\frac{U(x) - \bar{u}}{u^*} = G\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (4.29)$$

donde u^* tiene el mismo significado que en la ecuación (4.28). La ecuación (4.29) se denomina *Ley de defecto de velocidad* para la región exterior. Ambas leyes, (4.28) y (4.29), se cumplen con buena aproximación en una amplia gama de flujos turbulentos en conductos y capas límites, en las tres regiones de las mismas. Las dos son diferentes, aunque deben acoplarse suavemente en la región intermedia. C.B. Millikan demostró que esto sólo podía ocurrir si la velocidad en esta zona variaba de forma logarítmica con y :

$$\frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{yu^*}{\nu} + B \quad \text{Región Intermedia} \quad (4.30)$$

Para una amplia gama de flujos las constantes adimensionales k y B valen aproximadamente $k \approx 0,41$ y $B \approx 5,0$. La ecuación (4.30) corresponde a la llamada *Capa logarítmica*.

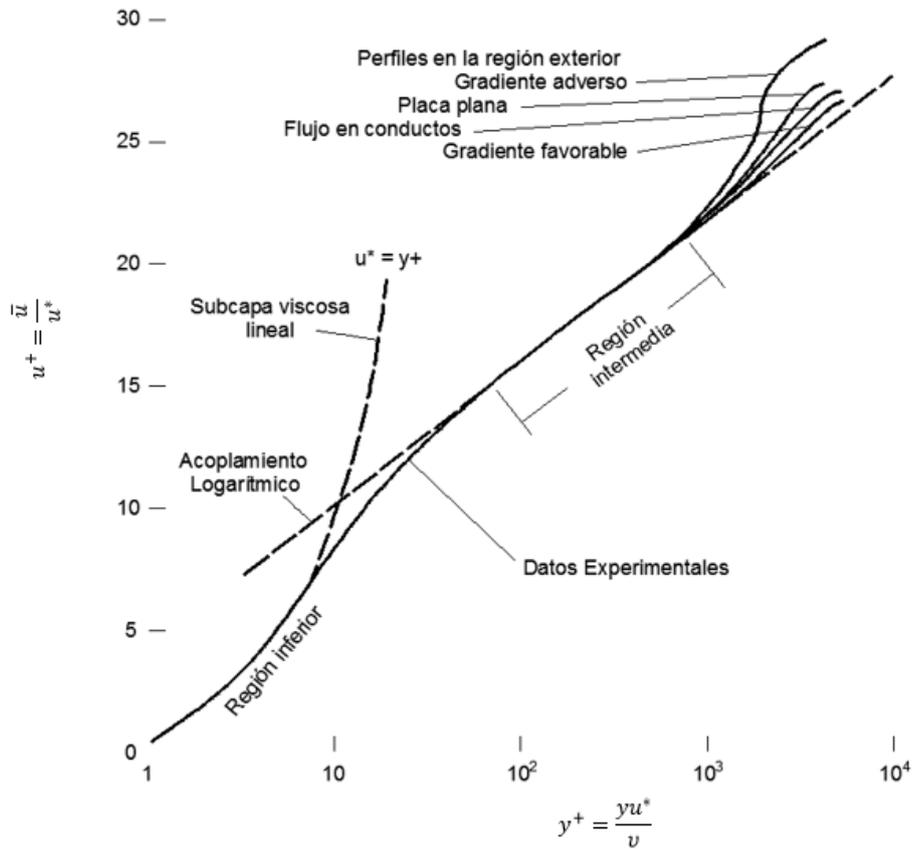


Figura 4.8: Verificación experimental de las leyes interior, exterior y de acoplamiento en el perfil de velocidad en un flujo turbulento parietal. (Fluid Mechanics, White 1998)

Así pues, mediante razonamientos de análisis dimensional e intuición física se puede inferir que en una representación de \bar{u} en función de $\ln y$ y en una capa límite turbulenta mostraría un aspecto curvo tanto cerca de la pared como en la región exterior, y sería una recta en la región intermedia o capa logarítmica de solape. La *Figura 4.8* muestra dicha función. Los cuatro perfiles de la región exterior que se muestran tienden suavemente a la ley logarítmica en la región intermedia, y la diferencia entre ellos se debe a las diferencias en el gradiente de presiones exterior. La ley de la pared es única y obedece a la relación lineal viscosa:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{yu^*}{\nu} = y^+ \tag{4.31}$$

desde la pared hasta aproximadamente $y^+=5$, desviándose después para alcanzar la recta logarítmica para valores de y^+ en torno a 30.

La ley logarítmica (4.30), en lugar de corresponder a un intervalo corto de acoplamiento, es válida en casi toda la capa límite salvo en la región exterior cuando hay un gradiente de

presiones adverso muy fuerte (como un difusor). La región interior no suele ocupar más de un 2% del espesor y suele despreciarse. Así, se puede utilizar dicha ecuación como una aproximación excelente para resolver casi todos los problemas.

4.7. CAPA LIMITE TERRESTRE

Hasta aquí se han descrito las causas globales que definen los patrones globales del comportamiento del flujo turbulento, los cuales dan el marco teórico de los conceptos básicos de Mecánica de Fluidos. Si se añaden conceptos de meteorología, se puede explicar el comportamiento de la capa limite atmosférica. En este trabajo se adoptaron los conceptos meteorológicos más importantes pero no se detallaron, para su consulta se puede sugerir el libro Aerodinámica de Instalaciones Portuarias de José Meseguer Ruiz et al.

Como se conoce, en el movimiento del aire en las proximidades del suelo también se desarrolla una capa limite, cuyo espesor es del orden de 1000m, que según la meteorología, define la zona de transición entre el viento geostrófico y la superficie de la tierra, y que se extiende lateralmente hasta los límites del sistema de presiones asociado al viento en consideración. Retomando que la velocidad aumenta con la distancia a la frontera sólida, en este caso el suelo, por lo tanto la velocidad del viento varía con la altura. Pero también existe una variación en la dirección del viento dada con la altura que se explica a través de un balance de fuerzas que actúan sobre la partícula fluida, fuerzas de presión (presentes por equilibrio termodinámico), fuerzas de Coriolis, fuerzas centrífugas, (presentes por la rotación de la tierra), y fuerzas de fricción debidas al rozamiento con la superficie del planeta (rugosidad), que en presencia de un gradiente de presión en altura (isobaras) dan como resultado este cambio de dirección.

La bibliografía meteorológica plantea un sistema de coordenadas distinto a la bibliografía de mecánica de fluidos, el eje Y en Mecánica de los Fluidos es ahora reemplazado por el eje Z, esta aclaración es utilizada para no perder referencia sobre el nombre de los distintos coeficientes utilizados por ambas bibliografías. Para determinar la variación del viento con la altura, en la dirección del viento (Eje X), la bibliografía sugiere diversas leyes, siendo la ley de variación potencial y la ley logarítmica las que tradicionalmente han recibido mayor aceptación. El modelo logarítmico establece que dicha variación está dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad (4.32)$$

donde u es la velocidad en la dirección del viento, u^* es la velocidad de fricción, k es la constante de von Karman y adquiere un valor entre: $0,38 < k < 0,42$, para los cálculos se utilizará el valor $k = 0.40$, z es la variación en altura y z_o es la longitud o parámetro de rugosidad es una característica de la rugosidad aerodinámica de las superficies y está relacionada con la altura de los elementos que se encuentran sobre la superficie que producen la rugosidad de la misma. Es la altura a la que la velocidad de referencia del viento es nula. Una expresión equivalente utilizada en la modelación con CFD es la ecuación:

$$\bar{u} = U_o \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad (4.33)$$

donde U_o es la velocidad a una altura z de referencia y Z_o es la rugosidad.

Para el modelo potencial de Sutton (1953), la variación con la altura de la velocidad del viento está dada por:

$$\bar{u} = U_o \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^p \quad (4.34)$$

donde U_o es la velocidad a una altura z_{ref} determinada. El exponente p se toma constante con la altura, depende de la rugosidad z_o . Por ejemplo, para un terreno suave ($z_o=1\text{cm}$) a una altura de 10 m resulta $p = 1/7$, éste es un valor comúnmente sugerido en textos de ingeniería. Pero para un terreno rugoso ($z_o=1\text{m}$) a una altura de 20 m, p es mayor al doble del valor mencionado.

Para ambos perfiles, valor del coeficiente z_o está tabulado, tanto en la bibliografía como en los diversos reglamentos sobre acciones del viento sobre las estructuras al igual que la velocidad U_o , la misma suele ser citada en la bibliografía como velocidad de referencia.

La velocidad $U(x,y,z)$ puede describirse empleando métodos estadísticos, descomponiendo esta velocidad en una velocidad media \bar{u} , en la dirección del viento predominantes, a la que se le superpone las componentes de agitación turbulenta correspondiente a las coordenadas: u, v y w . Cada componente se caracteriza mediante su desviación estándar,

escala de tiempo y escalas de longitud integral, funciones de densidad espectral (que definen la distribución en frecuencia de la energía turbulenta) y el co-espectro normalizado que especifica la correlación espacial. Al analizar los fenómenos turbulentos en el viento atmosférico se suele considerar que las componentes de la fluctuación turbulenta σ_u , σ_v y σ_w varían de forma aleatoria en el tiempo pero no en el espacio, admitiéndose que las variaciones de la velocidad que produce la turbulencia aparecen simultáneamente en zonas cercanas entre sí, existiendo por tanto una cierta coherencia espacial en las variaciones de la velocidad.

La intensidad de turbulencia, $I_u(z)$, es la relación entre la desviación estándar de la componente longitudinal de la velocidad turbulenta y el valor medio de la velocidad del viento:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{u}} \quad (4.35)$$

si se reemplaza el perfil de velocidad media en la ecuación (4.35), tanto para el potencial como el logarítmico, se puede observar que la rugosidad del terreno disminuye la velocidad media pero aumenta la intensidad de turbulencia, es decir, la componente no estacionaria de la velocidad del viento es tanto mayor cuanto mayor es la rugosidad del terreno.

La variación temporal y la variación espacial de la velocidad turbulenta se describen a partir de las denominadas escalas de tiempo y longitudes integrales de la turbulencia, cuya definición matemática es compleja. La primera variación indica la cantidad de información que una medida de la componente de fluctuación en la dirección media del viento, realizada en un tiempo t , proporciona sobre una medida de la misma componente de la velocidad de turbulencia realizada en el mismo sitio en un tiempo $t + \Delta t$. La segunda variación representa una medida del tamaño de los torbellinos, es decir, el tamaño medio de una ráfaga en una determinada dirección. Puesto que hay una medida del tamaño de los torbellinos para cada una de las tres direcciones de los ejes del sistema de referencia y existen tres componentes de la velocidad de fluctuación turbulenta, se tienen en total nueve longitudes integrales de la turbulencia. De todas ellas se suele tomar como referencia la correspondiente a la velocidad longitudinal, estas dependen de la altura z y de la rugosidad del terreno Z_0 .

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL FLUJO

5.1. INTRODUCCIÓN

El campo del análisis computacional de problemas de Mecánica de Fluidos, CFD, es una herramienta cuyo origen se remonta a la década de los sesenta, motivado por el desarrollo de nuevas y más avanzadas herramientas para la resolución de problemas físico-matemáticos, que se vio potenciado por el enorme avance de los ordenadores en la segunda mitad del siglo XX.

Con la mecánica de fluidos computacional se pretende resolver numéricamente las ecuaciones que explican el comportamiento de los fluidos que, como es sabido, está gobernado por los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y de la energía. Estos principios se traducen a un conjunto de ecuaciones matemáticas, llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, que junto a la ecuación de estado del fluido definen perfectamente las tres componentes de velocidad, U , la presión, p , la temperatura, T , y la densidad, ρ , en todo el espacio ocupado por el fluido.

Para acercarnos una mejor representación de la realidad del comportamiento de la capa límite terrestre, las ecuaciones de Navier-Stokes deben estar acompañadas de los conceptos de turbulencia y de análisis meteorológicos, que logran caracterizar el perfil de viento local, lo cual añade complejidad matemática a nuestro problema. Y es aquí donde la mecánica computacional hace su aporte presentando modelos de turbulencia que se basan en distintos tratamientos de la misma.

Por lo que en este capítulo se presentaran las ecuaciones de Navier-Stokes, conceptos de análisis numérico, modelos de turbulencia y la validación del uso del software para el caso de estudio.

5.2. ECUACIONES

Como mencionamos anteriormente, estas ecuaciones son:

Ecuación de conservación de la masa o continuidad:

$$\frac{dp}{dt} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5.1)$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{F}_m + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' \quad (5.2)$$

donde el término $\rho \mathbf{F}_m$ representa la acción de las fuerzas dependientes de la masa, y el término $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}'$ es la divergencia del tensor de esfuerzos viscosos.

Ecuación de conservación de la energía:

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) e \right) = -p \nabla \cdot \mathbf{U} + \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \Phi_V - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + Q \quad (5.3)$$

donde e representa la energía interna del fluido, $\mathbf{k} \nabla T$ es el flujo de calor por conducción, \mathbf{q}_r es el flujo de calor por radiación, Φ_V es la función de disipación de Rayleigh, y finalmente Q representa la adición de calor por cualquier otro método que no sea conducción, convección o radiación. Para cerrar la formulación, en cada problema particular se precisan las condiciones iniciales y de contorno apropiadas.

5.3. CONCEPTOS DE ANALISIS NUMERICO

Para resolver de forma numérica este complejo sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales es preciso dar primero dos pasos complementarios: el primero es la discretización del dominio donde se aplican las ecuaciones o mallado, y el segundo es la discretización de las ecuaciones, es decir la reducción de estas a sumas simples.

Como ya conocemos la discretización del dominio indica que el espacio de trabajo ya deja de ser continuo y pasa a ser discreto, lo que equivale a decir que se renuncia a conocer los

valores de las variables en todos los puntos del campo fluido, aspirando solo a conocerlos únicamente es un número finito de puntos de dicho dominio. En estos puntos es donde se fuerza el cumplimiento de las ecuaciones reducidas o discretas, expresando las variables relativas a un punto como funciones de las variables a sus puntos contiguos. El resultado es un sistema de ecuaciones algebraicas cuya resolución ha de hacerse de modo iterativo. La solución de las ecuaciones discretas se parecerá más o menos a la solución exacta de las ecuaciones de Navier-Stokes según el grado de pericia que se haya aplicado tanto en la discretización del dominio como de las ecuaciones.

Existen muchas formas de mallar o discretizar el dominio de un fluido, en 2D con triángulos y rectángulos mientras que en 3D lo usual es usar tetraedros o hexaedros, no obstante también es posible generar mallas mixtas. La utilización de elementos distintos en diferentes regiones del dominio fluido viene impuesta por la limitación en el número de ecuaciones que se pueden manejar con los medios de computación disponibles, lo que nos lleva a emplear patrones de mallado con un tamaño característico pequeño allí donde las magnitudes físicas sufran las mayores variaciones y patrones de mallado de dimensiones mayores donde las magnitudes varíen poco. Ahora teniendo en cuenta los conceptos de desprendimiento de capa límite y los conceptos expuestos anteriormente, se puede visualizar que la malla debe ser revisada en aquellos puntos donde haya desprendimiento de capa límite turbulenta.

Los métodos numéricos de mayor impacto a los que recurre la mecánica de fluidos computacional son: el método de paneles, el de diferencia finitas y el de volúmenes finitos, a continuación se describen conceptualmente dichos métodos:

- El método de paneles parte de una forma simplificada de las ecuaciones de flujo, suponiendo que el movimiento es potencial. Como en este tipo de movimiento existe en un conjunto de soluciones conocidas, la resolución consiste en hallar una combinación lineal de estas soluciones particulares que satisfaga las condiciones de contorno del problema en consideración. Este método supone que las singularidades (torbellinos, dobletes) están distribuidos en la frontera –discretizada– del dominio del fluido, determinándose su intensidad al obligar el cumplimiento de las condiciones de contorno. Como limitante, este método no es aplicable por el momento más que a cuerpos esbeltos y fuselados, como son las alas o los cuerpos redondeados y afilados en su borde de salida, pues las soluciones que proporciona sólo son válidas en aquellas zonas donde la corriente no está desprendida. Para ajustar más los resultados a la realidad, se puede combinar este

método con un código que resuelva la capa límite, de modo que se utilicen las soluciones potenciales de presión y velocidad correspondientes al campo exterior (fuera de la capa límite) como entrada para la integración, numéricamente, de las ecuaciones de aproximación de la capa límite sobre una línea de corriente que pase por la superficie del cuerpo. Para ello es preciso tener en cuenta dos ideas fundamentales: la primera es que en la frontera de la capa límite la velocidad ha de coincidir con la velocidad resultante de la solución exterior, y la segunda, que la capa límite es localmente unidireccional (la integración de las ecuaciones de la capa límite una vez conocida la solución exterior se suele hacer por medio de algún método de diferencias finitas).

- En los métodos de diferencias finitas, la característica fundamental es la discretización de todo el dominio y de las ecuaciones de Navier-Stokes. De esta forma el espacio de trabajo se limita ahora a una rejilla o malla de puntos, que es donde se quiere conocer los valores de las variables que definen el comportamiento del fluido. La idea básica es que partiendo del conocimiento de las variables en un cierto estado se puede obtener siempre una aproximación de sus derivadas con respecto a las variables geométricas, mediante el desarrollo de los polinomios de Taylor, y teniendo en cuenta que la precisión del resultado depende del orden del polinomio. Operando de esta forma es posible reducir las ecuaciones de Navier-Stokes, o un modelo simplificado de ellas, a sumas entre los valores en distintos puntos de las variables del problema, de modo que si el modelo numérico definido tiene N variables que resolver en M puntos, se tiene un sistema de $N \times M$ incógnitas. Para particularizar el problema al caso en consideración habrá que imponer condiciones de contorno específicas en las fronteras del fluido, lo que da lugar a un estado inicial del campo fluido, del cual se partirá para determinar una solución que satisfaga tanto las ecuaciones discretizadas en cada punto como las condiciones de contorno impuestas. Como es fácil de imaginar, tal como está planteado el método de diferencias finitas, un mallado del espacio compuesto por triángulos o tetraedros imposibilita el cálculo de las derivadas, por lo que la discretización de las ecuaciones deberá realizarse en mallas hechas de rectángulos o hexaedros, teniendo en cuenta el disminuir el tamaño de elemento cerca de la superficie de los obstáculos, para poder reproducir con fidelidad los fenómenos que ocurren en las capas límite.
- El punto de partida del método de volúmenes finitos es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control, donde las variables son almacenadas en los nodos, estos se ubican en los vértices de la malla o en los centros de los volúmenes, y es la referencia

con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio. Los métodos anteriores están basados en la discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes en su formulación diferencial, lo que tiene la ventaja de mostrar fácilmente la importancia relativa de cada uno de los términos que intervienen los fenómenos fluidos. En cambio el método de volúmenes finitos parte de la formulación integral de dichas ecuaciones, cuya ventaja frente a la forma diferencial de las mismas es que resulta más sencillo identificar los mecanismos bajo los que actúan las distintas variables, (transporte, difusión, conducción, etc). Por lo que las ecuaciones en forma integral son:

Ecuación de conservación de la masa o continuidad:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho \mathbf{U} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (5.4)$$

donde ρ es la densidad, \mathbf{U} la velocidad, Ω el volumen del dominio y S es la superficie del volumen de control.

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{U} d\Omega + \int_S \rho \mathbf{U} \mathbf{U} \cdot d\mathbf{S} = \int_S (-p\delta_{ij} + \boldsymbol{\tau}'). d\mathbf{S} + \int_{\Omega} \rho \mathbf{F}_m d\Omega \quad (5.5)$$

Ecuación de conservación de la energía:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) d\Omega + \int_S \rho \left(e + \frac{U^2}{2} \right) \mathbf{U} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{U} \cdot (-p\delta_{ij} + \boldsymbol{\tau}'). d\mathbf{S} + \int_{\Omega} (\rho \mathbf{F}_m \cdot \mathbf{U}) d\Omega + \\ \int_S (\mathbf{k}\nabla T - \mathbf{q}_r) \cdot d\mathbf{S} + \int_{\Omega} \mathbf{Q} d\Omega \end{aligned} \quad (5.6)$$

donde e representa la energía interna del fluido, \mathbf{U} la velocidad, $(-p\delta_{ij} + \boldsymbol{\tau}')$ es la suma del tensor de presión (diagonal) más el de los esfuerzos viscosos, el término $\rho \mathbf{F}_m$ representa la acción de las fuerzas dependientes de la masa, $\mathbf{k}\nabla T$ es el flujo de calor por conducción, \mathbf{q}_r es el flujo de calor por radiación.

Mirando las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6), todas tienen en común la forma de integración en Ω el volumen del dominio y S es la superficie del volumen de control, por lo que

conocido el campo de velocidades y las propiedades de un fluido, estas ecuaciones se pueden reescribir bajo la forma (5.7) en función de una nueva variable \mathbf{N} :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{N} d\Omega + \int_{S} \rho \mathbf{N} \mathbf{U} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S} \Gamma \nabla \mathbf{N} d\mathbf{S} + \int_{\Omega} \mathbf{q}_{\mathbf{N}} d\Omega \quad (5.7)$$

donde el primer término de la izquierda de la igualdad representa la variación de la variable \mathbf{N} en el volumen de control escogido, y el segundo es el transporte por convección de la variable \mathbf{N} a través de las paredes del volumen de control; respecto a los términos de la derecha del signo igual, el primero es un término que representa la difusión de la variable \mathbf{N} , y el segundo mide la adición o sustracción de la variable \mathbf{N} en el volumen de control por medio de fuentes o sumideros, siendo $\mathbf{N}=1$ para la ecuación (5.4), $\mathbf{N}=\mathbf{U}$ para la ecuación (5.5) y $\mathbf{N}=\mathbf{e} + \frac{\mathbf{U}^2}{2}$ para la ecuación (5.6).

Por lo que la técnica numérica de los volúmenes finitos consiste en expresar el comportamiento de las variables de las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6) bajo la forma de la ecuación (5.7), para luego integrarlas en los múltiples volúmenes del espacio discreto utilizando para hacer las integrales aproximaciones, por ejemplo, de primer orden. El mayor problema de este método reside en que si se toman como variables del problema las tres componentes de velocidad, al escribir las ecuaciones de conservación para cada una de ellas bajo la forma de la ecuación (5.7) la presión no queda desacoplada, lo que obliga a combinar las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento para corregir la presión en cada iteración, empleando algún método del tipo predictor-corrector, hasta que se cumpla la ecuación de continuidad.

5.4. MODELOS DE TURBULENCIA

Todo método numérico presenta dificultades en su aplicación, pues aunque los conceptos teóricos puedan estar claros, la ejecución práctica de tales conceptos discurre indefectiblemente ligada a errores, tanto de discretización como de redondeo. Por lo que el límite más severo en la actualidad para los métodos numéricos de uso en Mecánica de Fluidos reside en la enorme dificultad de reproducir numéricamente los fenómenos turbulentos.

Como es sabido, el movimiento turbulento de un fluido se caracteriza por el movimiento caótico de sus partículas. La velocidad en un punto, \mathbf{U} , ya no es un valor concreto sino un valor

medio al que hay que sumarle una componente aleatoria $\mathbf{U}(x, y, z) = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{fluctuación\ en\ } u, v \text{ y } w$. En el estudio de flujos turbulentos se acepta que las otras variables del fluido (presión, densidad y temperatura), no tienen componente aleatoria más que cuando el número de Mach es alto, $M_\infty \geq 5$, o en situaciones específicas en las que si se debe considerar la fluctuación de las variables termodinámicas.

Al introducir la velocidad como suma de un valor medio y otro aleatorio en las ecuaciones de conservación de masa y de la cantidad de movimiento se obtiene que en la ecuación de conservación de la masa, las variables medias y las aleatorias quedan desacopladas en dos ecuaciones distintas, pero no ocurre lo mismo en las de conservación de la cantidad de movimiento. De este modo, en las mismas ecuaciones de balance de cantidad de movimiento que gobiernan el comportamiento de los valores medios de las componentes de velocidad, aparecen términos dependientes de las velocidades de fluctuación, que alteran en consecuencia la solución de las variables medias. Estos términos dependientes de las componentes de la velocidad de fluctuación se conocen conjuntamente con el nombre de tensor de esfuerzos de Reynolds. Nótese que la introducción de la velocidad de agitación turbulenta en la formulación del problema como un término independiente aumenta en tres el número de variables a determinar, sin haber aumentado en consonancia el número de ecuaciones.

Así pues, para resolver flujos de tipo turbulento se ha de desarrollar alguna expresión adicional que relacione en las ecuaciones los términos dependientes de las velocidades de fluctuación (el tensor de esfuerzos de Reynolds) con las velocidades medias, lo que se denomina en la literatura completar las ecuaciones con un modelo de turbulencia (ecuaciones de cierre). A lo largo de los años se han postulado diversos modelos de turbulencia, algunos de los cuales se detallaran a continuación:

- *Modelos de turbulencia algebraicos*: se basan en la idea de Boussinesq de ligar el tensor de esfuerzos de Reynolds a los gradientes transversales de la velocidad por medio de la introducción del parámetro conocido como viscosidad turbulenta (“Eddy viscosity”). Las ventajas de los modelos algebraicos de turbulencia son su simplicidad, su precisión en la simulación de capas límites turbulentas y la experiencia acumulada a lo largo de los años. Por el contrario tienen, entre otros, el inconveniente de que no existe un valor universal para la viscosidad turbulenta, así como de no poder aplicarse a burbujas de recirculación de flujo. Por consiguiente estos modelos son aceptables siempre y cuando las capas límites se mantengan adheridas.

- *Modelos de una ecuación:* parten de la idea que la viscosidad turbulenta debe ser producida por una magnitud dependiente de la turbulencia (la energía cinética turbulenta, κ) más que por un gradiente de velocidades. Se han obtenido mejores resultados con estos modelos que con los modelos algebraicos en el análisis de flujo en capas límite, aunque esta mejoría solo es ligera y se hace necesaria una segunda ecuación para calcular la disipación de la turbulencia, ε .
- *Modelos de dos ecuaciones:* son los conocidos modelos κ - ε , donde se introduce una segunda ecuación para la disipación turbulenta (aunque en esta segunda ecuación aparecen unas constantes cuyo valor ha de ser fijado en cada problema). A pesar del gran avance que representan estos modelos de turbulencia, en cierta medida presentan los mismos inconvenientes que los otros expuestos anteriormente, pues las constantes que aparecen en la segunda ecuación de cierre no son universales y el concepto de viscosidad turbulenta no describe fielmente las propiedades del tensor de esfuerzos de Reynolds.
- *Modelos de tipo RSM (Reynolds Stress Models):* los modelos anteriores son relativamente precisos en flujos bidimensionales; no obstante, para flujos tridimensionales es necesaria una formulación más compleja del tensor de Reynolds (la viscosidad turbulenta deja de ser una constante y pasa a ser descripta con un tensor).
- *Modelos de tipo LES (Large Eddy Simulation):* en este tipo de modelos de turbulencia se pretende simular numéricamente el comportamiento de los torbellinos de la escala grande. Para ello es preciso reformular la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, reteniendo más términos dependientes del fenómeno de turbulencia, distinguiéndose entre escalas de turbulencia simuladas y modeladas. Estos modelos tienen el inconveniente de que para poder recoger las escalas turbulentas que han de ser simuladas, se precisan mallas de trabajo mucho más finas que las empleadas en otros métodos, por lo que consumen mayores recursos de computación.
- *Modelos de simulación directa de la turbulencia:* este tipo de modelos constituye la aproximación más exacta a la turbulencia para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Precisan mallas muy finas, pues se pretende simular la turbulencia de menor escala, por lo que son necesarios recursos de computación enormes. Hasta la fecha estos modelos

solo se han podido aplicar a flujos turbulentos con números de Reynolds a lo sumo en torno a 200. Esto hace que los métodos de simulación directa de la turbulencia estén todavía lejos de las aplicaciones de la ingeniería.

Como ejemplo, en la *Figura N° 5.1* se comparan la aplicación de diferentes modelos de turbulencia al cálculo de velocidades alrededor de un prisma de sección cuadrada. Obsérvese que, como se ha dicho con el modelo *LES* se obtienen resultados en la estela más ajustados al comportamiento real que con el modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$.

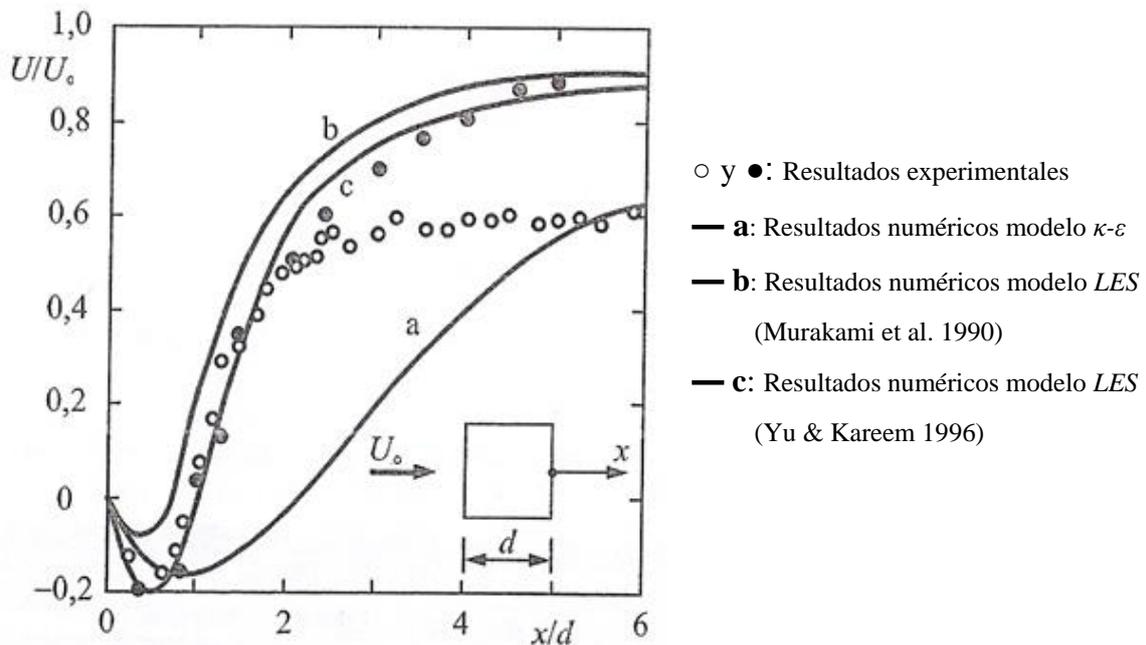


Figura 5.1: Comparación de modelos de turbulencia en función de la velocidad y dimensión del obstáculo. (Aerodinámica de Inst. Aeroportuarias, Meseguer Ruiz et al. 2000)

En la *Figura 5.1* se puede visualizar la variación a lo largo del eje de simetría, x , del cociente U/U_0 entre la velocidad local U , y la velocidad de la corriente incidente no perturbada, U_0 , en el caso de un obstáculo bidimensional de sección cuadrada de lado d , con una de sus caras orientadas perpendicularmente al viento. Los círculos representan los resultados experimentales según diversas fuentes y las líneas resultados numéricos obtenidos con distintos modelos de turbulencia: modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$ la curva a, y modelos *LES*, las curvas b (Murakami et al 1990) y c (Yu & Kareem 1996).

5.5. CASOS DE VALIDACIÓN

Se presenta como caso de validación, un modelo 2D simulado con el software de cálculo ANSYS 18 Versión Académica. Se trata de un cilindro de radio r en régimen proscritico, ejemplo difundido en la bibliografía básica de mecánica de fluidos.

Se utilizó el modelo físico de flujo turbulento κ - ε , donde la viscosidad vorticiosa se modela como proporcional a la energía cinética turbulenta (κ) al cuadrado e inversamente proporcional a la disipación de la misma (ε):

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (5.8)$$

donde C_μ es una constante empírica.

Además como mencionamos anteriormente en este capítulo, se agregan las ecuaciones de transporte de las que se desprenden más constantes empíricas, σ_κ , σ_ε , C_1 , C_2 , cuyos valores dependen del caso en estudio. Sin embargo, para la mayoría de los casos se pueden utilizar los siguientes valores:

CONSTANTE	VALOR
C_μ	0,09
σ_κ	1,00
σ_ε	1,30
C_1	1,44
C_2	1,92

5.5.1. CONDICIONES DE CONTORNO

Se usaron los parámetros I y t para la caracterización del flujo. Como se mencionó en el Capítulo 4, el parámetro I mide la relación entre la velocidad de perturbación y la velocidad media de la entrada y se supone que esta variación es la misma en las tres direcciones coordenadas:

$$I = \frac{u}{U} = \frac{v}{V} = \frac{w}{W} \quad (5.9)$$

Por lo que la energía cinética turbulenta a la entrada, K_{entrada} , queda establecida como:

$$K_{entrada} = \frac{1}{2}[(I.U)^2 + (I.V)^2 + (I.W)^2] \quad (5.10)$$

Por su parte, el valor de la disipación de turbulencia de entrada, $\epsilon_{entrada}$, se ajusta como:

$$\epsilon_{entrada} = C_{\mu} \frac{K_{entrada}^{1.5}}{\delta s} \quad (5.11)$$

siendo C_{μ} la constante descrita anteriormente e igual a 0.09 y δs una escala de longitudes que se ajusta en función de las dimensiones de la entrada de la siguiente forma:

$$\delta s = t \cdot l_e \quad (5.12)$$

donde t es el parámetro que ajusta el usuario y l_e es el tamaño de la entrada.

Este caso 2D se desarrolla en régimen pos crítico, siendo $4,5 \times 10^5$ su número de Reynolds, 1.5 veces el Re_{crit} para flujo laminar “aguas arriba” del cilindro, dado que el radio del cilindro de de 1m y despejando la velocidad de la ecuación del número de Reynolds, resulta una velocidad de entrada de 5.53m/s. Por lo tanto, se impusieron las siguientes condiciones de contorno: velocidad constante de 5.53m/s, ambos costados libres, presión en la salida y deslizamiento libre sobre el cilindro como se puede ver en la *Figura N° 5.2*. El valor de la constante t se fijó en 0.01, $I=0.05$, $z_0=0m$.

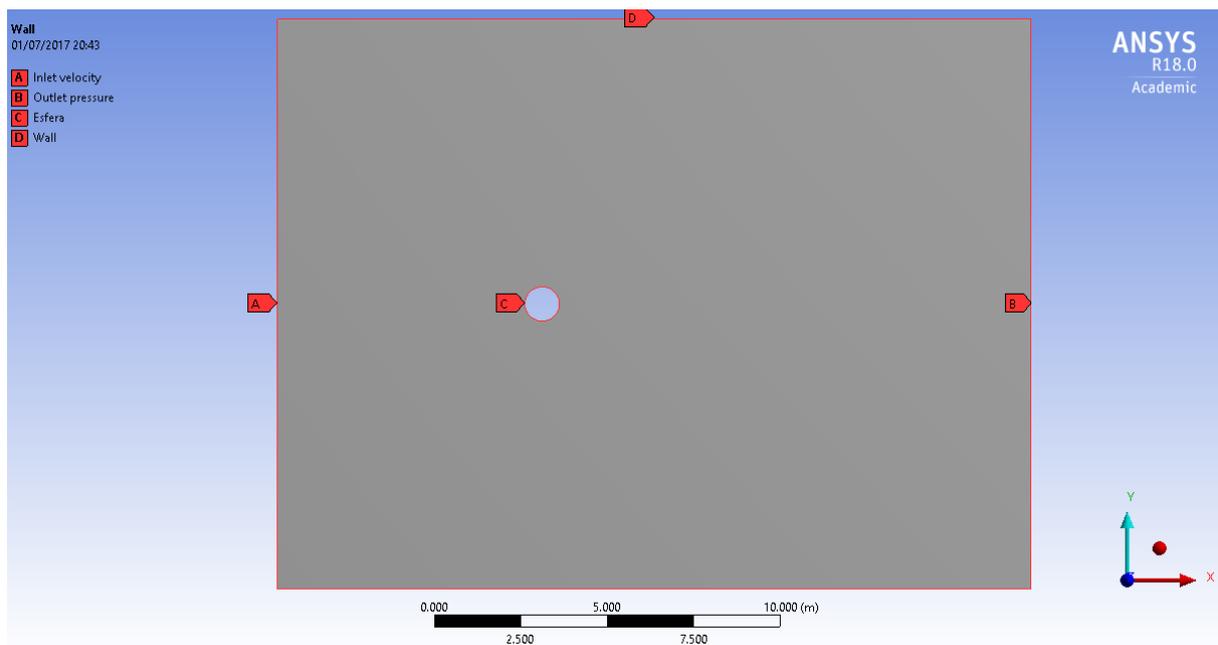


Figura 5.2: Condiciones de contorno impuestas.

5.5.2. MALLADO

Se utilizó un volumen de control rectangular con dimensiones en función del radio del cilindro, medidos desde las paredes del cilindro, 14.3 radios hacia delante, 15.6 radios hacia los costados y 27.3 radios hacia atrás, con tamaño medio de malla de 0.70m y refinamiento de la misma en las proximidades del cilindro, contando con 1784 elementos y 1874 nodos en la *Figura N° 5.3* se puede ver el refinamiento de la malla al acercarse al cilindro.

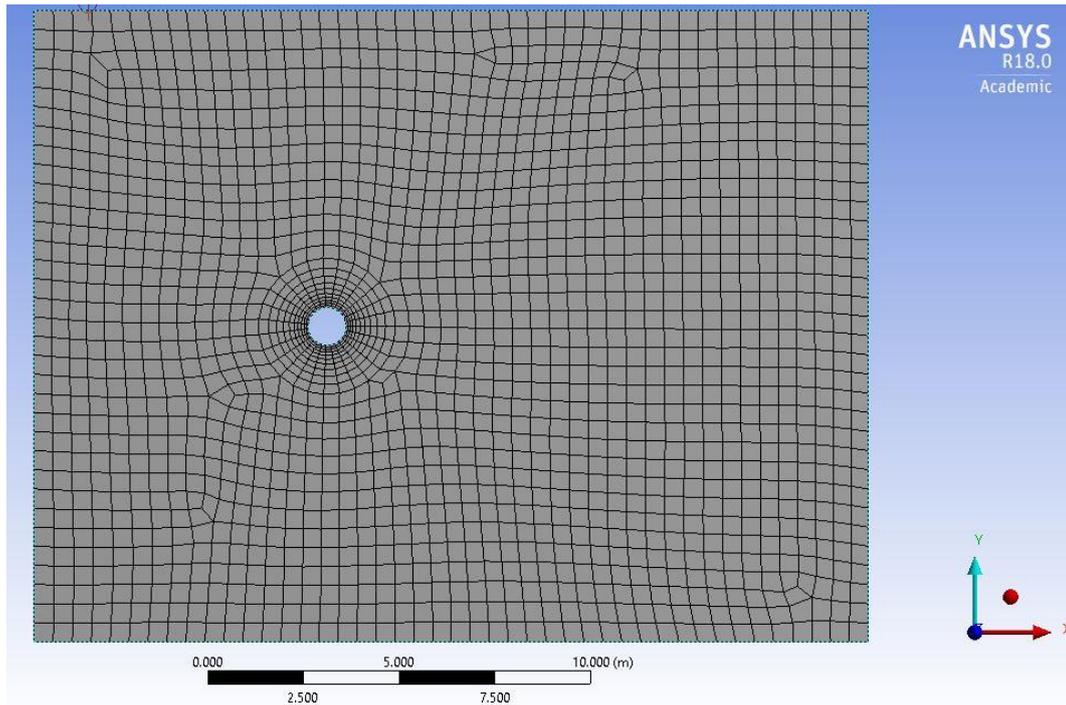


Figura 5.3: Malla utilizada.

Se utilizó un refinamiento de malla por First Layer Thickness, esto controla el espesor del primer elemento de la capa límite, que está relacionado con el parámetro y^+ , mencionado en el capítulo 4, ecuación (4.31). Este parámetro debe encontrarse entre 35 y 350 para el modelo de turbulencia κ - ϵ , esto garantiza que la simulación sea correcta, es decir que en las proximidades de las paredes del obstáculo las velocidades y las presiones estén bien estimadas, lo cual se refleja en la curva de C_p . Para ello se adoptó un primer espesor de 0,01m. Si el parámetro y^+ se encuentra fuera de estos límites la curva de C_p se despega de la curva teórica turbulenta, lo cual resultaría en una aproximación deficiente.

5.5.3. RESULTADOS CILINDRO

En la *Figura N° 5.4* se presentan los resultados de la validación comparados con los resultados de la teoría descrita en la *Figura 4.5* del Capítulo 4 de esta tesis, esta figura muestra la distribución de C_p en función del ángulo medido desde el punto de estancamiento (Tita). Se puede ver como la simulación numérica del cilindro 2D, realizada con la versión académica de Ansys 18, se ajusta a la curva de la bibliografía, validando el comportamiento del modelo utilizado.

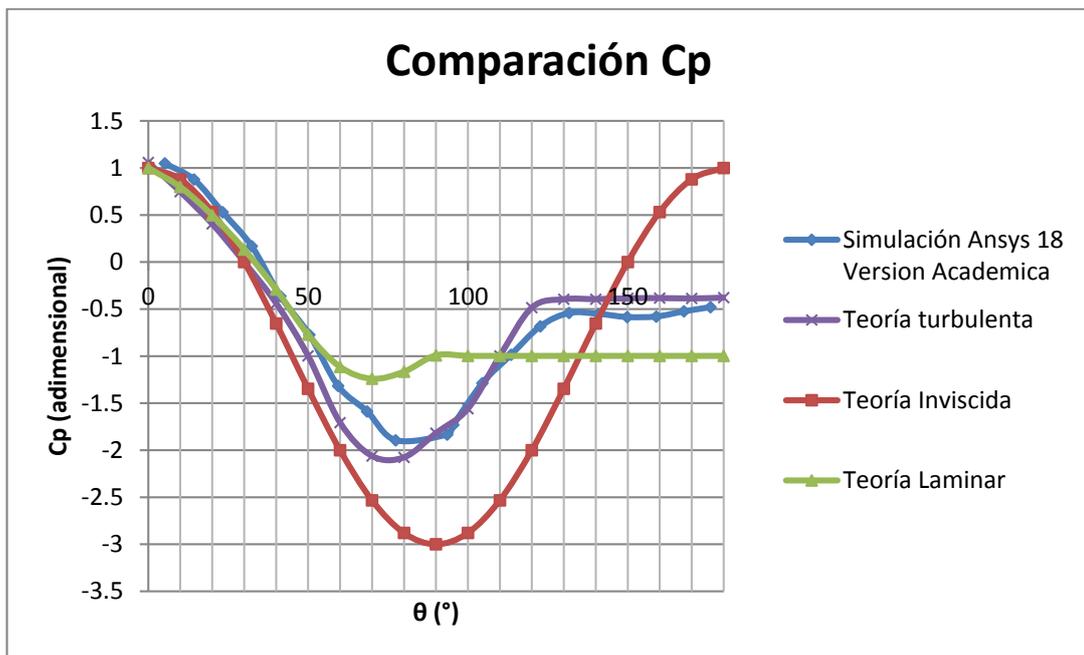


Figura 5.4: Distribución de presiones obtenida con Ansys 18 Versión Académica.

CAPÍTULO 6

CASOS DE ESTUDIO

6.1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se desarrolla la modelación de los tanques, para obtener la distribución de presiones sobre la superficie de los mismos. El procedimiento de modelación se desarrolló en dos etapas, en primer lugar se realizó la modelación de un tanque con techo cónico aislado. Luego se modelaron 2 tanques donde uno de ellos se encuentra apantallado por el otro en diferentes direcciones. El objetivo es poder observar la influencia que genera el apantallamiento de un tanque sobre el otro en el mapa de presiones sobre la cáscara del mismo comparado con el tanque que se encuentra aislado.

En segundo lugar se realizó la modelación de tanques sin techo. En este caso se buscó obtener la distribución de presiones en el interior y en el exterior. Los resultados experimentales muestran que las presiones totales del lado a barlovento en las paredes del tanque se incrementan debido a las presiones internas. Además, las presiones internas en la base tienden a levantarla, principalmente en la etapa constructiva cuando se encuentra el tanque vacío. Estos dos efectos agravan las cargas de colapso, produciéndose la falla a velocidades de viento bajas y con frecuencia.

El propósito de la modelación computacional es poder validar los resultados obtenidos por CFD con los obtenidos en ensayos de túnel de viento.

6.2. MODELACION COMPUTACIONAL DE TANQUES CON TECHO

6.2.1. Dimensiones de los modelos

Las dimensiones del modelo geométrico corresponden a las mismas que se utilizaron para realizar los ensayos en el túnel aerodinámico de la Universidad Nacional de La Plata (C. Burgos,

2012). El volumen de control tiene las dimensiones del túnel, la sección de prueba tiene 1,4 m de ancho y 1,0 m de altura (resulta en un área transversal de 1,4 m²) y una longitud de 7,2 m.

En la Figura 6.1 se muestran las dimensiones del tanque:

Diámetro del modelo	$D=0,20$ m
Altura del casco	$h= 0,1033$ m
Altura del techo	$h'= 0,0188$ m
Altura total	$H= 0,1221$ m
Pendiente del techo	$\theta= 10,62^\circ$

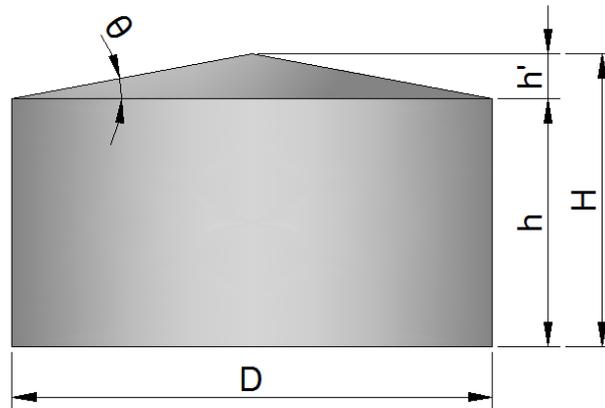


Figura 6.1: Dimensiones del modelo

6.2.2. MODELACIÓN SOBRE TANQUE AISLADO

La primera modelación consistió en simular la acción del viento sobre un tanque que se encuentra expuesto directamente al flujo del viento sin ningún obstáculo en la dirección a barlovento. El tanque se encuentra ubicado en el centro del volumen de control. En primer lugar se definió el dominio en 3D y seguidamente se realizó el mallado del mismo. Para simular la capa límite atmosférica se debe configurar el modelo viscoso y sus parámetros. En este caso se utilizó el modelo k- ϵ estándar y los parámetros que se encuentran por defecto en el software. Luego se definieron las características del aire especificando la densidad y la viscosidad del mismo. Finalmente se fijaron las condiciones de borde para cada superficie del modelo.

El proceso de modelación se puede resumir en los siguientes pasos:

- Definición de la Geometría
- Creación de la malla
- Configuración del problema

- d. Solución del problema
- e. Resultados

a. Definición de la Geometría

En primer lugar se creó el modelo geométrico del dominio, el mismo puede ser generado a partir del mismo software o importado. En este caso el modelo se generó en AutoCad (exportado en formato “.iges”), y luego fue importado desde FLUENT para realizar la modelación. A continuación se muestran imágenes del modelo utilizado para el tanque aislado:

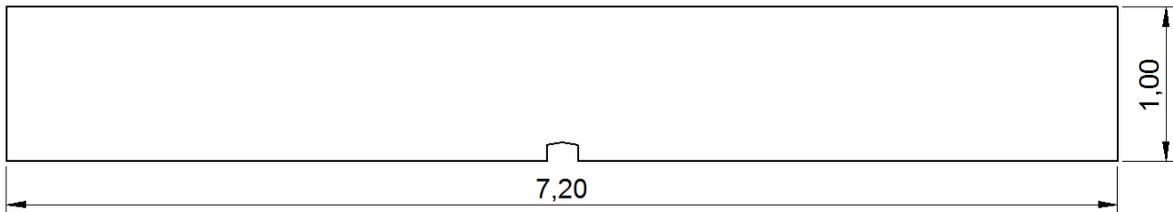


Figura 6.2: Vista Lateral

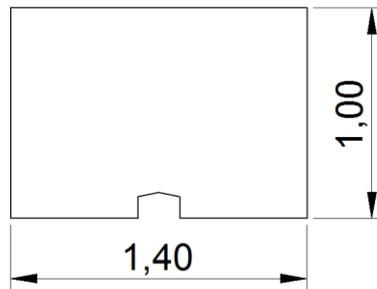


Figura 6.3: Vista Frontal

ANSYS
R18.0
Academic

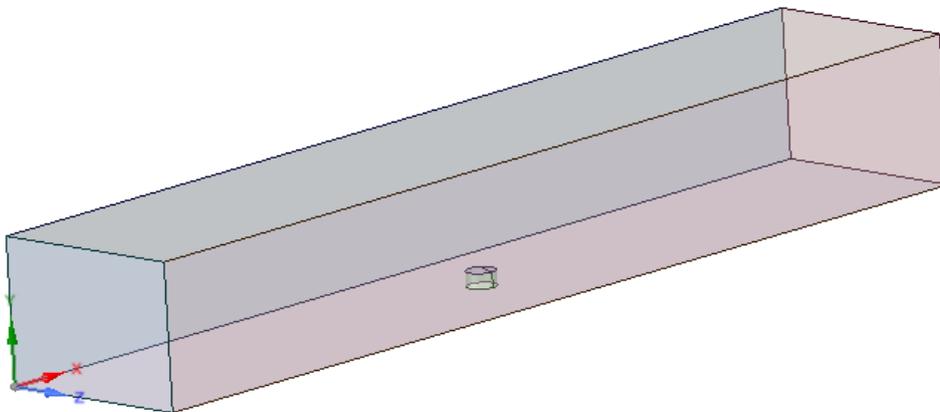


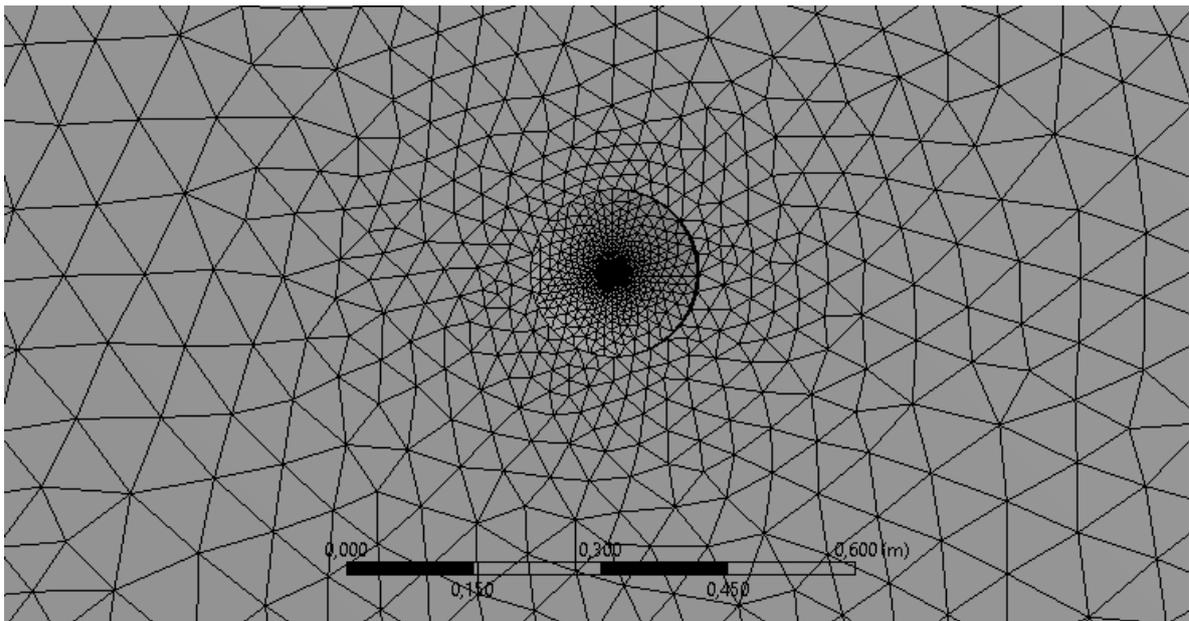
Figura 6.4: Modelo 3D

b. Creación de la Malla

Una vez creado el modelo 3D se procedió a generar la malla de volúmenes finitos que se empleó en la discretización espacial del problema, esto se realizó con herramientas propias del software. La malla está formada por tetraedros.

La exactitud de la solución dependerá del tamaño de los elementos que definen la malla, obteniéndose mejores resultados para tamaños más pequeños de los elementos. Debido a que el software presenta limitaciones en cuanto a cantidad de nodos y elementos de la malla, por ser una versión Académica, se logró llevar el refinamiento de la malla hasta el valor límite haciendo que en las zonas donde los gradientes de las variables son elevados los elementos sean mucho menores que en el resto del dominio.

Por último se definieron las diferentes superficies que componen el modelo para luego poder establecer las condiciones de borde para cada una de ellas. En la Figura 6.4 (a) se muestra un acercamiento a la zona cerca del tanque. Se puede observar cómo el tamaño de los elementos de la malla se reduce de forma progresiva. En la Figura 6.4 (b) se observa la malla del volumen. Se obtuvieron una cantidad de 163.823 elementos y 30.951 nodos.



(a)

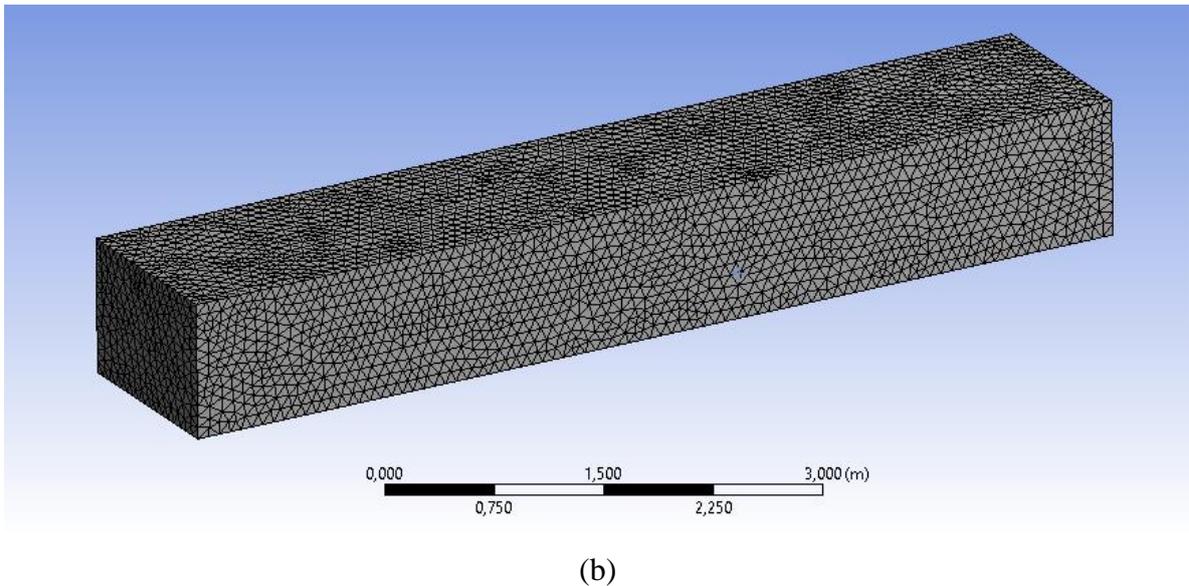


Figura 6.4: (a) Vista de la malla alrededor del tanque. (b) Vista del volumen total.

Las diferentes superficies creadas fueron las siguientes:

1. Velocity inlet: para la superficie de entrada (normal del viento).
2. Pressure outlet: corresponde a la superficie de salida del flujo del viento (cara opuesta a la superficie Velocity inlet)
3. Suelo: superficie inferior del modelo sobre la que se apoya el tanque.
4. Techo: superficie superior del volumen de control.
5. Pared izquierda/derecha: superficies laterales del túnel de viento.
6. Tanque: superficie correspondiente al tanque, incluye la pared cilíndrica y el techo cónico del mismo.

c. Configuración del Problema

Una vez creada la malla se procedió a configurar el modelo de turbulencia y las condiciones de borde necesarias para poder resolver el problema planteado. En la *Figura 6.5* se muestra una imagen del interior del modelo, donde puede observarse el tanque y la malla.

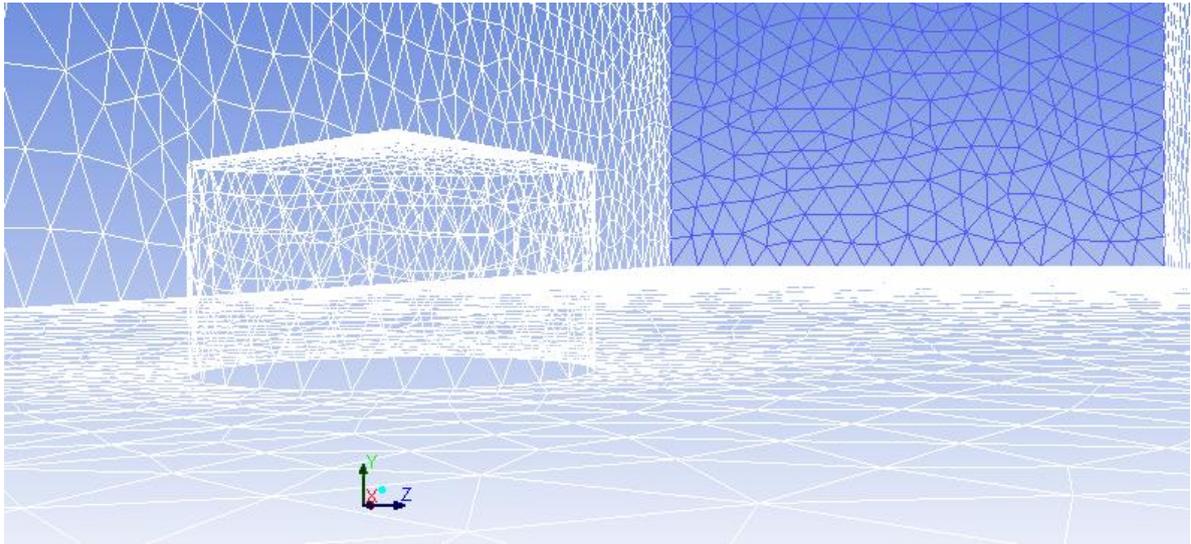


Figura 6.5: Vista Interior del Modelo

Se utilizó el modelo k- ϵ estándar con los coeficientes y constantes definidas en el *Capítulo 5*. En la *Figura 6.6* se muestra una captura de la tabla donde se puede observar el modelo seleccionado y el valor de las constantes que se adoptaron.

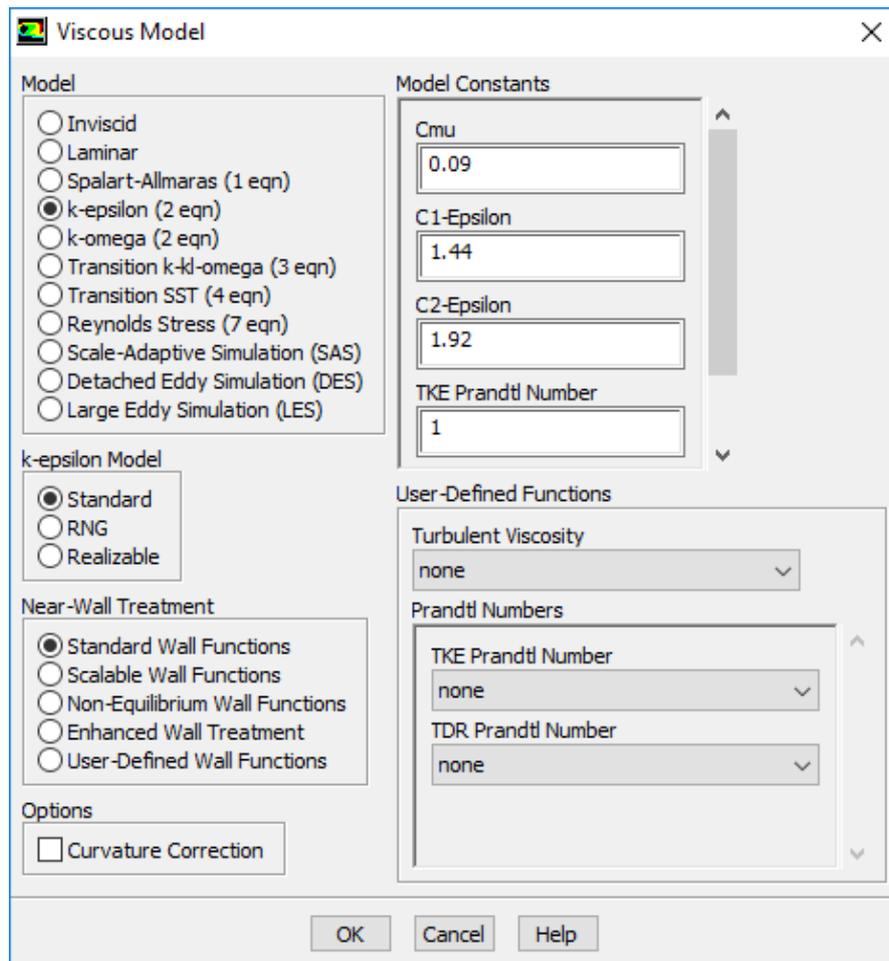


Figura 6.6: Constantes Modelo k- ϵ

Para caracterizar el aire se utilizaron los valores de densidad y viscosidad de Burgos (2012), donde para una altitud de 0 m (Ciudad de La Plata) la densidad del aire ambiente promedio es $\rho = 1,2254 \text{ kg/m}^3$, y la viscosidad es $\mu = 1,7846 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

Para definir las condiciones de borde se identificaron previamente las diferentes superficies que componen el volumen de control para poder asignarles a cada una las condiciones correspondientes. A continuación se resumen las superficies y las condiciones adoptadas:

1. Velocity inlet: Se realizó la modelación para tres velocidades de entrada diferentes,
 - a. $u_1 = 10 \text{ m/s}$
 - b. $u_2 = 14 \text{ m/s}$
 - c. $u_3 = 17 \text{ m/s}$

Como valores de turbulencia se utilizó un 17% de intensidad de turbulencia, y una escala de longitud de turbulencia de 0.07 m

2. Pressure outlet: el tipo de condición de borde utilizado fue *pressure-outlet* y el método especificado *k and Epsilon*.
3. Suelo: el tipo de condición de borde es *Wall*, la altura de rugosidad es 0.0005 m y la constante de rugosidad utilizada es 0.5.
4. Techo, paredes laterales y tanque: se utilizó la condición de borde *Wall*, con una altura de rugosidad de 0.00 m y una constante de rugosidad de 0.5.

d. Solución del Problema y Resultados.

Para comenzar con la solución del problema se debió establecer en la inicialización del mismo que los valores de referencia adoptados son los que corresponden a la condición de borde “velocity_inlet”, ya que a partir de estos valores son calculados los parámetros k y ϵ . Por último se indicó la cantidad de iteraciones máxima que realizó el software para que llegue a la solución del problema. Para asegurar la convergencia del modelo, se estableció inicialmente, una cantidad de iteraciones de 300, llegando a la solución luego de alrededor de 190 iteraciones.

6.2.2.1. Perfiles de Velocidad

A continuación se presentan los perfiles de velocidad obtenidos a un diámetro de distancia por delante del tanque para tres velocidades de referencia, $u_1=10$ m/s, $u_2=14$ m/s y $u_3=17$ m/s. En primer lugar se muestran los tres perfiles obtenidos de la modelación computacional y luego se comparan con los obtenidos en el túnel de viento:

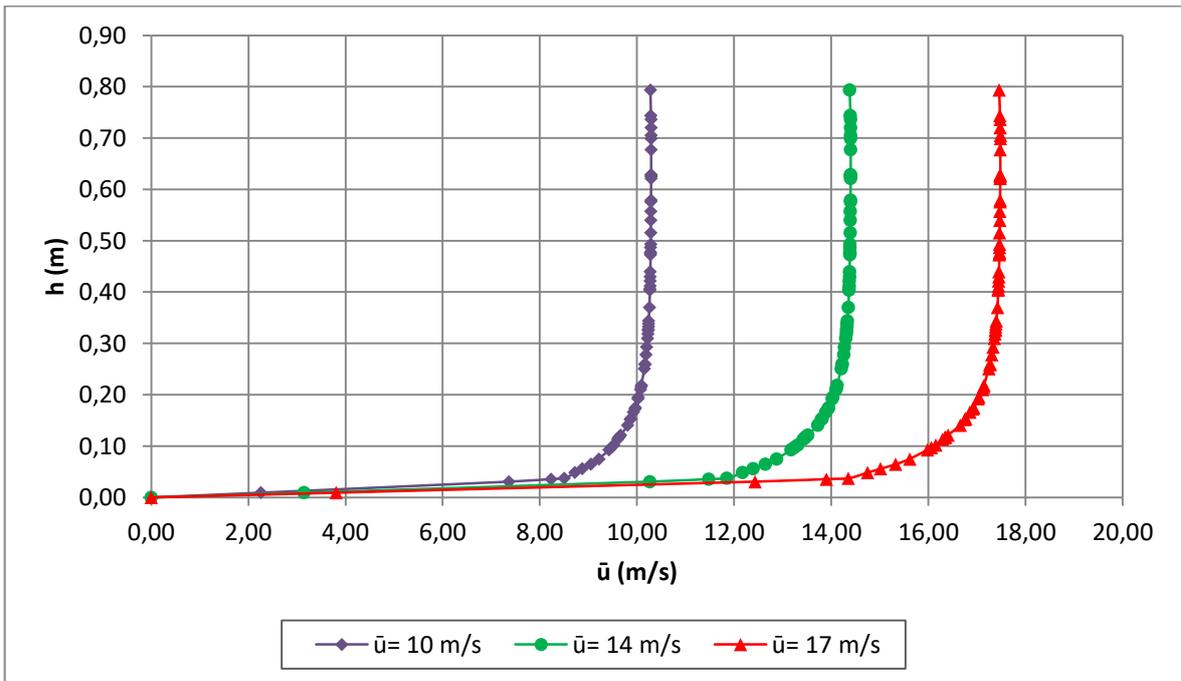
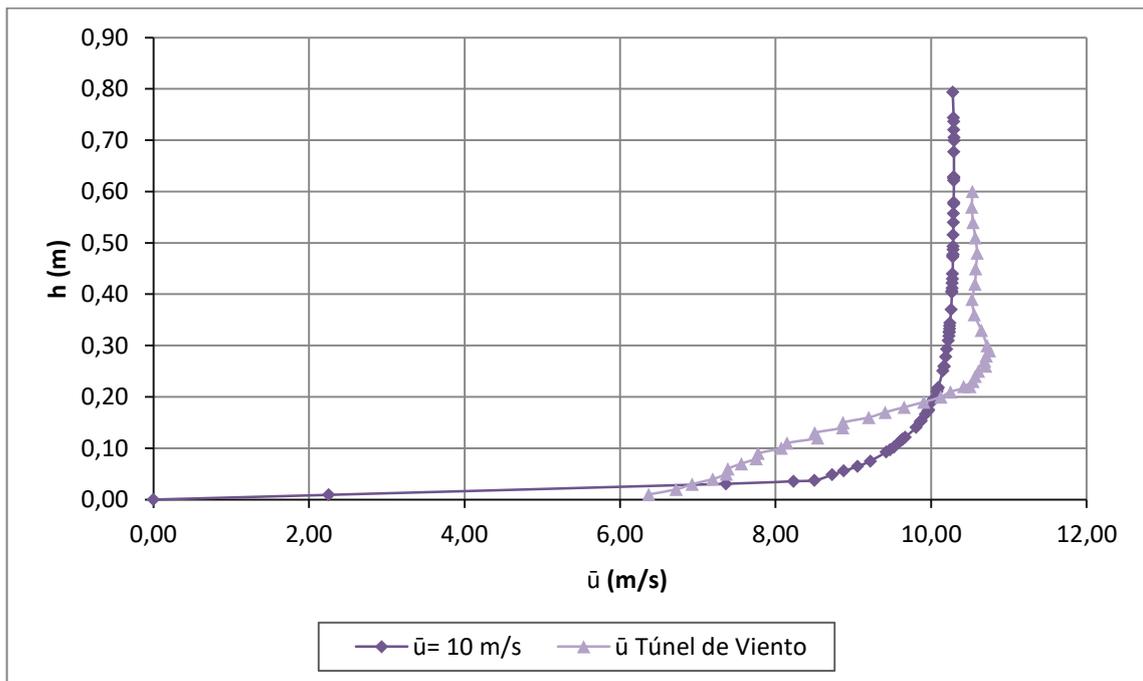
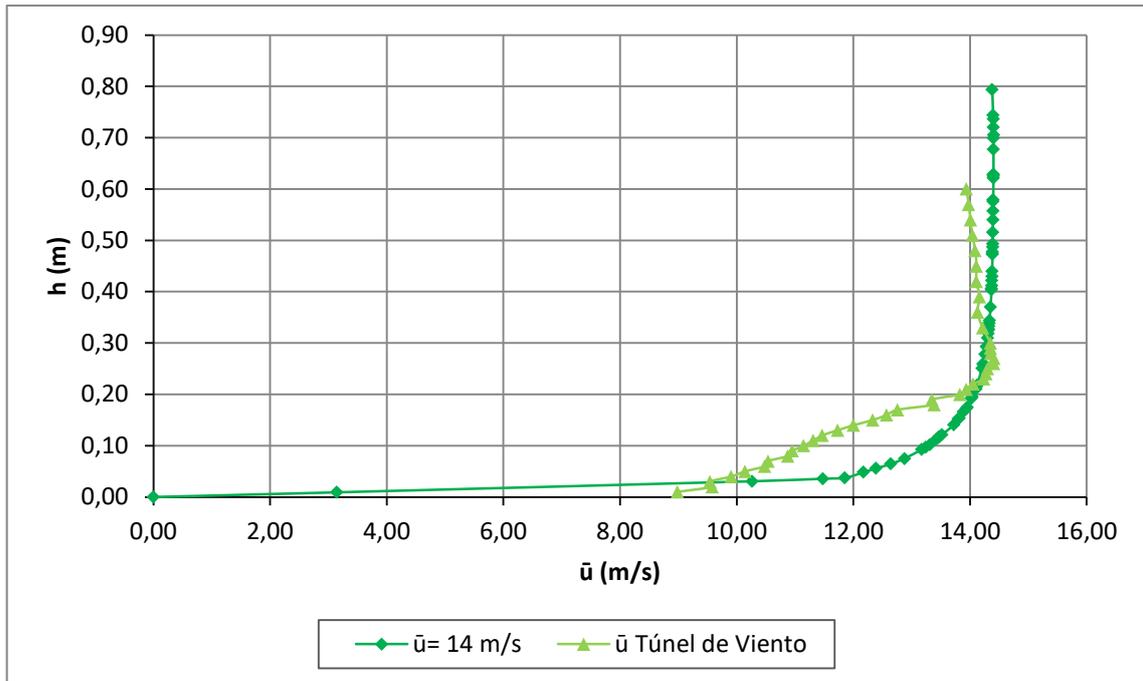


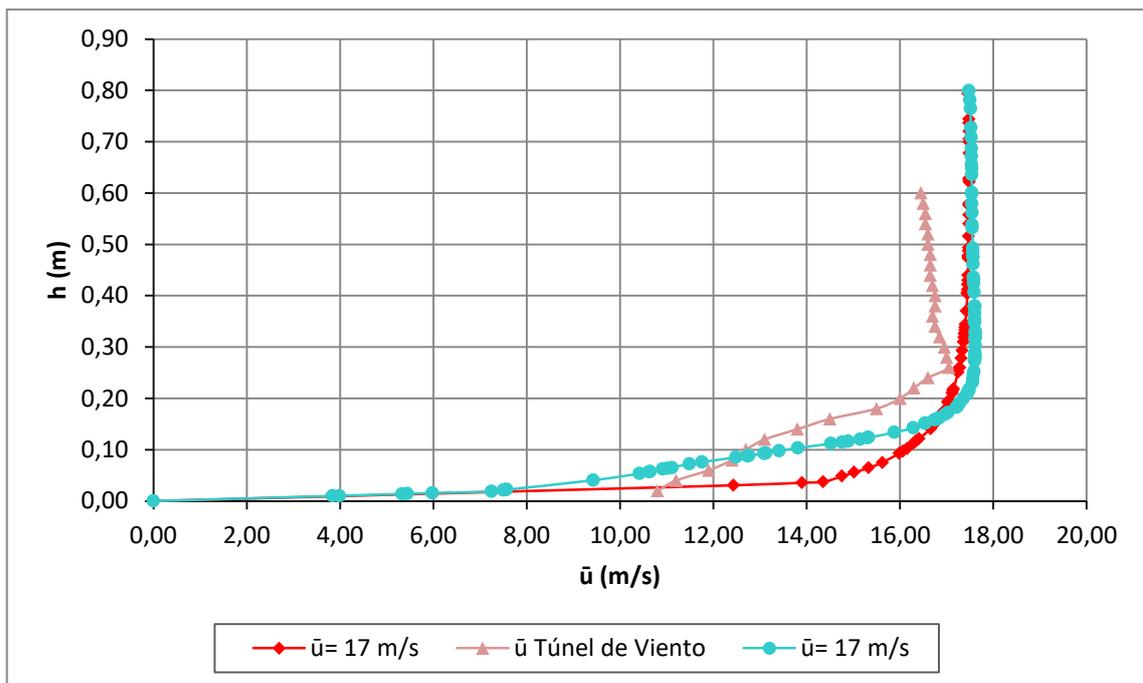
Figura 6.7: Perfiles de velocidad FLUENT



(a)



(b)



(c)

Figura 6.8: Comparación Perfiles de velocidad obtenidos en FLUENT vs. Túnel de Viento. (a) $\bar{u}_1 = 10$ m/s. (b) $\bar{u}_2 = 14$ m/s. (c) $\bar{u}_3 = 17$ m/s

Se puede observar en los perfiles de velocidad de la Figura 6.8 que se logró aproximar a la capa límite atmosférica. Si bien los perfiles obtenidos mediante CFD reproducen de forma aproximada las curvas de los ensayos en túnel de viento, se pueden observar diferencias entre ambas.

En los perfiles obtenidos de los ensayos, en la parte inicial hasta aproximadamente unos 20 cm de altura, se produce una deformación en las curvas, esto puede atribuirse al lugar donde se tomaron las mediciones de la velocidad del aire en el túnel. En la *Figura 6.8 (c)*, con $\bar{u} = 17$ m/s se representó una tercera curva en color turquesa, la misma corresponde a un perfil de velocidades medido cerca del tanque donde se observa el mismo efecto que en la curva obtenida empíricamente, mientras que el perfil de color rojo se obtuvo a una distancia de un diámetro del tanque. Por lo tanto al acercarnos al tanque, el perfil de velocidades se ve afectado por la presencia del obstáculo. A pesar de las diferencias que se observaron en los resultados obtenidos, los perfiles muestran de forma satisfactoria el comportamiento de la capa límite.

6.2.2.2. Coeficientes de Presión Para Tanque Aislado

Para la obtención de los coeficientes de presión en el tanque se adoptó una velocidad de referencia igual a 16.02 m/s que corresponde a la altura 9.49 cm, próxima al borde superior del casco del tanque obtenida de la curva de 17 m/s.

La *Figura 6.9* muestra la evolución del coeficiente de presión para tres niveles del cilindro del modelo para la velocidad de referencia de 16.02 m/s ($Re = 2.20 \times 10^5$).

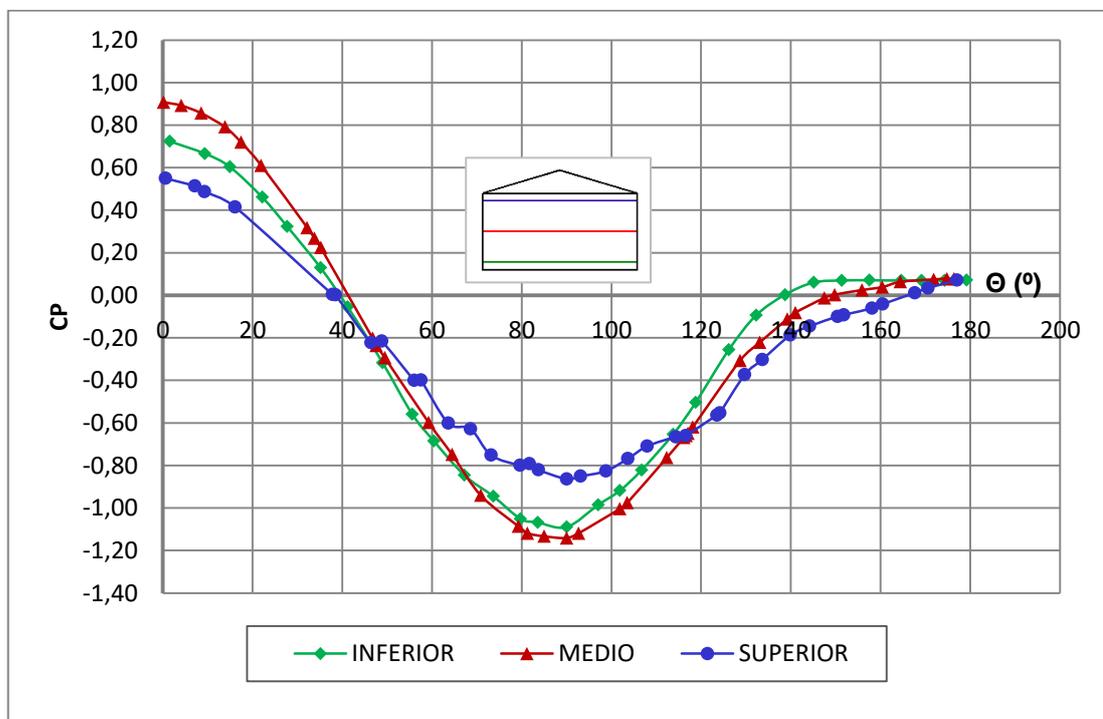


Figura 6.9: Comparación Variación Circunferencial del coeficiente de presión a diferentes niveles para tanque Aislado, $\bar{u} = 16.02$ m/s.

Se puede observar en la *Figura 6.9* que existen variaciones del coeficiente de presión en altura, notándose que los mayores valores (presión) se encuentran en la zona media del tanque en la región a barlovento (0°) y se distribuyen de manera más o menos uniforme en este sector, mientras que los menores valores (succión) se localizan entre los 80° y 100° con respecto al punto de estancamiento (zona media del cilindro). En la *Figura 6.10* se muestra la variación del coeficiente de presión en diferentes regiones del tanque.

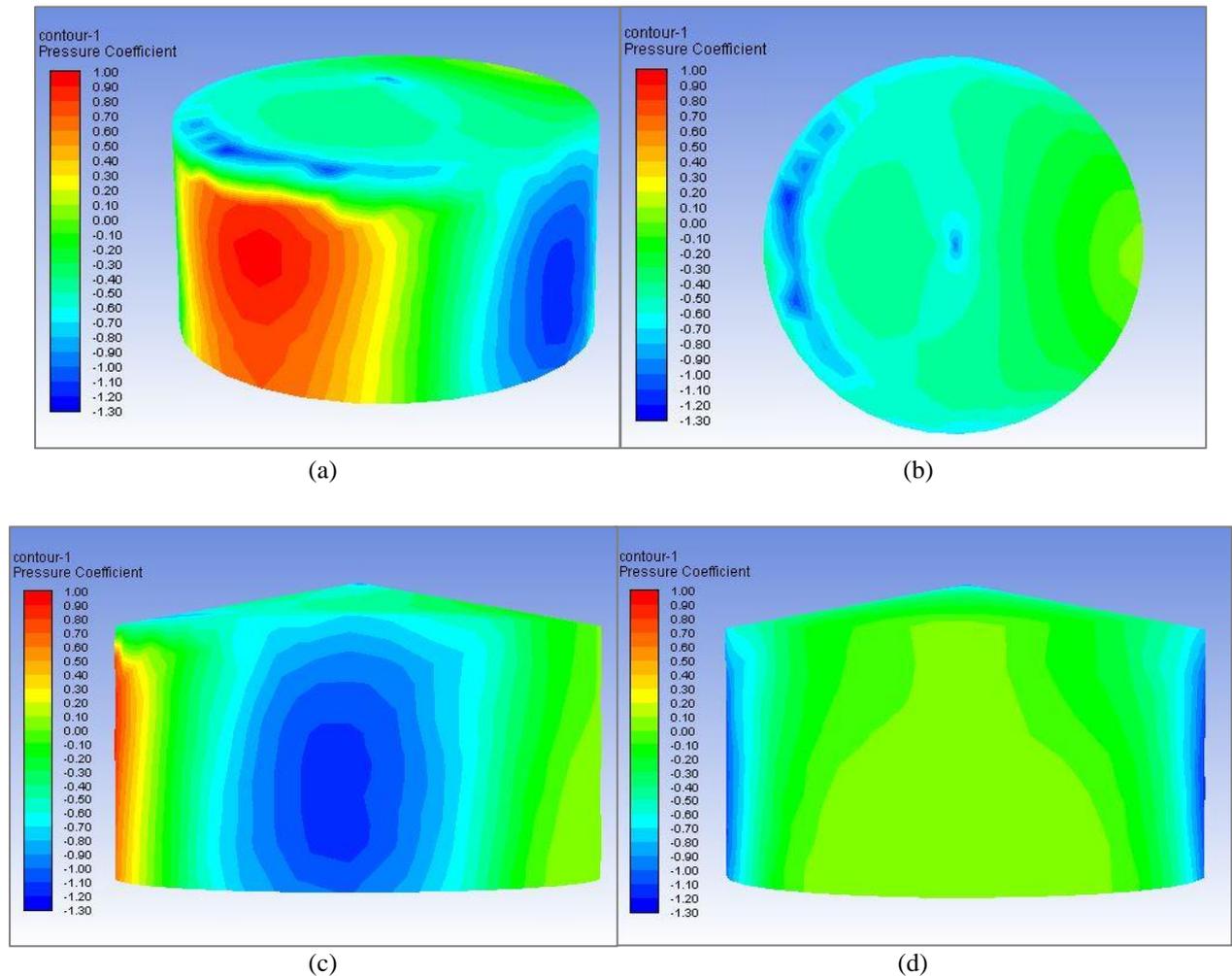


Figura 6.10: Distribución de coeficientes de presión en tanque Aislado, (a) Vista 3D. (b) Vista Techo. (c) Vista Lateral. (d) Vista Sotavento.

6.2.3. MODELACIÓN DE TANQUE APANTALLADO

La segunda etapa de modelación de tanques con techo consistió en modelar un tanque apantallado (tanque en estudio) por otro en diferentes posiciones y así evaluar la influencia que genera el obstáculo en la distribución de presiones sobre la superficie del tanque en estudio.

Se analizaron cinco direcciones diferentes de incidencia para una separación de los tanques de 1 diámetro, $D1= 0^\circ$, $D2= 22.5^\circ$, $D3= 45^\circ$, $D4= 67.5^\circ$ y $D5= 90^\circ$. En la *Figura 6.11* se muestra el modelo geométrico para la dirección $D1$, y en la *Figura 6.12* se pueden ver las diferentes configuraciones de los tanques para todas las direcciones.

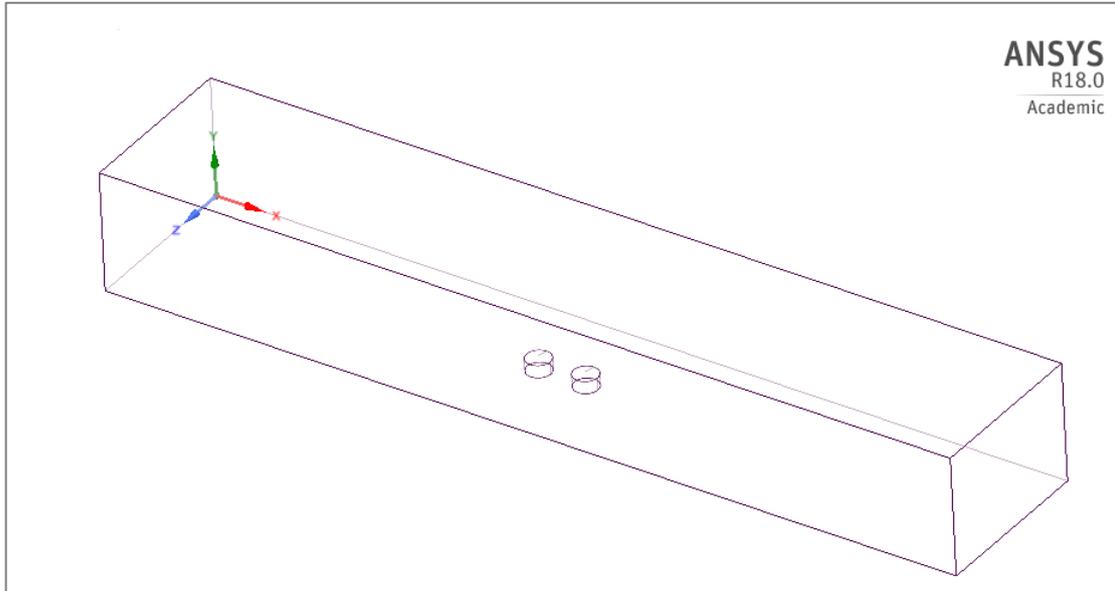


Figura 6.11: Modelo geométrico Tanque Apantallado.

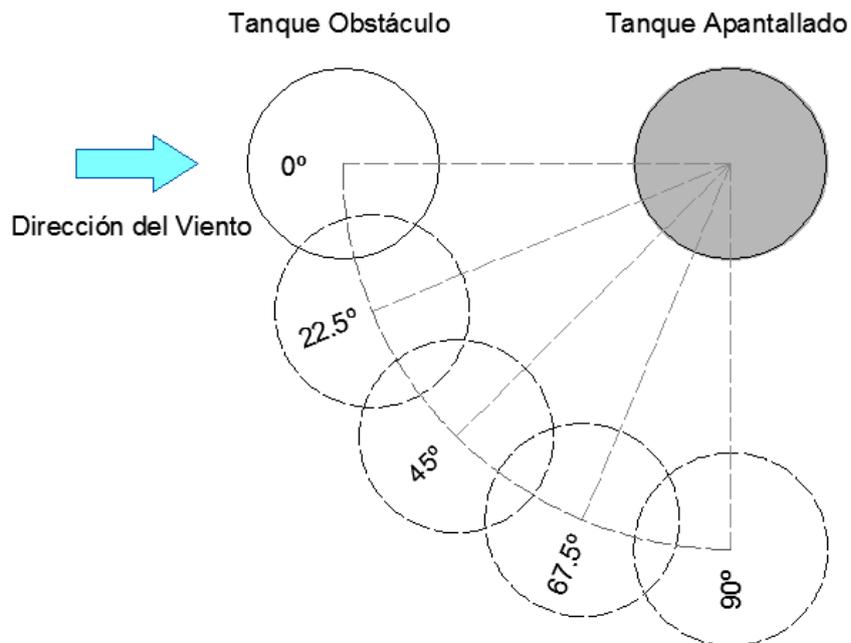
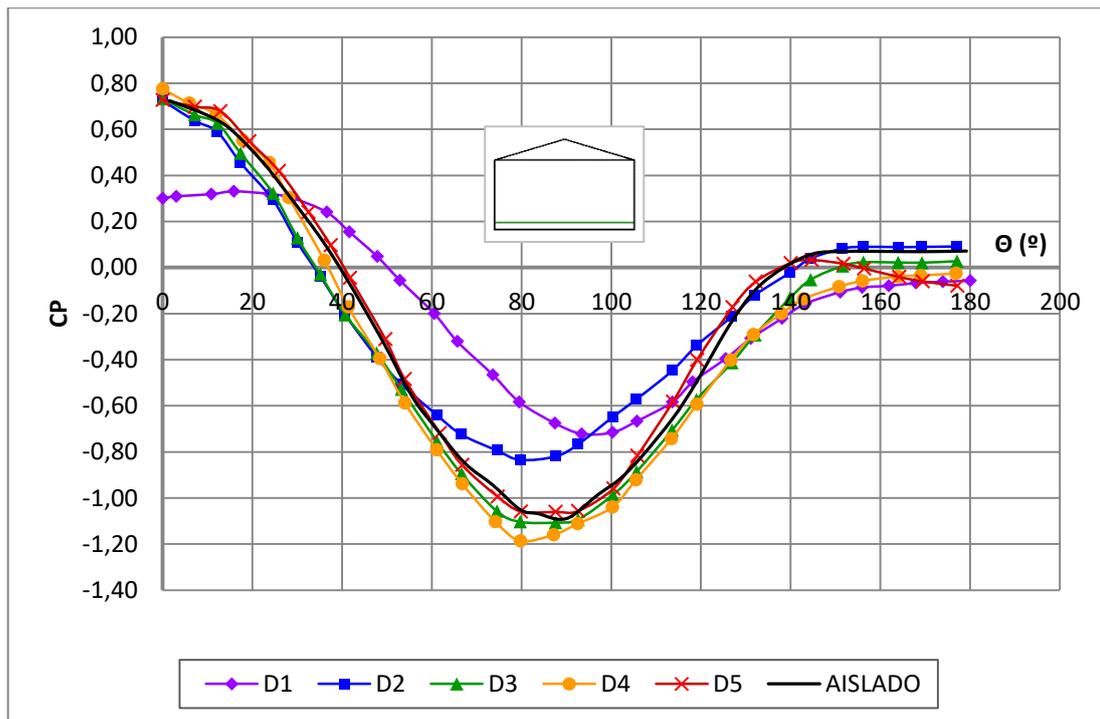


Figura 6.12: Posiciones del tanque que apantalla.

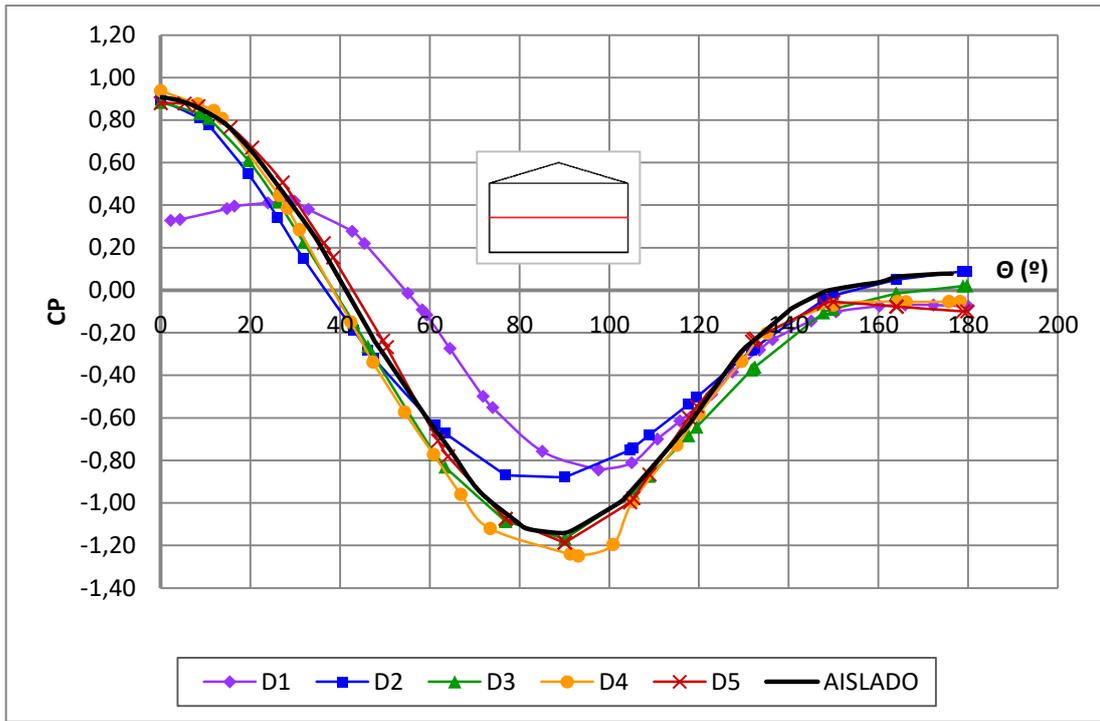
6.2.3.1. Coeficientes de Presión Para Tanque Apantallado

La modelación del tanque apantallado se realizó siguiendo el mismo procedimiento que para el tanque aislado y adoptando las mismas condiciones de borde, utilizando una velocidad de entrada de 16.02 m/s ($Re= 2.20 \times 10^5$).

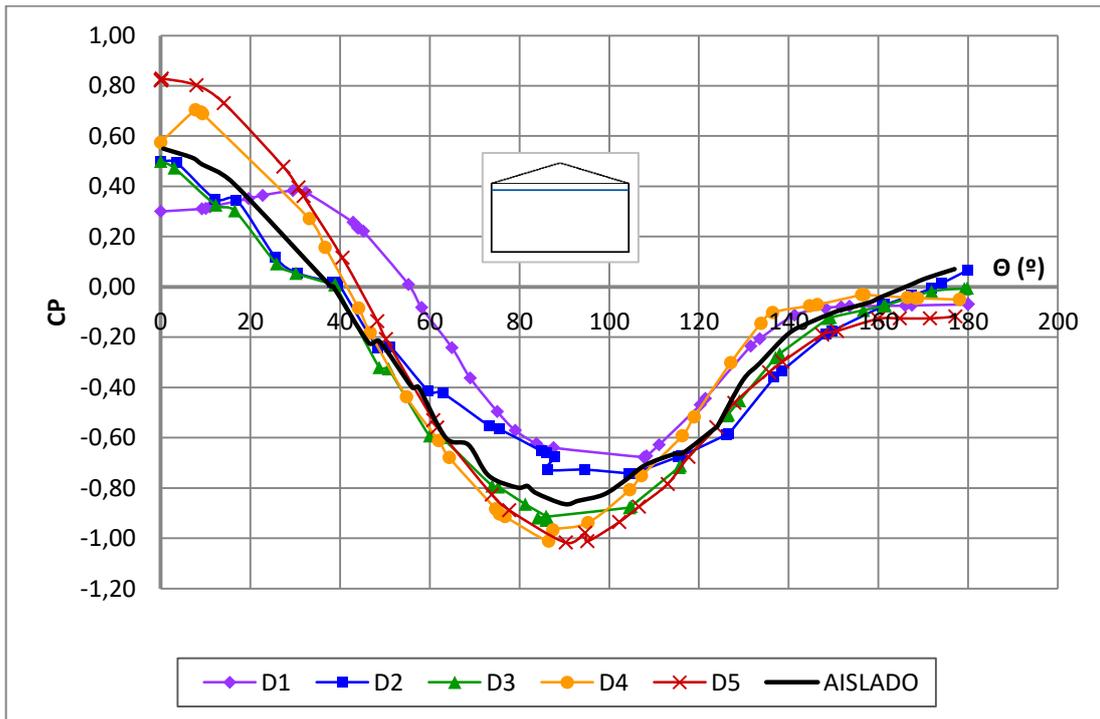
Se obtuvieron los coeficientes de presión para tres diferentes alturas sobre el cilindro del tanque, sobre una circunferencia inferior cerca del suelo, sobre una circunferencia media y sobre una circunferencia cerca del techo. En las Figuras 6.13 (a), (b) y (c), se muestra la variación circunferencial del coeficiente de presión sobre el tanque en estudio para las tres alturas mencionadas y para las diferentes posiciones del otro tanque. En cada gráfico se incluye la curva del coeficiente para tanque aislado.



(a)



(b)



(c)

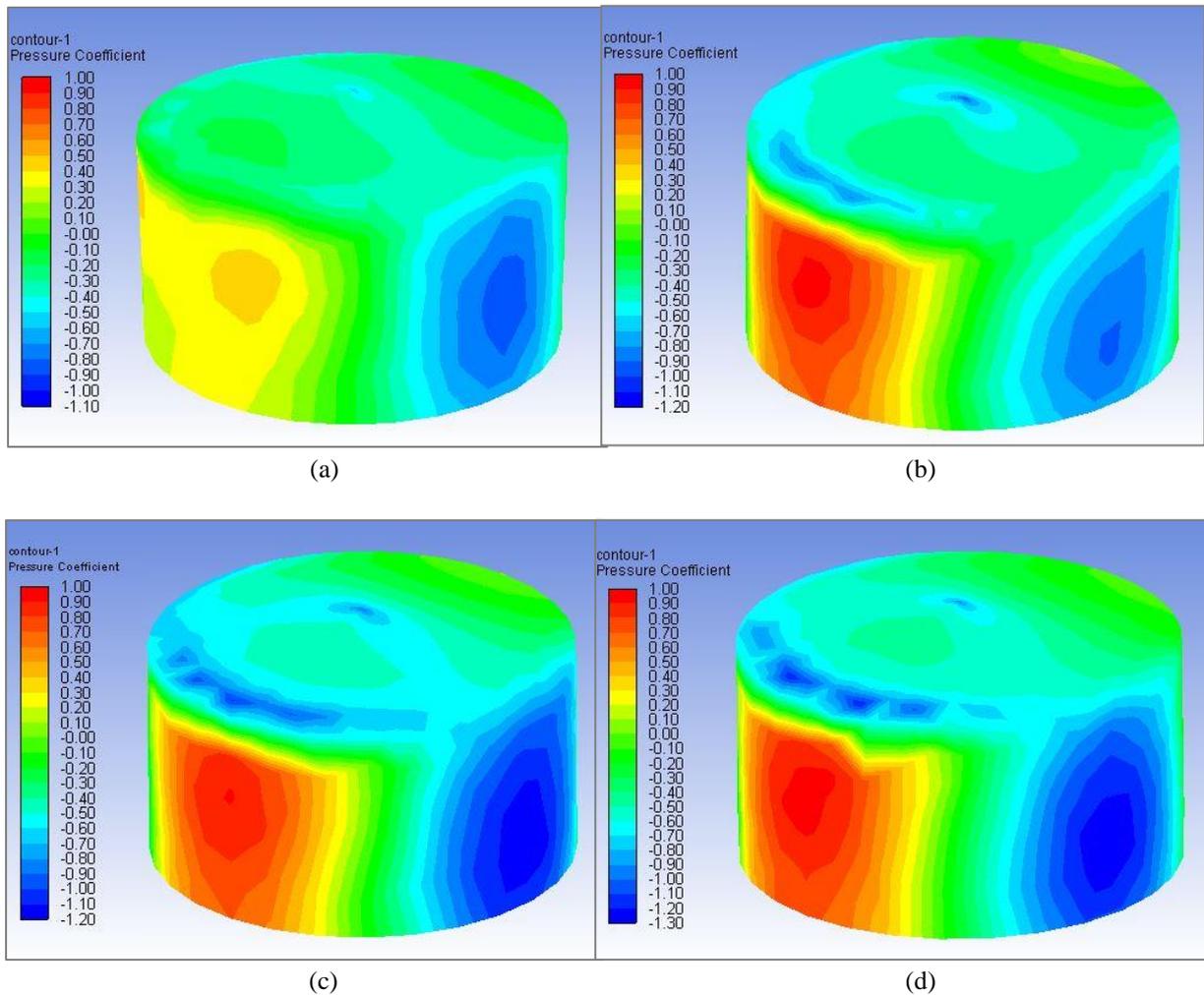
Figura 6.13: Variación circunferencial del coeficiente de presión en el Tanque Apantallado. (a) Nivel Inferior. (b) Nivel Medio. (c) Nivel Superior

En las diferentes curvas las mayores diferencias se observan con la que pertenece a la dirección D1, que corresponde a la orientación en la que el tanque se encuentra directamente apantallado en la dirección del viento y se puede ver que tanto los valores de presión como los de

succión son menores en comparación con los restantes. Esto se debe a que se modifica el flujo del viento, elevándose por la presencia del obstáculo y disminuyendo en consecuencia las presiones en la cara a barlovento que ahora se encuentra protegida de la acción directa del viento. En la cara a barlovento, además se observa una distribución del coeficiente de presión más uniforme en altura que en el resto de las orientaciones y los valores son mayores cerca del techo a diferencia de las restantes donde son mayores en la zona media del tanque.

Los valores del coeficiente de presión que corresponden a presiones de succión aumentan en relación con los valores para tanque aislado en las direcciones D3 (c), D4 (d) y D5 (e).

En la *Figura 6.14* se muestra la distribución de coeficientes de presión sobre el tanque para cada una de las direcciones analizadas y para el tanque aislado (f).



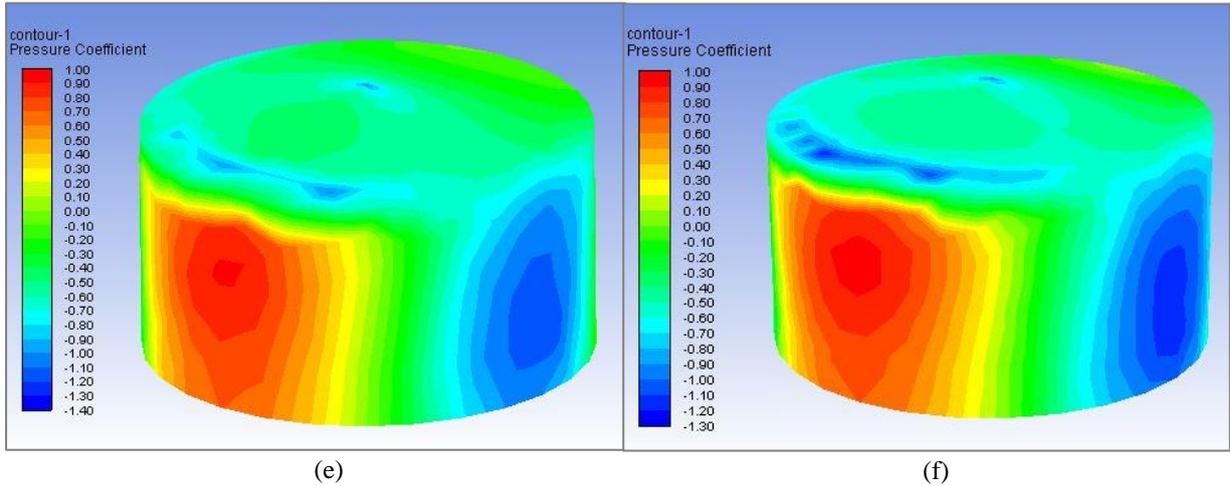
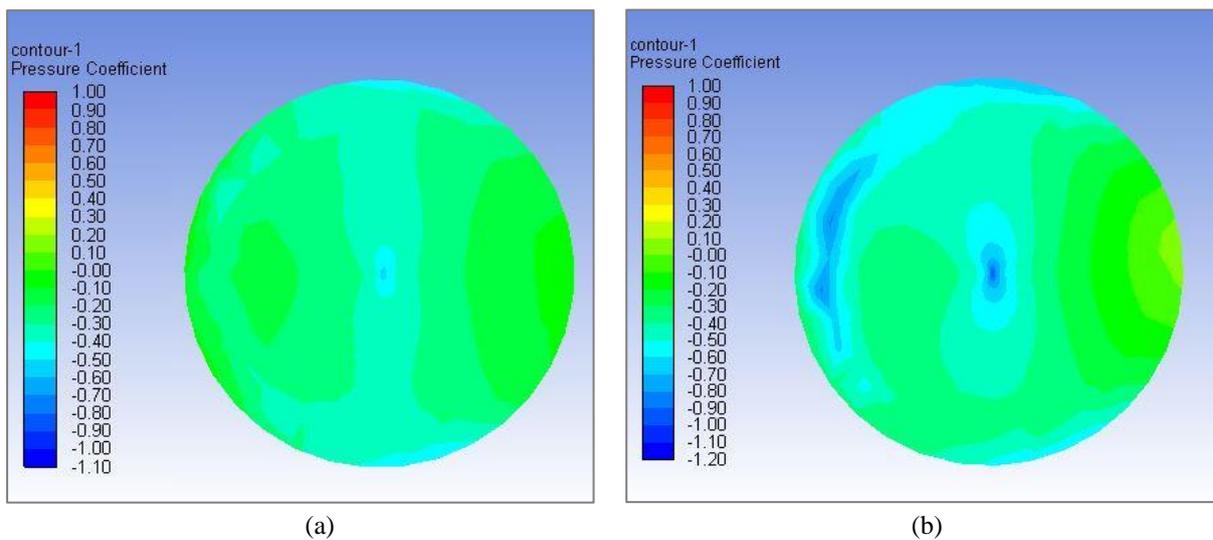


Figura 6.14: Distribución de coeficientes de presión en tanque Apantallado, (a) Vista 3D D1. (b) Vista 3D D2. (c) Vista 3D D3. (d) Vista 3D D4. (e) Vista 3D D5. (f) Vista 3D Aislado.

En la *Figura 6.15* se presentan los coeficientes de presión en el techo del tanque para cada dirección relativa de los tanques. A medida que el tanque pantalla va rotando respecto del tanque en estudio se produce una disminución de la succión en el frente a barlovento, es decir que a medida que aumenta el bloqueo del tanque las presiones son menores. Sin embargo el mapa general de distribución de presiones se mantiene semejante al del tanque aislado.

En el techo se observan las variaciones más notables en la distribución de presiones para la dirección D1, con respecto a la obtenida para tanque aislado.



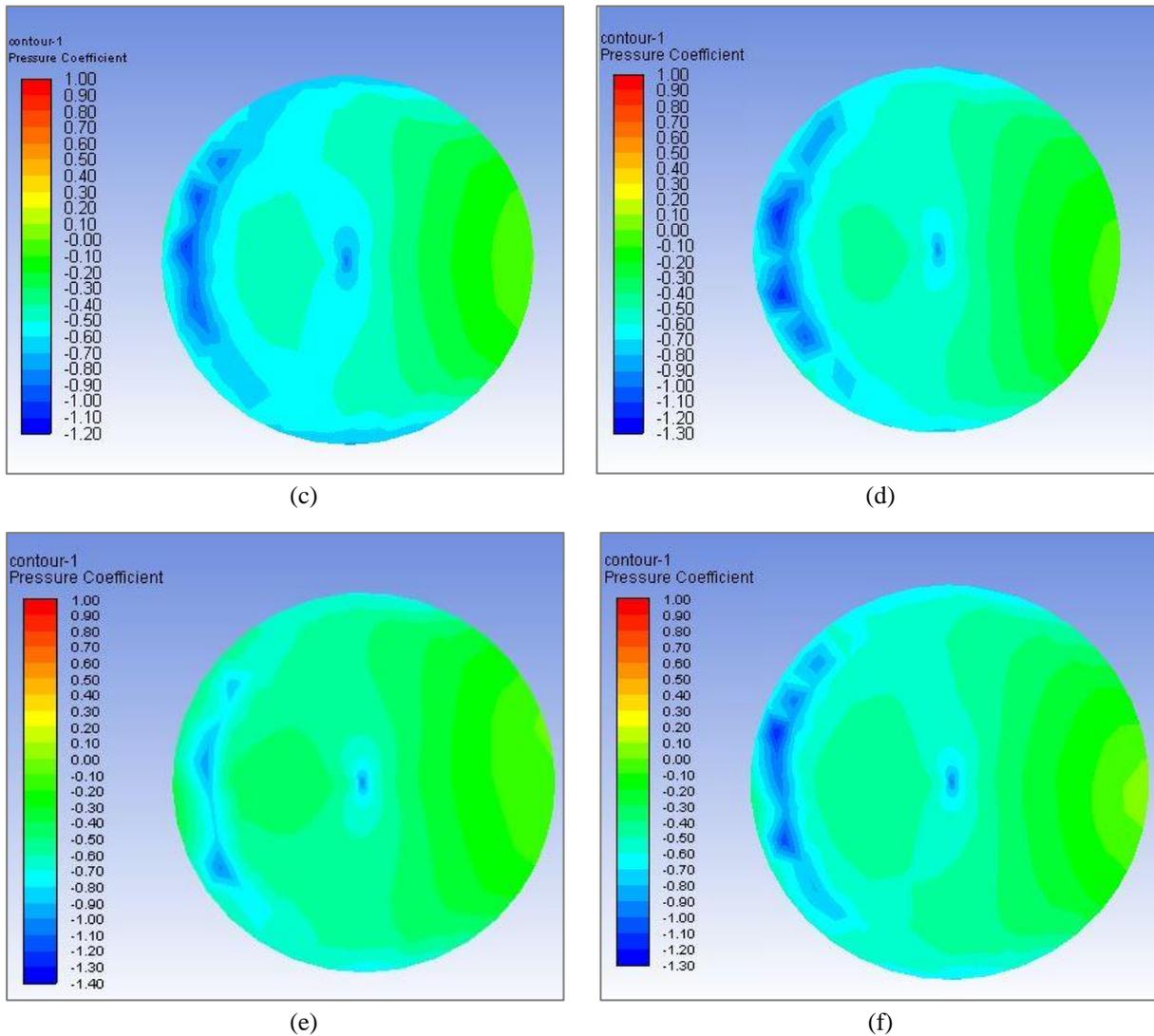


Figura 6.15: Distribución de coeficientes de presión en el techo de tanque Apantallado. (a) Vista 3D D1. (b) Vista 3D D2. (c) Vista 3D D3. (d) Vista 3D D4. (e) Vista 3D D5. (f) Vista 3D Aislado.

6.2.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS AUTORES

Se muestran en la *Figura 6.16* diferentes curvas de la variación circunferencial del coeficiente de presión para tanque aislado. En la zona de estancamiento los valores de los coeficientes de presión son similares, pero a partir de la zona de desprendimiento de la estela se observa una gran variación de los mismos entre las diferentes curvas, sin embargo coinciden en predecir los máximos valores alrededor de los 80° y 90° . En la cara a sotavento también se presenta una apreciable variabilidad de los resultados.

Estas diferencias en los valores de CP en el sector a sotavento no afectan demasiado la evaluación de cargas críticas de pandeo ya que la estabilidad de equilibrio depende

fundamentalmente de los valores positivos de CP a barlovento y del desarrollo circunferencial del sector con compresiones. De esta manera en la evaluación de pandeo en tanques aislados estas diferencias no generan mayores problemas. Sin embargo el hecho de no poder representar las presiones en la estela afecta la evaluación de los CP en el tanque apantallado.

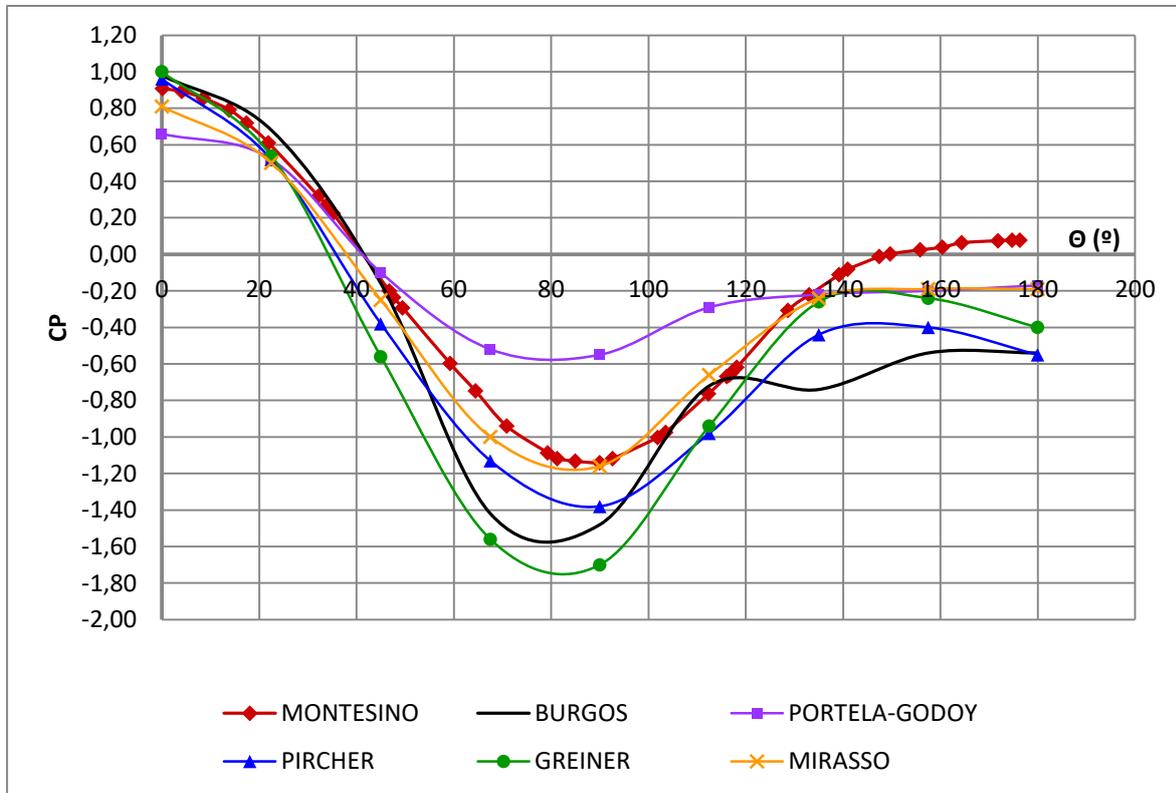


Figura 6.16: Comparación de Variación circunferencial del coeficiente de presión en el Nivel Medio del Tanque Aislado para varios autores.

En las Figuras 6.17 y 6.18 se pueden observar las diferencias entre las curvas obtenidas para tanque apantallado en la modelación y en los ensayos.

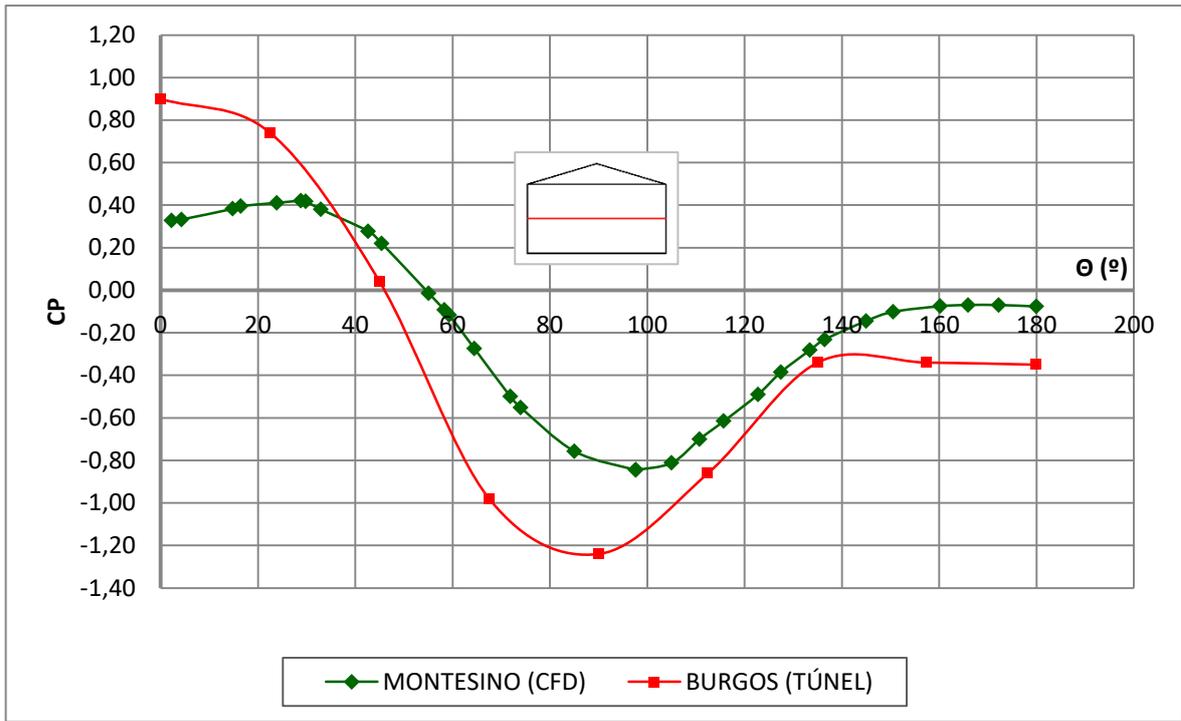


Figura 6.17: Comparación de Variación circunferencial del coeficiente de presión en el Nivel Medio del Tanque Apantallado para la dirección D1 (0°).

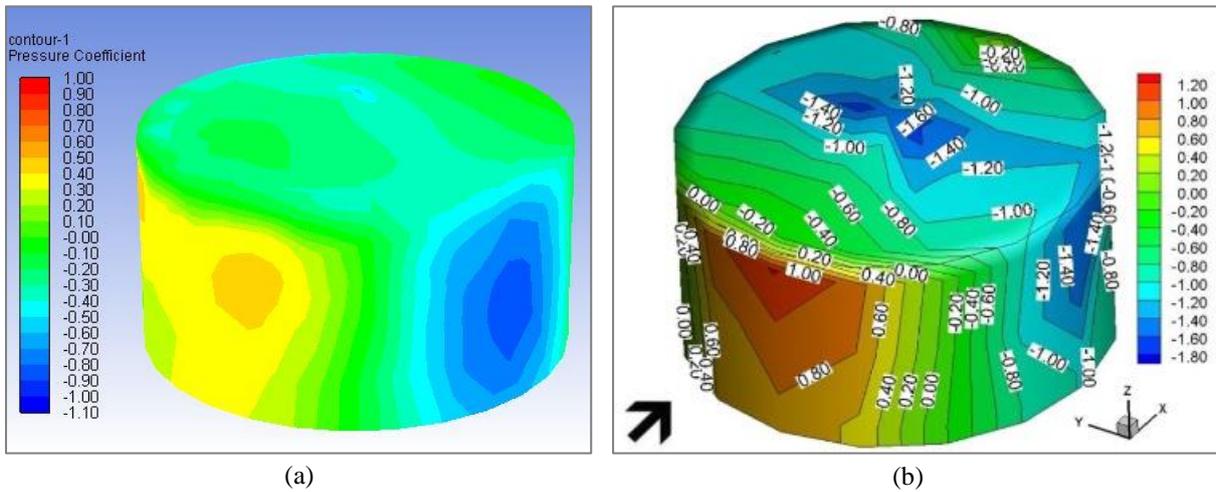
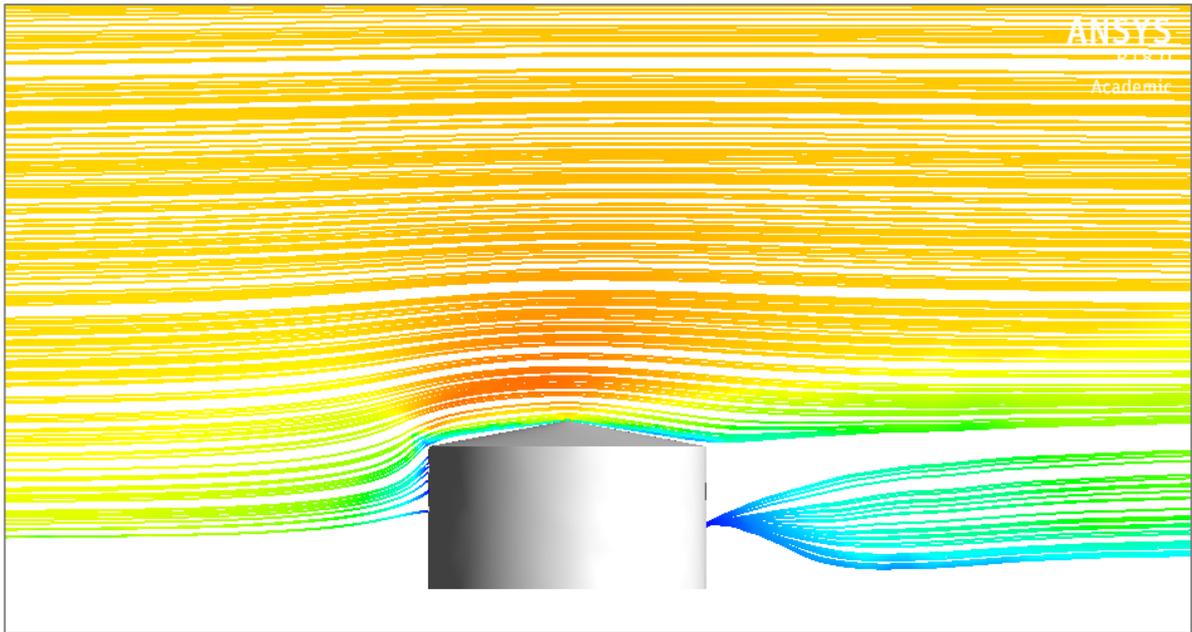
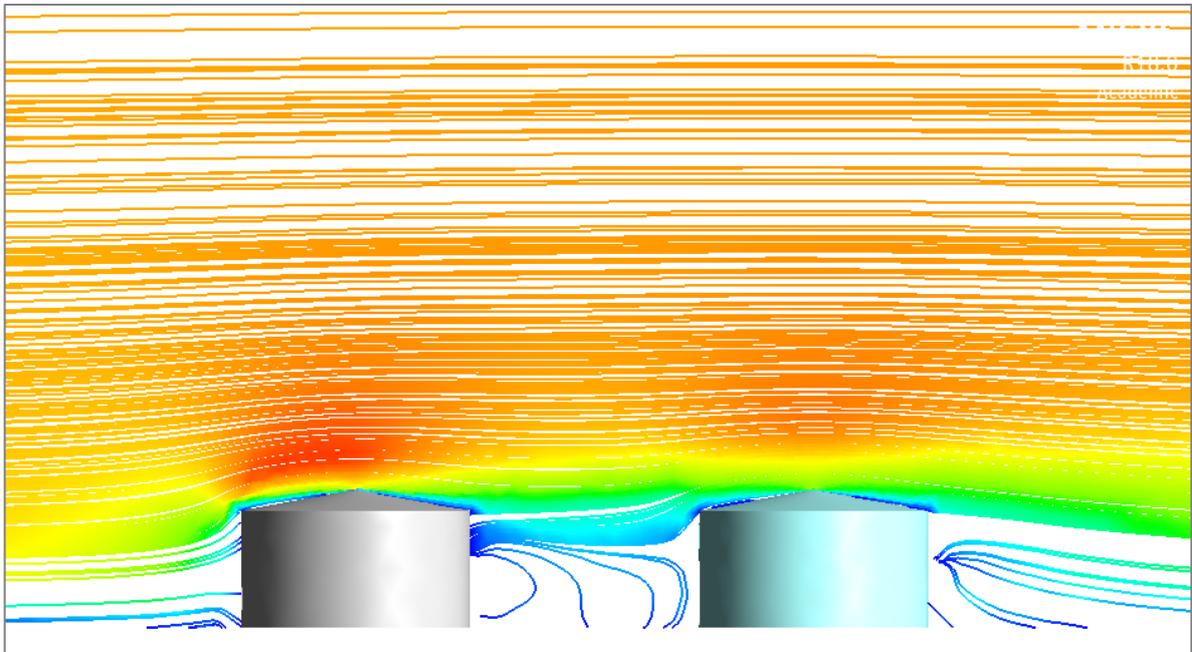


Figura 6.18: Variación del coeficiente de presión en vista 3D del Tanque Apantallado para la dirección D1.
 (a) Resultados Fluent. (b) Resultados Experimentales (Burgos 2012).



(a)



(b)

Figura 6.19: Líneas de corriente (a) Tanque Aislado. (b) Tanque Apantallado.

En la Figura 6.19 se puede observar en el trazado de las líneas de corriente cómo se modifica el flujo del viento ante la presencia de un segundo tanque y la aparición de vórtices entre los dos tanques. En la Figura 6.20 se muestra la dirección del flujo donde se puede ver de forma clara los vórtices que se generan entre los tanques. En la Figura 6.21 se presenta la distribución de presiones, los colores rojo y naranja representan presiones, los colores azul y celeste succiones, mientras que los colores verde y amarillo presiones intermedias. Se puede

notar como la presencia del tanque que se encuentra a la izquierda hace que se reduzcan las presiones sobre el segundo tanque que se encuentra apantallado.

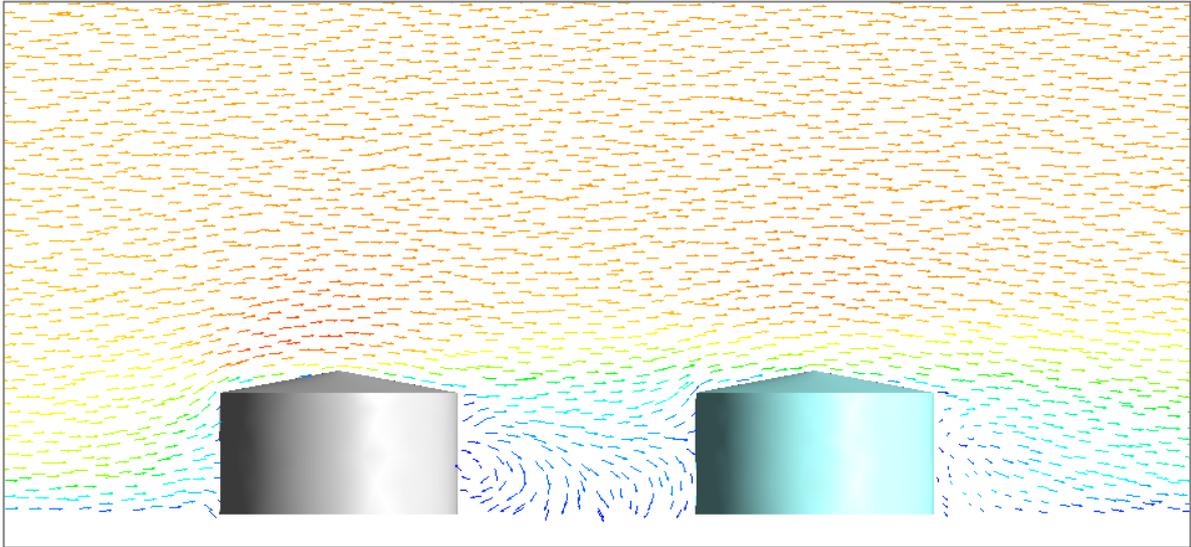


Figura 6.20: Vectores de dirección de la velocidad del viento.

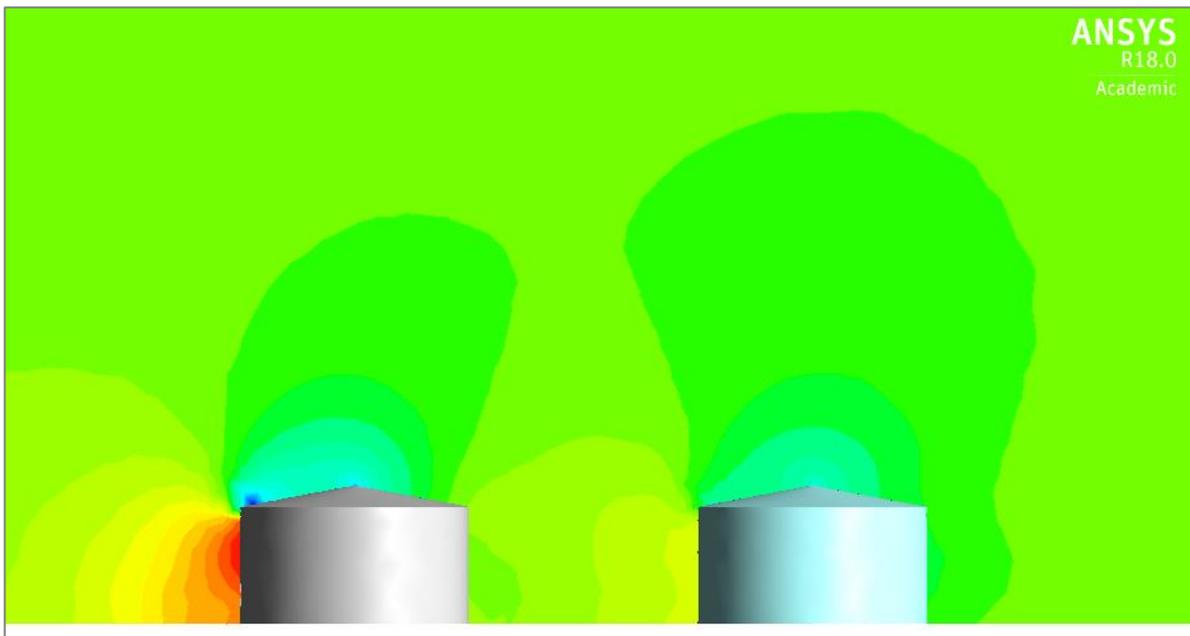


Figura 6.21: Distribución de presiones.

6.3. MODELACION COMPUTACIONAL DE TANQUES SIN TECHO

Para la modelación computacional de tanques sin techo, se presentan dos casos, un modelo ensayado en el túnel de viento de la Universidad Nacional de La Plata (E. Cicerone, 2011) y otro, ensayado en el túnel de la Universidad Nacional del Nordeste (F. Hernández, 2017). A continuación se detallan los modelos y sus resultados.

6.3.1. MODELACIÓN SOBRE TANQUE SIN TECHO ENSAYOS UNLP

Siguiendo la modalidad de análisis presentada en la sección 6.2.2 de este capítulo, se presenta la modelación sobre un tanque sin techo y aislado, se considera inmerso en una capa límite turbulenta. Se trató de reproducir el perfil de velocidad medio del túnel de ensayo, modelado con una ley de potencia cuyo exponente fue de aproximadamente 0.165 y una intensidad de turbulencia de 0.17. Para ello se definió su geometría, mallado, el tipo de modelo de turbulencia del fluido, sus parámetros y las condiciones de borde. Se buscó reproducir fielmente las condiciones físicas de funcionamiento del túnel, con un flujo de entrada turbulento, de velocidad inicial constante tanto en la altura como en el ancho del túnel, e incidente sobre una superficie rugosa, de manera que al ir atravesando el túnel se desarrolle la capa límite antes de impactar sobre el tanque.

6.3.1.1. DIMENSIONES DEL MODELO

Las dimensiones del modelo geométrico corresponden a las mismas que se utilizaron para realizar los ensayos en el túnel aerodinámico de la Universidad Nacional de La Plata (E. Cicerone, 2011), (túnel de ensayo descrito en el inciso 6.2.1). El volumen de control tiene las dimensiones del túnel, la sección de prueba tiene 1,4 m de ancho y 1,0 m de altura, que resulta en un área transversal de $1,4 \text{ m}^2$, y una longitud de 7,2 m.

En la siguiente figura se muestran las dimensiones del tanque:

Diámetro del modelo	D=0,40 m
Altura del tanque	H= 0,245 m
Espesor del tanque	e= 8 mm
Relación de esbeltez	H/D= 0,6125

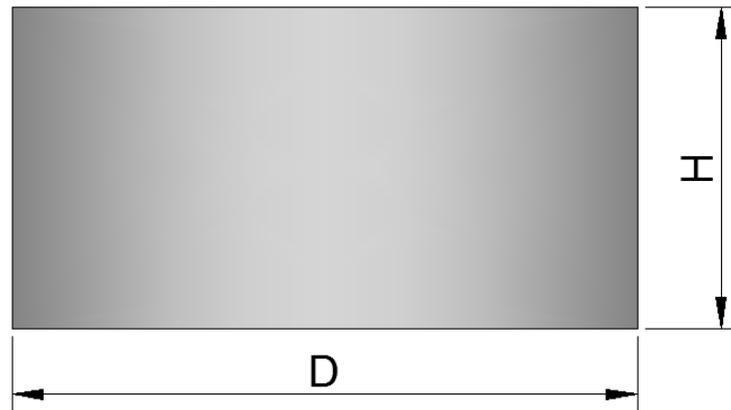


Figura 6.22: Dimensiones del modelo sin techo.

a. Definición de la Geometría

Se adoptó un volumen de control, con idénticas dimensiones que el túnel de ensayo de la Universidad Nacional de La Plata, 1,4 m de ancho, 1,0 m de altura y una longitud de 7,2 m, que resulta en un área transversal de $1,4 \text{ m}^2$. El centro del tanque sin techo se encuentra ubicado a 4,2m desde la entrada del fluido y centrado en el canal. Se importó la geometría en Fluent - Ansys 18 Versión académica, desde un archivo Autocad con extensión .iges.

b. Creación de la Malla

Se adoptó una malla generada automáticamente por Fluent, por proximidad y curvatura, se agregó la condición “Inflation por First Layer Thinkness” sobre el tanque. Esta condición controla el espesor del primer elemento de la malla sobre las paredes del tanque y el crecimiento del tamaño de los elementos tetraédricos en las capas siguientes, (ver sección 5.5.3). Se estableció como condición que el espesor sea de 0.02m con una tasa de crecimiento de 1.2 a partir de la pared del tanque. Esto logra controlar el parámetro y^+ en la cercanía de la pared, que para el modelo $k-\epsilon$ estándar debe encontrarse entre 35 y 350 (Falcinelli et al. 2002), para alcanzar una buena aproximación sin que las ecuaciones se disparen iteración a iteración. La malla está formada por tetraedros con tamaño mínimo de 0.00085m, alcanzando 23518 nodos y 104246 elementos.

c. Configuración del Problema

Se consideró la densidad del aire $1,22 \text{ Kg/m}^3$, dado que Cicerone menciona en su tesis que el día que se realizaron los ensayos en la ciudad de La Plata fue un día de bajas temperaturas. Por otro lado, para la viscosidad cinemática del aire se adoptó el valor de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. El modelo de turbulencia adoptado, es el modelo de dos ecuaciones, k- ϵ estándar con los coeficientes y constantes definidas en la *Figura 6.6*.

A continuación se resumen las superficies y las condiciones adoptadas:

1. Velocity inlet: Se realizó la modelación para tres velocidades de entrada diferentes, todas de perfil constante,
 - a. $u_1 = 10.18 \text{ m/s}$
 - b. $u_2 = 13.11 \text{ m/s}$
 - c. $u_3 = 18 \text{ m/s}$

Como valores de turbulencia se utilizó un 17% de intensidad de turbulencia, y una escala de longitud de turbulencia de 0.014 m, adoptada en función de las dimensiones de la entrada, establecido por la ecuación (5.12) en el capítulo 5, $\delta s = t \cdot l_e = 0.01 * 1.4 \text{ m} = 0.014$, donde t es el parámetro que ajusta el usuario y “ l_e ” es el tamaño de la entrada.

2. Pressure outlet: el tipo de condición de borde utilizado fue *pressure-outlet* y el método especificado *k and Epsilon*.
3. Suelo: el tipo de condición de borde es *Wall* (\vec{u} perpendicular a la pared=0), la altura de rugosidad es 0.005 m y la constante de rugosidad utilizada es 0.5.
4. Techo, paredes laterales y tanque: se utilizó la condición de borde *Wall*, con una altura de rugosidad de 0.00 m y una constante de rugosidad de 0.5.

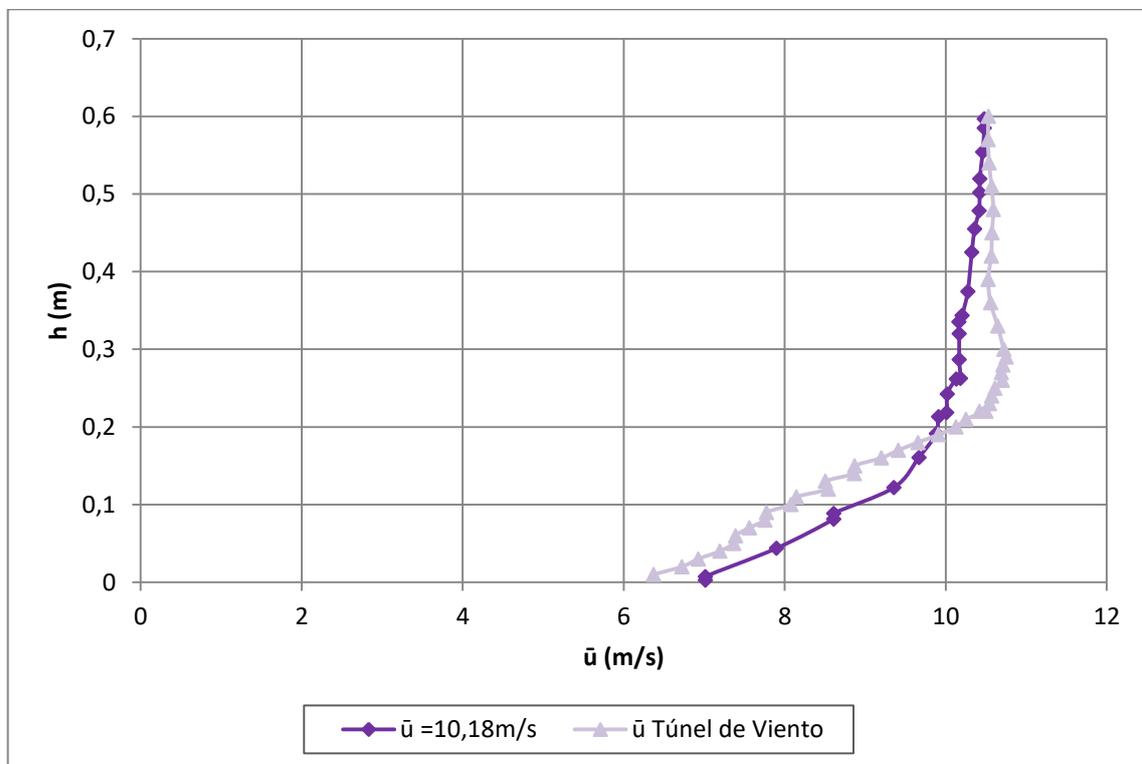
d. Solución del Problema y Resultados.

Para comenzar con la solución del problema se debió establecer, en la inicialización del mismo, que los valores de referencia adoptados son los que corresponden a la condición de borde “velocity_inlet”, ya que a partir de estos valores son calculados los parámetros k y ϵ . Por último

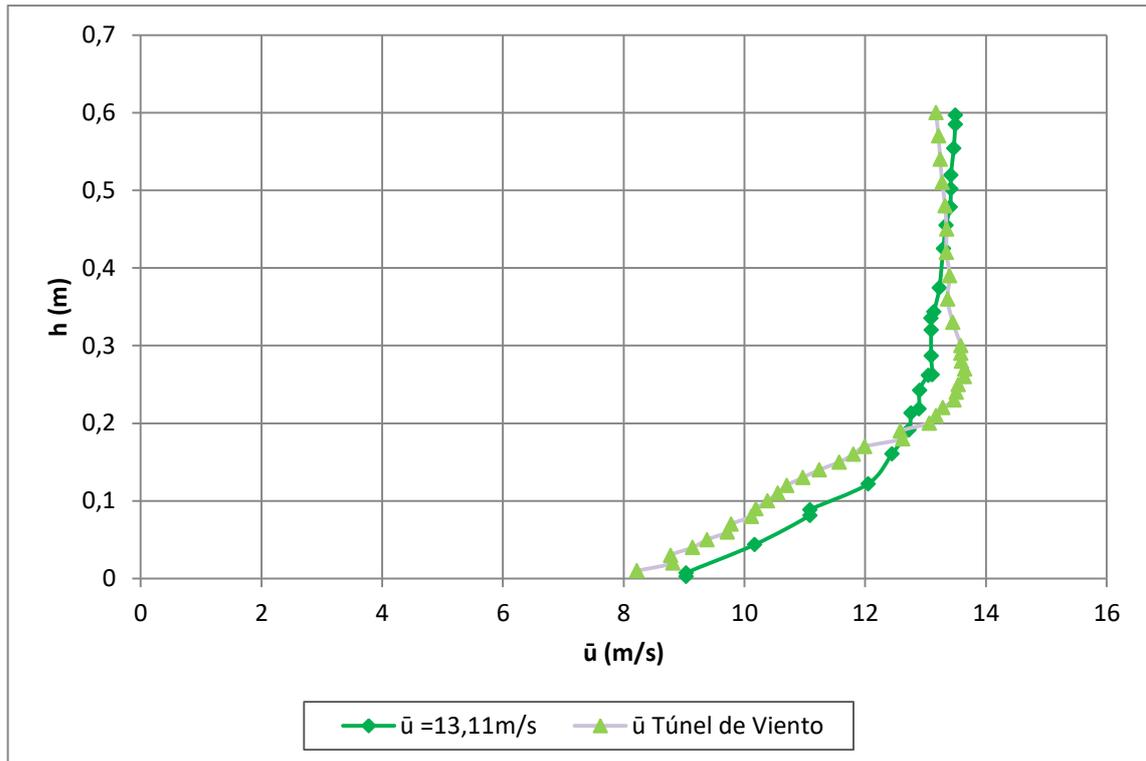
se indicó la cantidad de iteraciones máximas para que el software alcance la solución del problema. Para asegurar la convergencia del modelo se estableció inicialmente una cantidad de 300 iteraciones, llegándose a la solución luego de alrededor de 154 iteraciones.

6.3.1.2. Perfiles de Velocidad

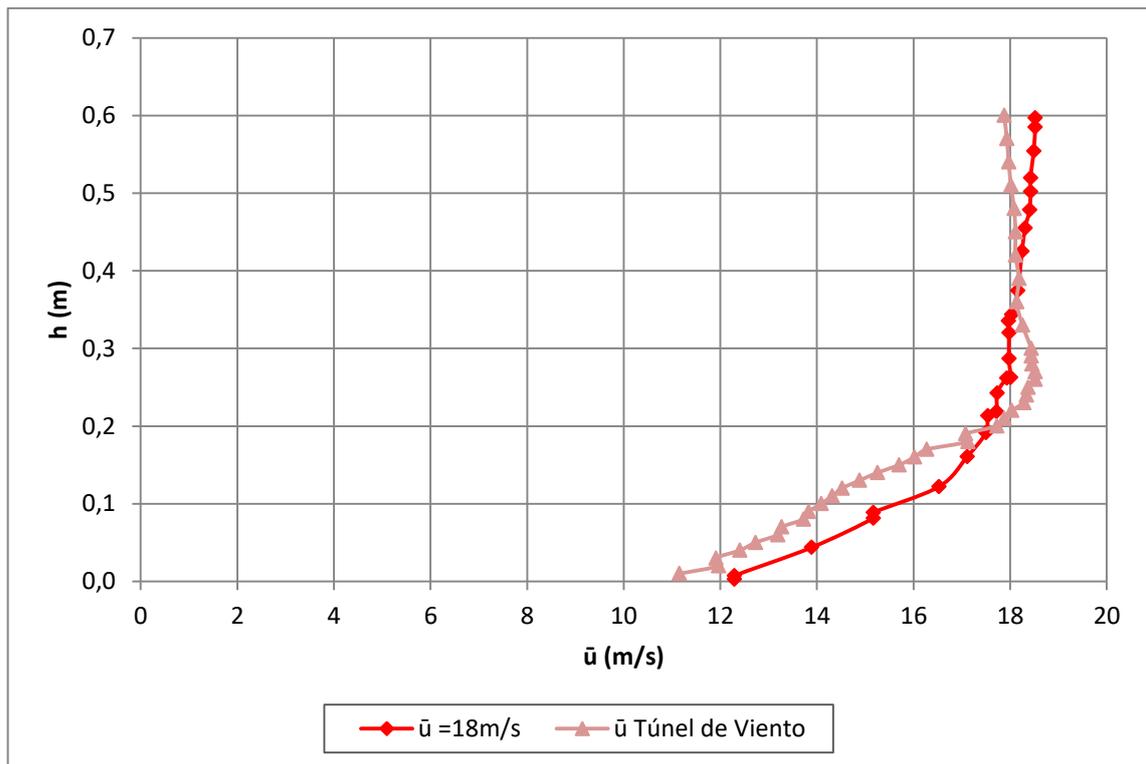
A continuación se presentan los perfiles de velocidad obtenidos para las tres velocidades de referencia, $u_1= 10,18$ m/s, $u_2= 13,11$ m/s y $u_3=18$ m/s, comparados con los obtenidos en el túnel de viento:



(a)



(b)



(c)

Figura 6.23: Comparación Perfiles de velocidad obtenidos en FLUENT vs. Túnel de Viento.
 (a) $\bar{u}_1 = 10,18 \text{ m/s}$. (b) $\bar{u}_2 = 13,11 \text{ m/s}$. (c) $\bar{u}_3 = 18 \text{ m/s}$

Se observa que los perfiles de velocidad obtenidos mediante CFD logran reproducir la capa límite atmosférica de la misma manera que se logró en los ensayos de tanques aislados con techo, manteniendo las mismas características mencionadas en 6.2.2.1.

6.3.1.3. Coeficientes de Presión

Para la obtención de los coeficientes de presión en el tanque se adoptó la velocidad de referencia para cada caso, 10,18m/s, 13,11m/s, 18m/s, que corresponde a la altura 27 cm, próxima al borde superior del cilindro.

La *Figura 6.24* muestra la evolución de los coeficientes de presión externos para la simulación numérica a una velocidad de referencia de 13,11 m/s ($Re= 3,5 \times 10^5$), a tres niveles del cilindro; $H/6$, $H/2$ y $5/6H$. A esta velocidad se logró una mejor aproximación a los C_p del ensayo en túnel de viento.

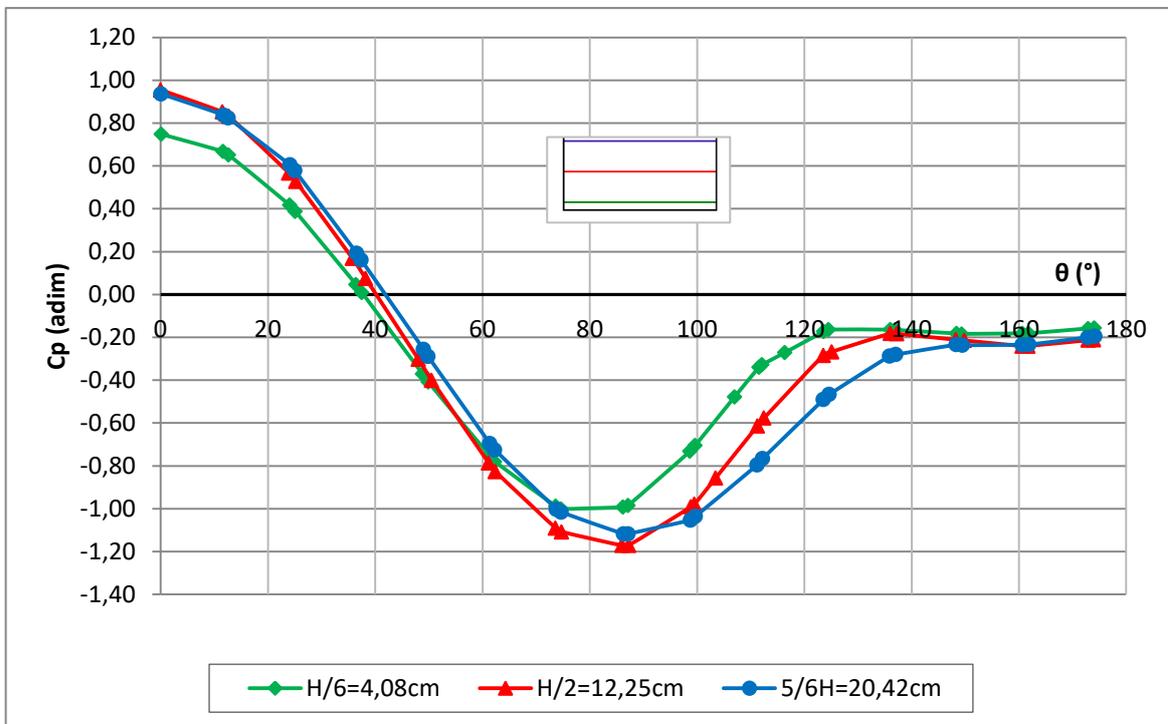


Figura 6.24: Comparación variación circunferencial del coeficiente de presión externos a diferentes niveles para tanque sin techo, $\bar{u} = 13,11$ m/s.

Se puede observar en la *Figura 6.24* que existen variaciones del coeficiente de presión en altura, notándose que los mayores valores (presión) se encuentran en la línea central ($\theta=0^\circ$) del tanque en la región a barlovento y se distribuyen de manera más o menos uniforme en este sector, mientras que los menores valores (succión) se localizan entre los 80° y 100° con respecto al punto de estancamiento también en la zona media superior del cilindro. En la *Figura 6.25* se muestra la variación del coeficiente de presión en diferentes regiones del tanque.

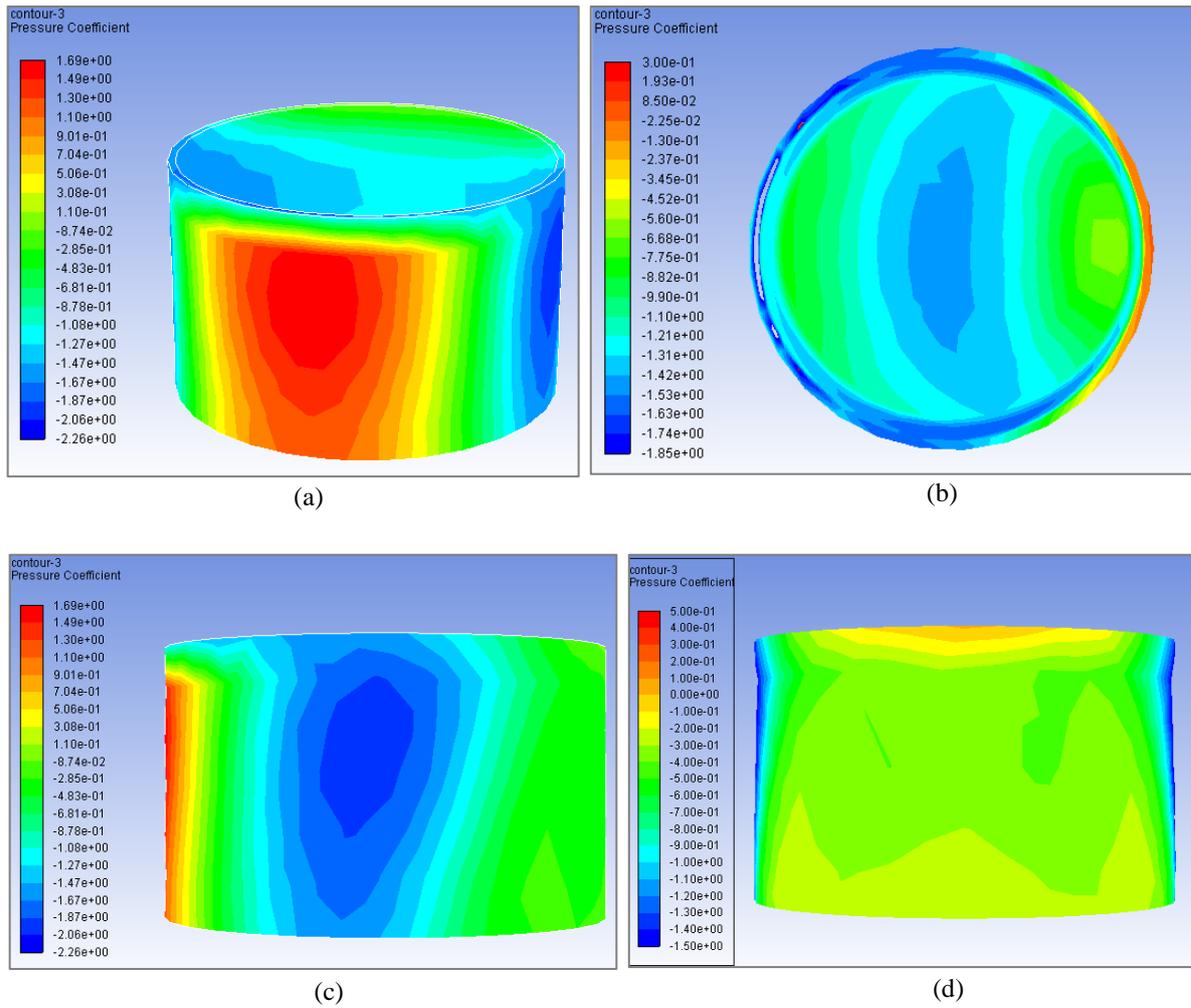


Figura 6.25: Distribución de coeficientes de presión en tanque sin techo, (a) Vista 3D. (b) Fondo del tanque. (c) Vista Lateral. (d) Vista Sotavento.

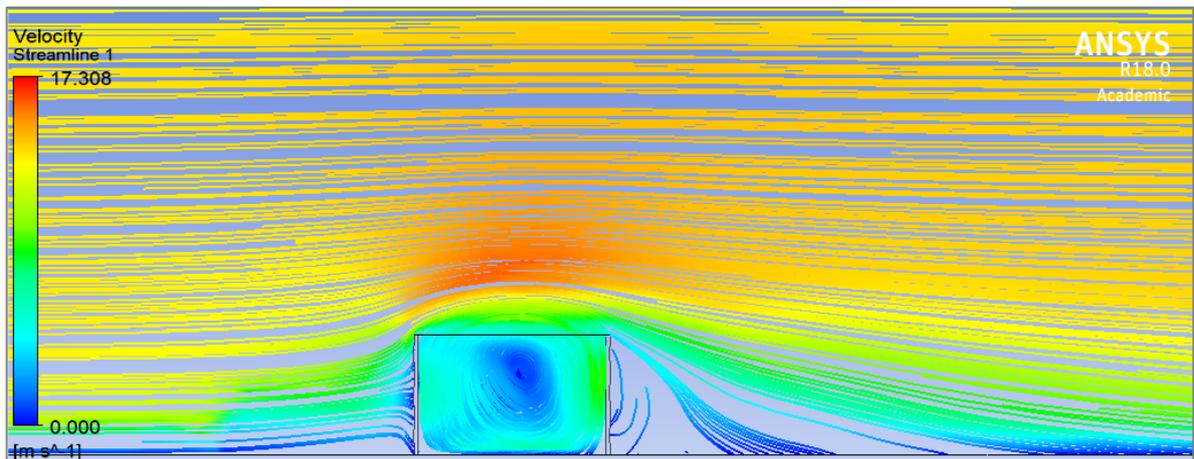


Figura 6.26: Líneas de Corriente en el plano medio del tanque.

En la *Figura 6.26* se pueden observar las líneas de corriente en el plano medio vertical del tanque, donde queda evidenciado el vórtice interno que se genera debido a la ausencia del techo. La *Figura 6.27* muestra los vectores de velocidad (a) en el plano medio del tanque dando una

magnitud de las mismas dentro del tanque y (b) en un plano a H/2 del tanque, en la figura (b) se puede ver la separación del flujo a partir de la línea media, lo que da lugar a dos vórtices, uno a cada lado de la línea media.

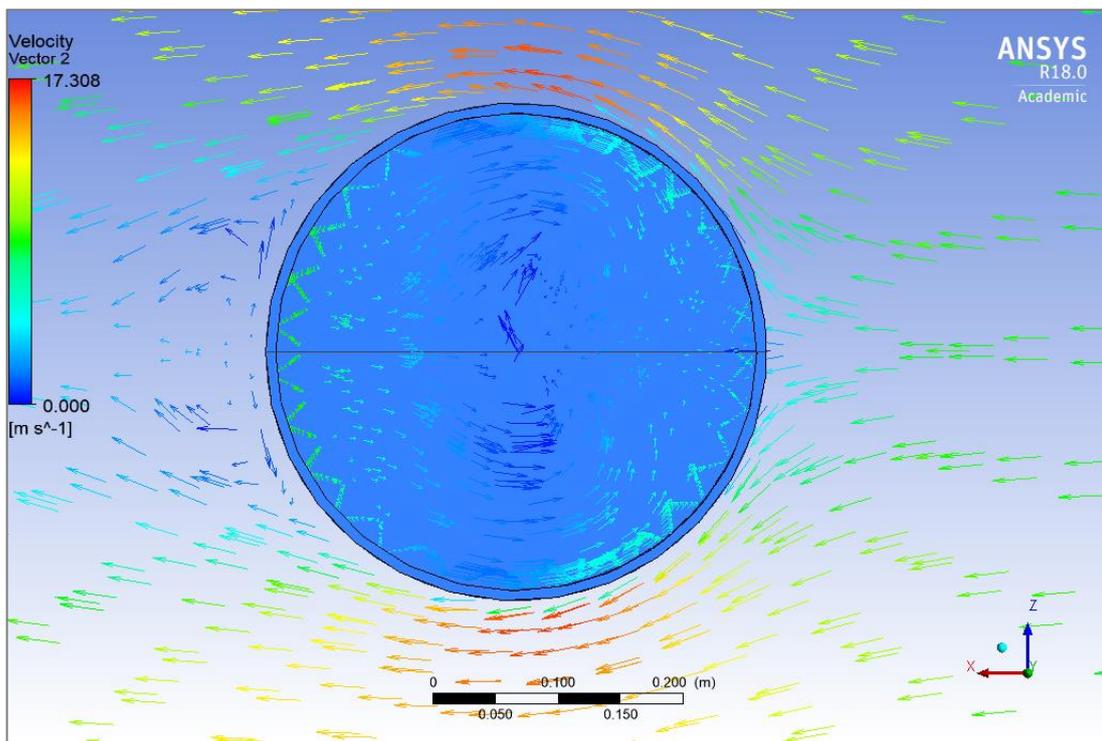
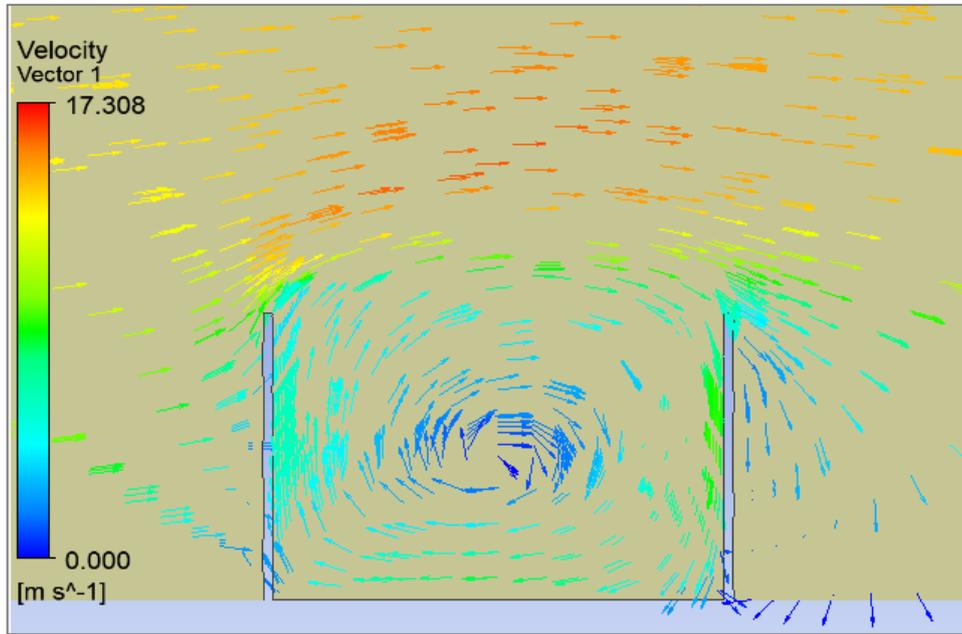


Figura 6.27: Vectores de velocidad. (a) en el plano medio del tanque, (b) sobre un plano a H/2 del tanque.

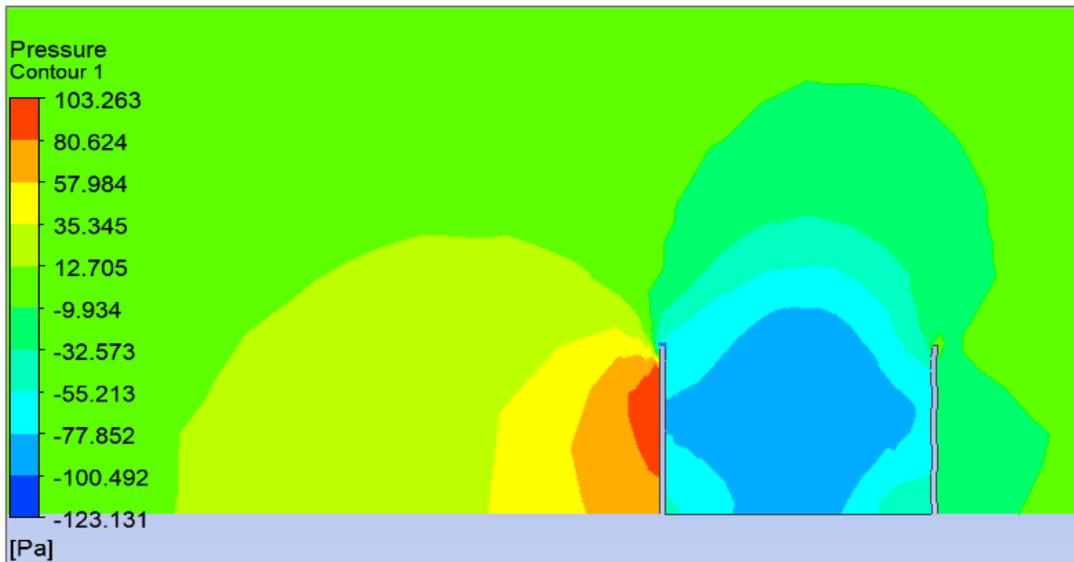


Figura 6.28: Distribución de presiones en el plano medio.

En la *Figura 6.28* muestra la distribución de presiones en el plano medio, se puede observar como el flujo a $1.5D$ del tanque aguas arriba se ve influenciado por la presencia del tanque, (ver sección 6.3.1).

6.3.1.4. Comparación con Ensayos

Para la comparación con los ensayos de Cicerone se evaluaron los C_p en la línea media del tanque en la dirección del viento, en la posición en que estaban dispuestas las tomas de presión en el ensayo. La *Figura 6.29* muestra la configuración y nomenclatura de las tomas. Las tomas T3/T6/T11/T16 se encuentran a una altura de $H/6$, las T2/T5/T12/T15 a $H/2$, mientras que T1/T4/T13/T14 a $5/6H$. Las tomas T7 y T10 en el piso del tanque se encuentran a una distancia $D/8$ del borde del tanque, mientras que las tomas T8 y T9 lo están a una distancia $3/8D$ del borde.

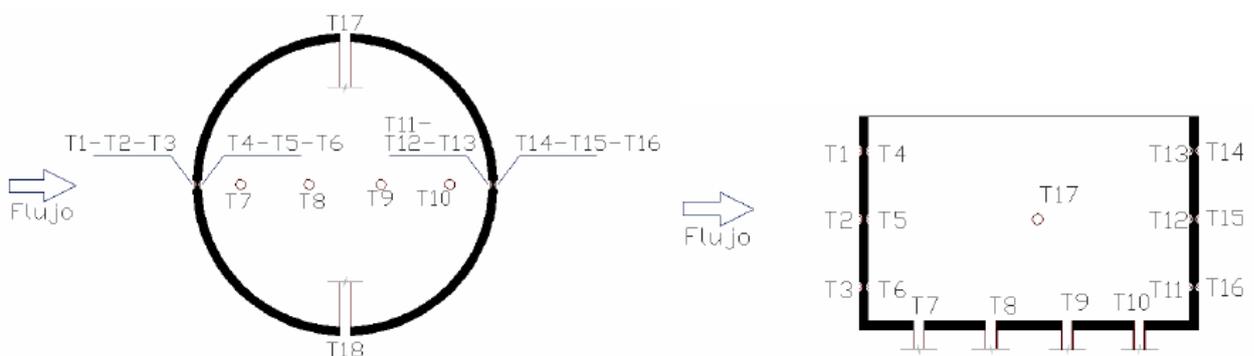


Figura 6.29: Configuración y nomenclatura de las tomas.

La *Tabla 6.1* muestra los valores de C_p , los resultados experimentales de Cicerone en las filas E, mientras que en las filas N se muestran los resultados obtenidos en la simulación numérica realizada con Ansys Fluent. Se puede observar que la simulación logra aproximar los valores obtenidos en ensayo de Túnel de viento en la mayoría de los casos, la mejor aproximación se obtiene a la velocidad de 13,11m/s, donde los errores son menores del 15%. También pueden hacerse dos observaciones sobre los datos experimentales: primera, los coeficientes de la toma T8, para el caso de velocidad 10.18m/s y 18 m/s, resultan ser mayores que los esperados, presentando una discontinuidad en el signo del coeficiente; segunda, los valores de C_p de las tomas T17 y T18, siendo estas las tomas laterales sobre el tanque, presentan una variación importante en todos los casos, los valores de las tomas T17 son siempre menores que los de las tomas T18, esto indica que el flujo dentro del túnel de viento puede no haber sido perpendicularmente incidente sobre el tanque.

Velocidad		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
10.18m/s	E	0.91	0.74	0.63	-0.78	-0.65	-0.54	-0.67	0.29	-0.53	-0.17	-0.07	-0.46	-0.43	-0.20	-0.21	-0.19	-0.60	-0.98
	N	0.88	0.94	0.75	-0.73	-0.74	-0.55	-0.62	-0.77	-0.80	-0.38	-0.48	-0.72	-0.57	-0.15	-0.19	-0.14	-1.15	-1.19
13.11m/s	E	1.02	0.79	0.68	0.33	-0.81	-0.65	-0.83	-0.87	-0.76	-0.29	-0.28	-0.67	-0.62	-0.28	-0.33	-0.33	-0.86	-1.27
	N	0.94	0.95	0.75	-0.68	-0.74	-0.53	-0.62	-0.84	-0.79	-0.36	-0.46	-0.71	-0.54	-0.19	-0.21	-0.15	-1.12	-1.17
18m/s	E	0.72	0.59	0.47	-0.80	-0.78	-0.65	-0.73	0.16	-0.75	-0.36	-0.37	-0.69	-0.61	-0.38	-0.37	-0.43	-0.77	-1.16
	N	0.93	0.95	0.75	-0.73	-0.74	-0.53	-0.62	-0.85	-0.79	-0.35	-0.46	-0.71	-0.54	-0.18	-0.21	-0.15	-1.13	-1.18

Tabla 6.1: Comparación de C_p . Filas E: datos experimentales (Cicerone), Filas N: datos numéricos (Waiman).

6.3.2. MODELACIÓN SOBRE TANQUE SIN TECHO ENSAYOS UNNE

Siguiendo la modalidad de análisis presentada en la sección 6.2.2 de este capítulo, se presenta la modelación sobre un tanque sin techo y aislado, se considera inmerso en una capa límite turbulenta. Se trató de reproducir el perfil de velocidad medio del túnel de ensayo, modelado con una ley de potencia cuyo exponente se encuentra entre 0.23 y 0.28, con una intensidad de turbulencia de 0.18, siguiendo a Wittwer et al (2000). Para ello se definió su geometría, mallado, el modelo de turbulencia del fluido, sus parámetros y las condiciones de borde impuestas. Se consideró reproducir fielmente las condiciones físicas de funcionamiento del túnel, con un flujo de entrada turbulento, de velocidad inicial constante tanto en la altura como en el ancho del túnel, e incidente sobre una superficie rugosa, de manera que al ir atravesando el túnel se desarrolle la capa límite antes de impactar sobre el tanque.

6.3.2.1. DIMENSIONES DEL MODELO

Las dimensiones del modelo geométrico corresponden a las mismas que se utilizaron para realizar los ensayos en el túnel aerodinámico de la Universidad Nacional del Nordeste (F. Hernández, 2017). El volumen de control tiene las dimensiones del túnel, la sección de prueba tiene 2,4 m de ancho y 1,8 m de altura y una longitud de 22,4 m, que resulta en un área transversal de 4,32 m².

En la siguiente figura se muestran las dimensiones del tanque:

Diámetro del modelo	D=0,40 m
Altura del tanque	H= 0,097 m + 0,01m elevado por las tomas de datos
Espesor del tanque	e= 5 mm
Relación de esbeltez	H/D= 0,24

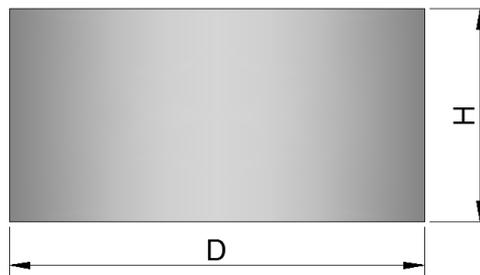


Figura 6.30: Dimensiones del modelo sin techo.

a. Definición de la Geometría

Como se mencionó anteriormente, se adoptó un volumen de control, con idénticas dimensiones que el túnel de ensayo de la Universidad Nacional del Nordeste, 2,4 m de ancho y 1,8 m de altura, que resulta en un área transversal de 4,32 m², y una longitud de 22,4 m. El centro del tanque sin techo se encuentra ubicado a 19,4 m desde la entrada del fluido y centrado en el canal. Se importó la geometría en Fluent - Ansys 18 Versión académica, desde un archivo Autocad con extensión .iges.

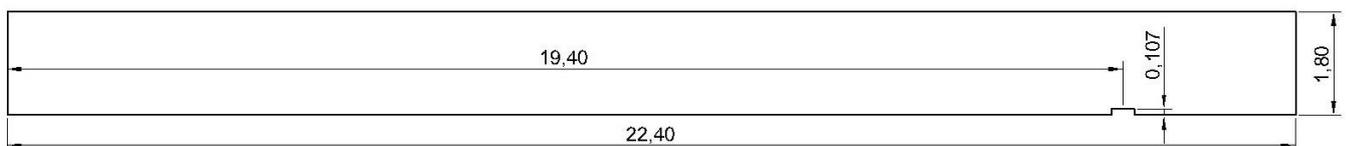


Figura 6.31: Vista Lateral

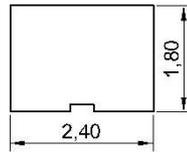


Figura 6.32: Vista Frontal

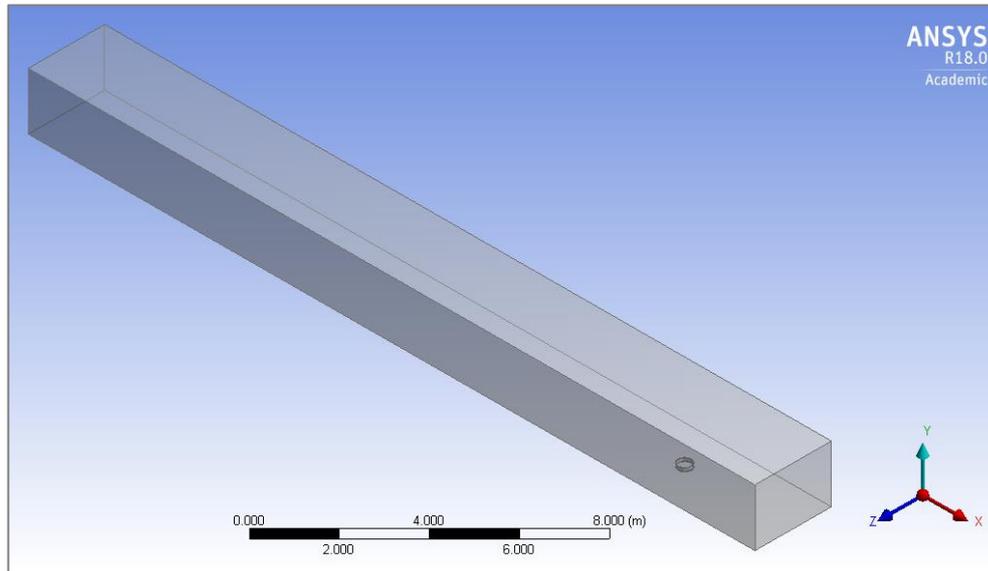


Figura 6.33: Modelo 3D.

b. Creación de la Malla

Se optó por una malla generada automáticamente por Fluent. La malla está formada por tetraedros con tamaño mínimo 0,00263m, este tamaño de elemento logra controlar el parámetro y^+ en la cercanía de la pared, que para el modelo $k-\epsilon$ estándar debe encontrarse entre 35 y 350 (Falcinelli et al. 2002), para alcanzar una buena aproximación sin que las ecuaciones se disparen iteración a iteración, visualizado en la *Figura 6.34*. La malla cuenta con 55265 elementos y 11082 nodos.

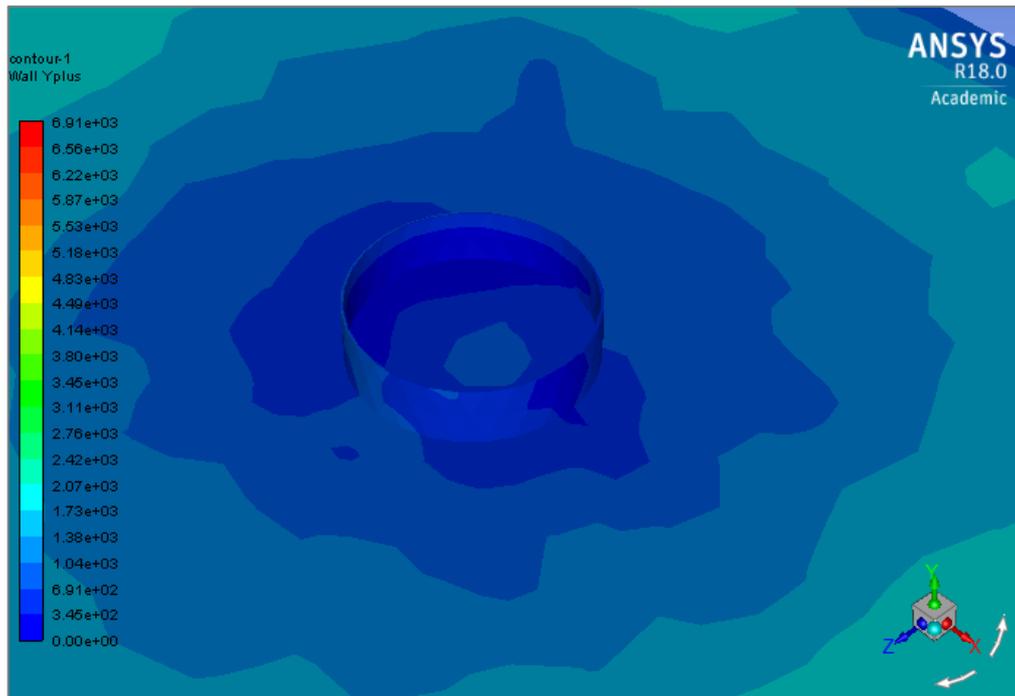


Figura 6.34: Parámetro y^+ sobre las paredes del tanque y suelo.

c. Configuración del Problema

Se consideró la densidad del aire $1,19 \text{ Kg/m}^3$, para la ciudad de Resistencia. Por otro lado, para la viscosidad cinemática del aire se adoptó el valor de $1,29 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, especificado en el trabajo de F. Hernández (2017). Fernández ensayo dos modelos a distintas velocidades, uno para tomas externas y otro para internas, dada la complejidad de colocar las tomas de medición en un solo modelo. El modelo de turbulencia adoptado, es el modelo de dos ecuaciones, $k-\epsilon$ estándar con los coeficientes y constantes definidas en la *Figura 6.6*.

A continuación se resumen las superficies y las condiciones adoptadas:

5. Velocity inlet: Se realizó la modelación para dos velocidades de entrada diferentes, todas de perfil constante:
 - a. $u_1 = 18,7 \text{ m/s}$ para tomas externas
 - b. $u_2 = 18 \text{ m/s}$ para tomas internas

Como valores de turbulencia se utilizó un 18% de intensidad de turbulencia, y una escala de longitud de turbulencia de 0.024 m , adoptada en función de las dimensiones de la entrada, establecido por la ecuación (5.12), $\delta s = t \cdot le = 0.01 * 2.4 \text{ m} = 0.024 \text{ m}$, donde t es el parámetro que ajusta el usuario y “ le ” es el tamaño de la entrada.

6. Pressure outlet: el tipo de condición de borde utilizado fue *pressure-outlet* y el método especificado *k and Epsilon*.
7. Suelo: el tipo de condición de borde es *Wall*, la altura de rugosidad es $z_{0M} = 0.0000645$ m y la constante de rugosidad utilizada es 0.5. Este valor se obtuvo a partir del parámetro de Jensen que relaciona la longitud característica del problema, en este caso el diámetro del tanque, con la longitud de rugosidad z_0 . Para el caso ensayado en el túnel, se caracterizó un tanque cuyas dimensiones reales son 31m de diámetro con una longitud de rugosidad z_0 de 0,005 m para la ubicación del tanque en la ciudad de General Roca, provincia de Rio Negro.

$$Je = \frac{D}{z_0} = \frac{31m}{0,005m} = 6200$$

$$\text{Despejando } z_{0M} \text{ para el caso del tanque del ensayo } z_{0M} = \frac{D}{Je} = \frac{0,40m}{6200} = 0,0000645$$

8. Techo, paredes laterales y tanque: se utilizó la condición de borde *Wall*, con una altura de rugosidad de 0.00 m y una constante de rugosidad de 0.5.

d. Solución del Problema y Resultados.

Para comenzar con la solución del problema se debió establecer en la inicialización del mismo que los valores de referencia adoptados son los que corresponden a la condición de borde “velocity_inlet”, ya que a partir de estos valores son calculados los parámetros k y ϵ . Por último se indicó la cantidad de iteraciones a realizar por el software para llegar a la solución del problema. Para asegurar la convergencia del modelo se estableció inicialmente una cantidad de 300iteraciones, alcanzándose la solución luego de alrededor de 196 iteraciones.

6.3.2.2. Coeficientes de Presión

a. Tomas Externas

Para la obtención de los coeficientes de presión externos en el tanque se adoptó una velocidad de referencia igual a 18.7 m/s, que corresponde a la altura 10,70 cm, próxima al borde superior del casco del tanque.

Las Figuras 6.35 y 6.36 muestran la evolución del coeficiente de presión externos para 0,7H y 0,3H del cilindro, para la velocidad de referencia de 18,7 m/s ($Re= 5 \times 10^5$), comparado con las mediciones de F. Hernández VF y F2.

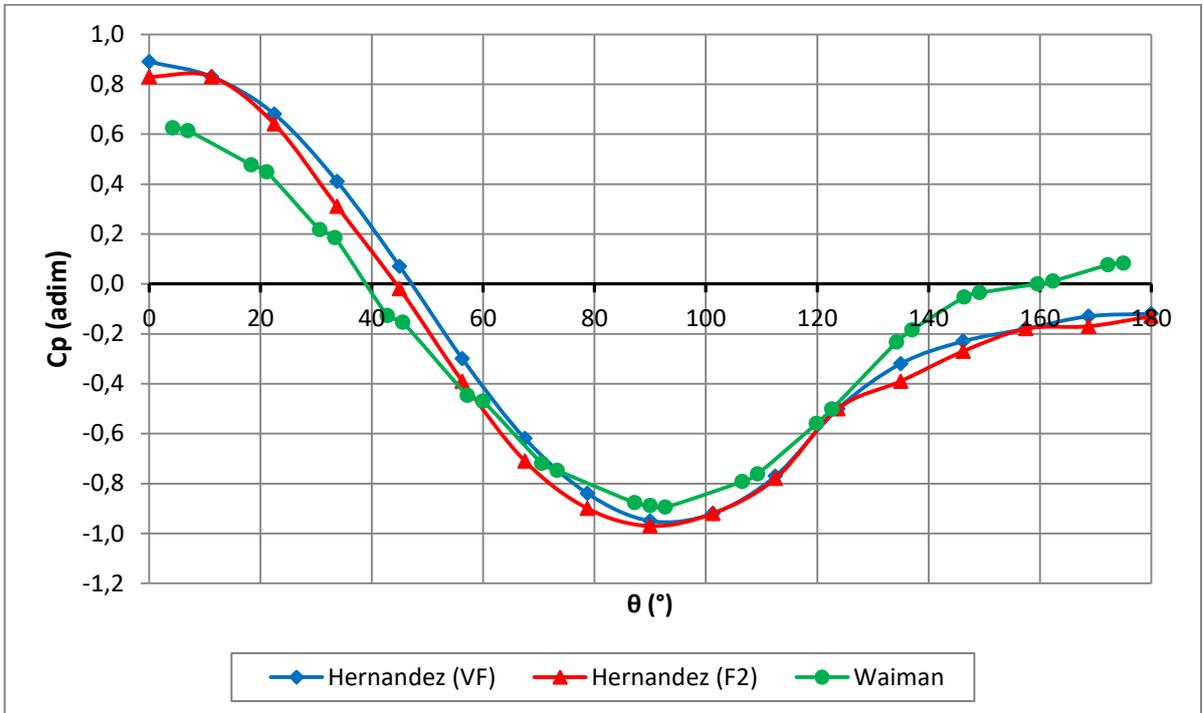


Figura 6.35: Comparación Variación Circunferencial del coeficiente de presión externos 0,7H para tanque sin techo, $\bar{u}= 18,7$ m/s.

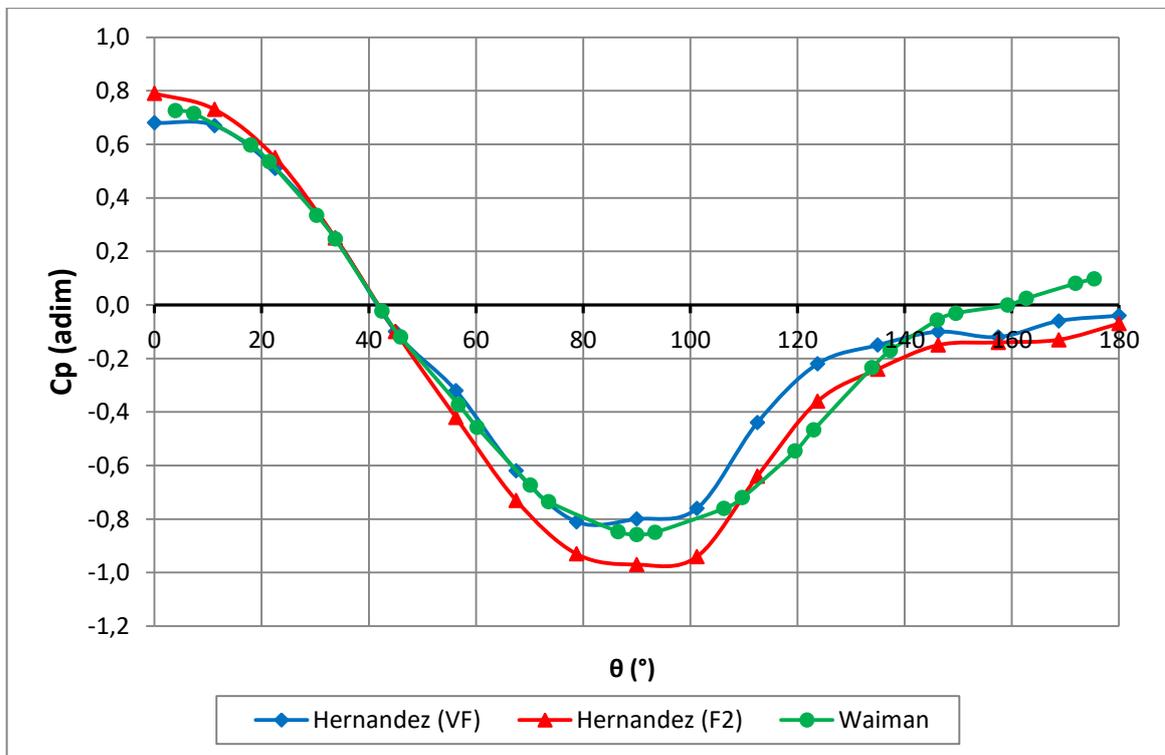


Figura 6.36: Comparación Variación Circunferencial del coeficiente de presión externos 0,3H para tanque sin techo, $\bar{u}= 18,7$ m/s.

Se puede observar en la *Figura 6.35* que la simulación numérica es más ajustada en los laterales del tanque que a barlovento y sotavento, lo cual logra representar el desprendimiento de la capa límite correctamente para $0.7H$. En la *Figura 6.36* se muestra que la modelación con CFD se comporta mejor aún a $0.3H$, presentando variaciones en la estela.

b. Tomas Internas

Para la obtención de los coeficientes de presión internos en el tanque se adoptó una velocidad de referencia igual a 18 m/s , que corresponde a la altura $10,70 \text{ cm}$, próxima al borde superior del casco del tanque.

Las *Figuras 6.37* y *6.38* muestran la evolución del coeficiente de presión interno para $0,7H$ y $0,45H$ del cilindro, para la velocidad de referencia de 18 m/s ($Re= 4,8 \times 10^5$), comparado con las mediciones de F. Hernández F1 y F2. En las mismas se puede observar cómo el comportamiento de la simulación numérica se ajusta a la curva F1, presentando una discrepancia a sotavento para $0.45H$, principalmente en la zona de la estela.

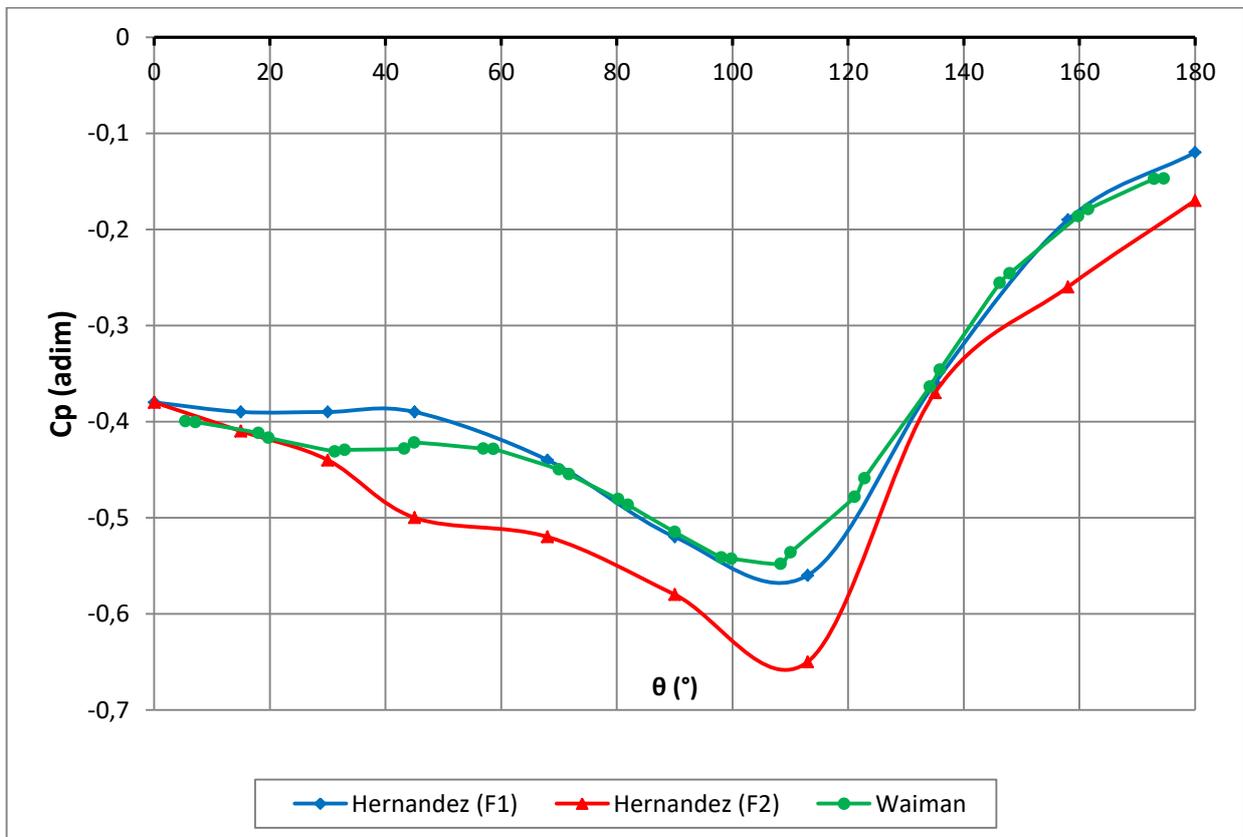


Figura 6.37: Comparación Variación Circunferencial del coeficiente de presión internos $0,7H$ para tanque sin techo, $\bar{u}= 18 \text{ m/s}$.

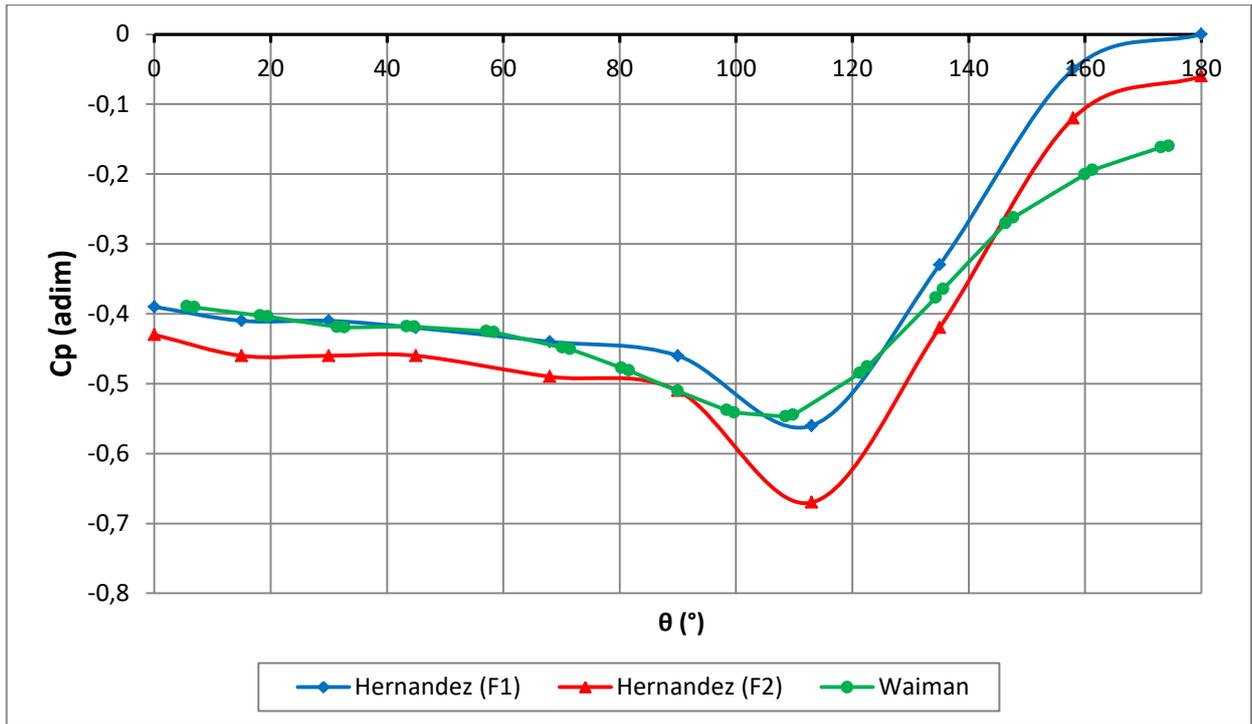


Figura 6.38: Comparación Variación Circunferencial del coeficiente de presión internos 0,45H para tanque sin techo, $\bar{u}= 18$ m/s.

Las Figuras 6.39 y 6.40 muestran la evolución del coeficiente de presión interno en el piso del tanque, se observa que la simulación numérica logra representar la distribución de los valores de cp en el piso, siendo más ajustada en la pared interna a sotavento.

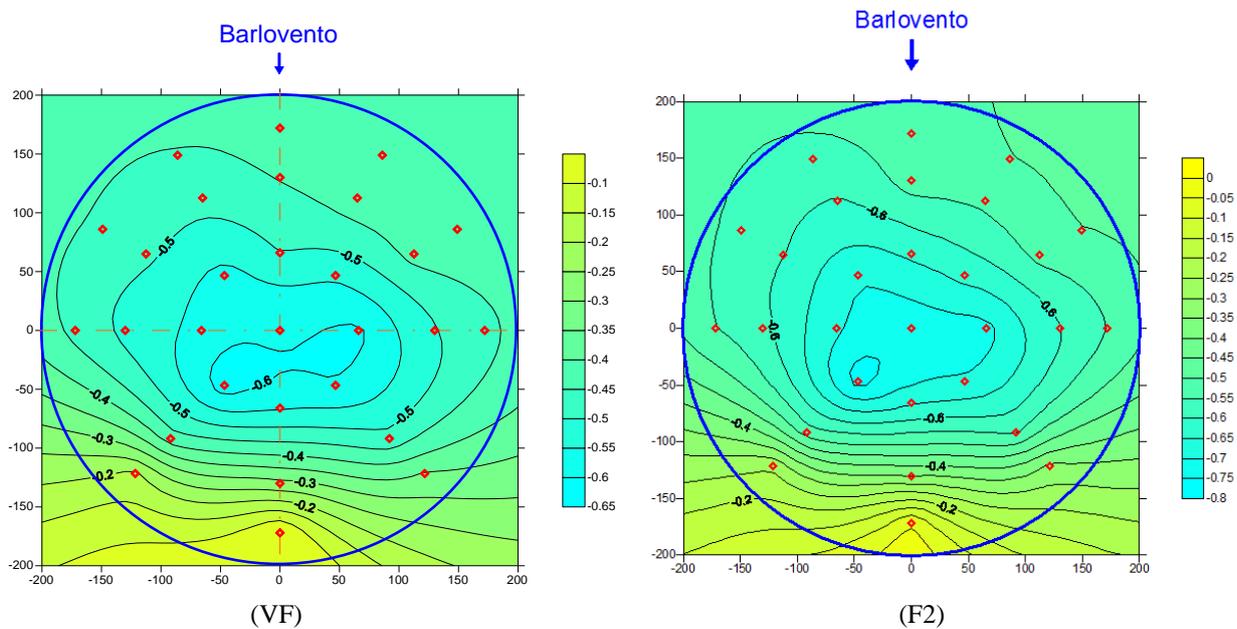


Figura 6.39: Coeficientes de presión internos piso, mediciones VF y F2, $\bar{u}= 18$ m/s. F. Hernández.

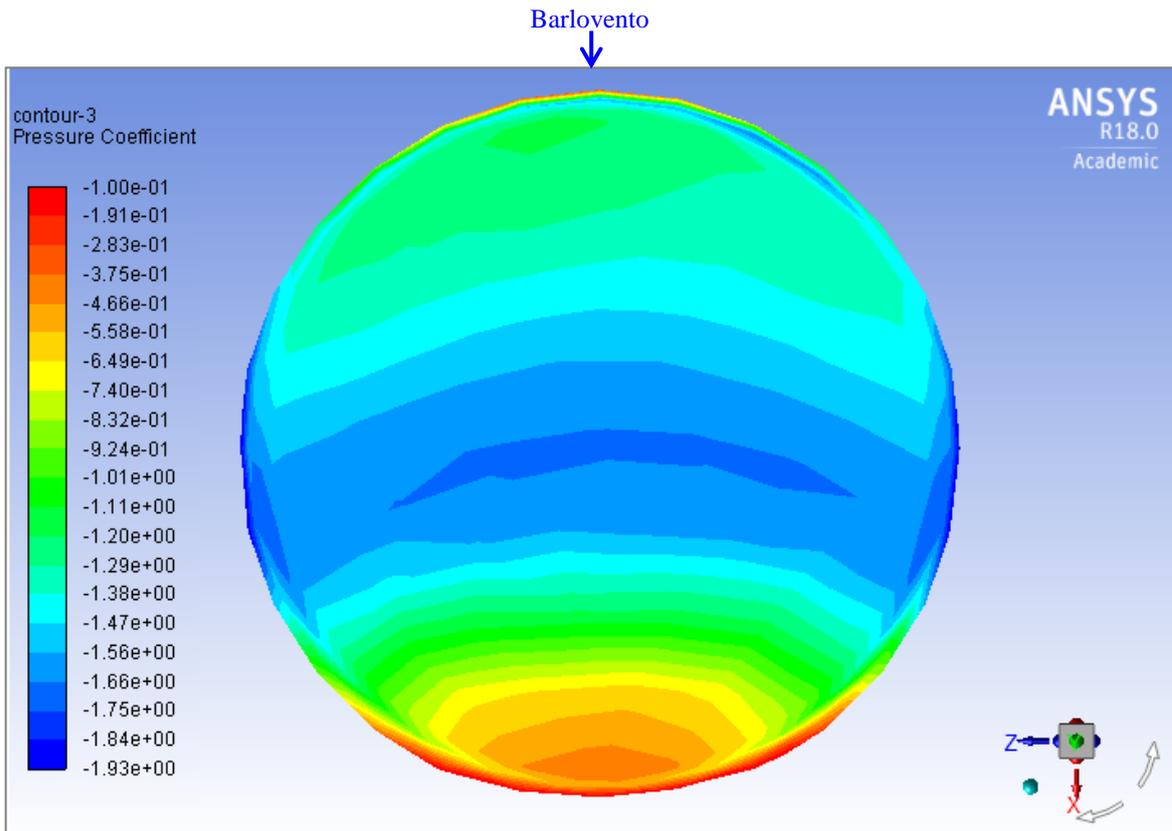


Figura 6.40: Coeficientes de presión internos piso, simulación numérica, $\bar{u}= 18$ m/s.

La *Figura 6.41* muestra las líneas de corriente en el plano medio del tanque, se puede observar la generación de un vórtice interno, y la estela que se genera después de la superación del obstáculo.

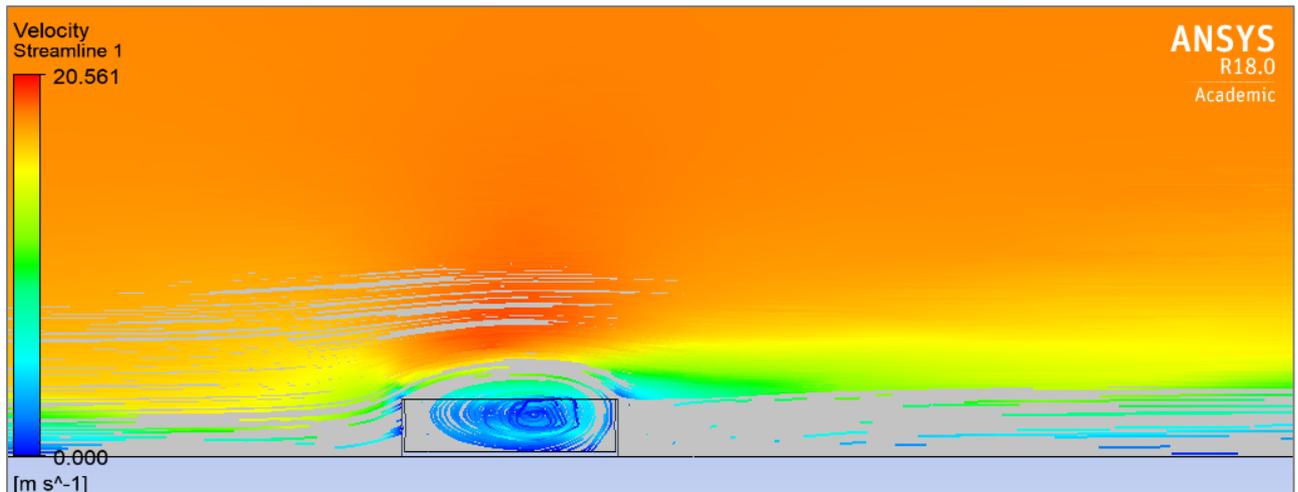
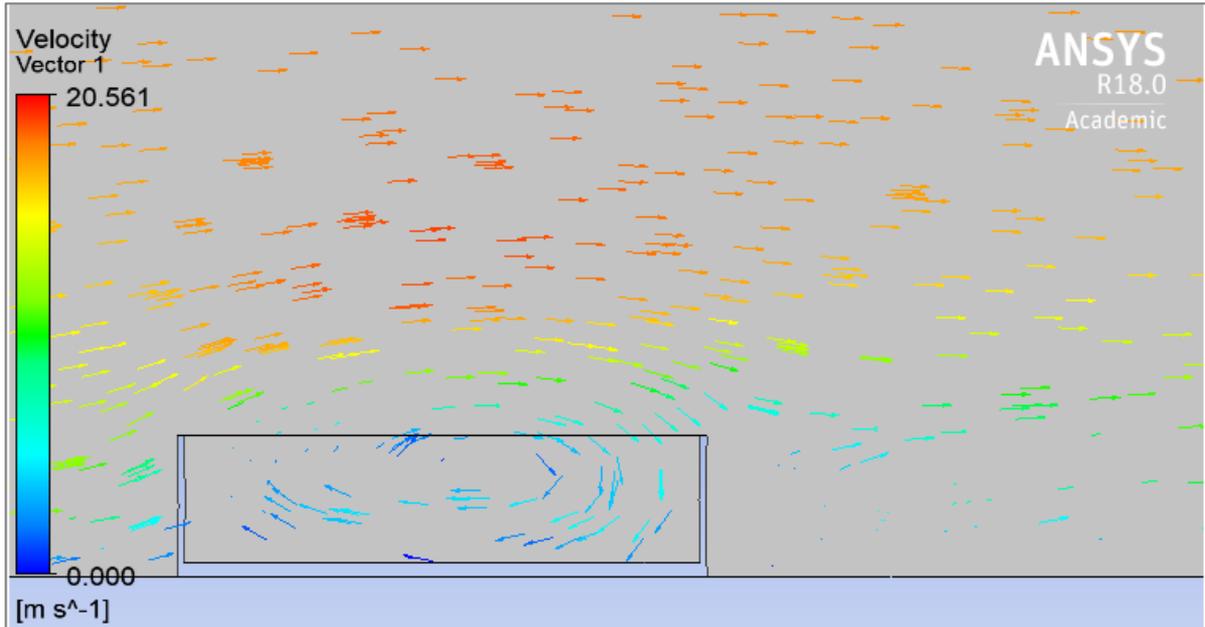


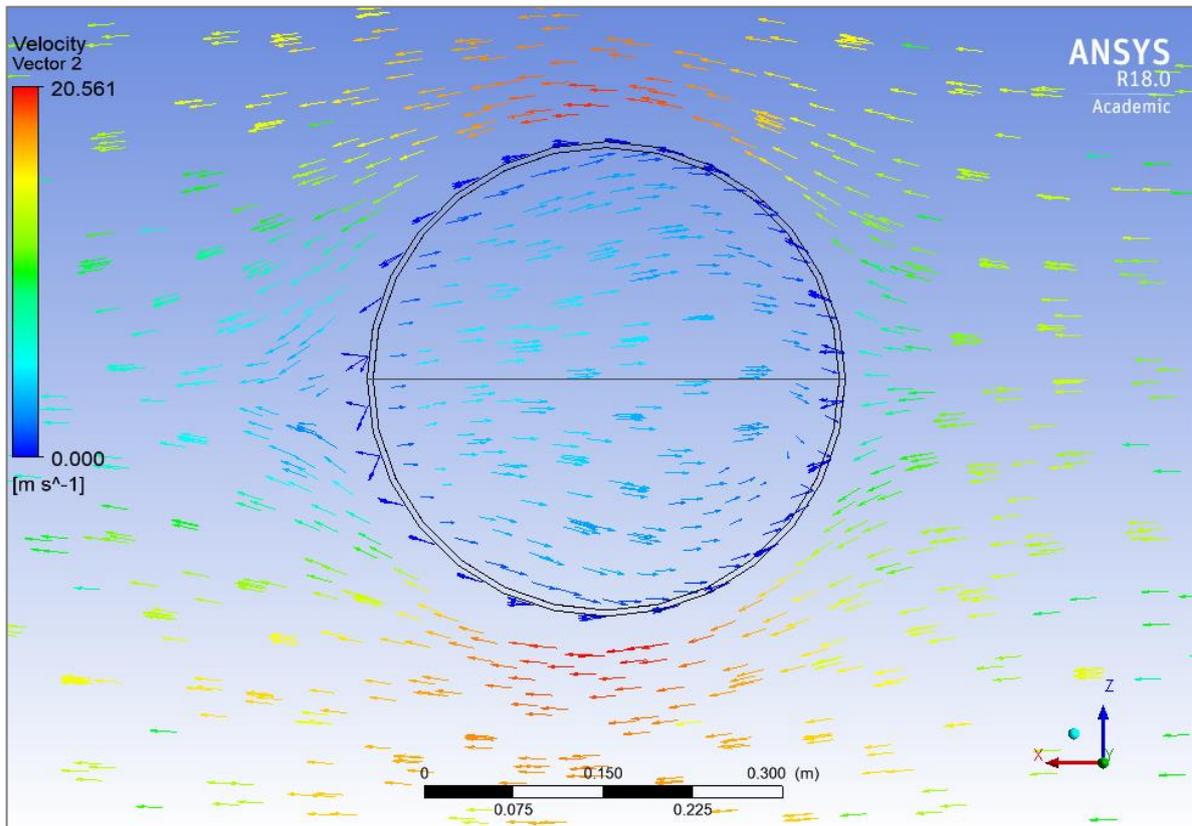
Figura 6.41: Líneas de Corriente en el plano medio del tanque.

La *Figura 6.42* muestra los vectores de velocidad en el plano medio del tanque, se puede observar el vórtice interno, y como la velocidad disminuye en la estela después de la superación

del obstáculo, como también se ve reflejado en las *Figuras 6.35* y *6.36*, evidenciado por valores de C_p cercanos a cero.



(a)



(b)

Figura 6.42: Vectores de velocidad. (a) en el plano medio del tanque, (b) sobre un plano a $0,45H$ del tanque.

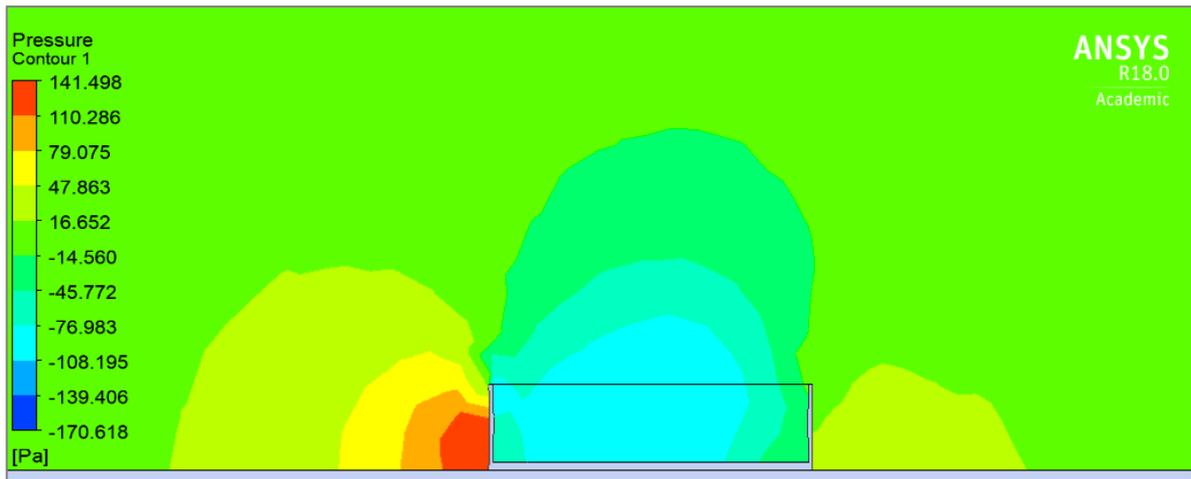


Figura 6.43: Distribución de presiones en el plano medio.

En la *Figura 6.43* muestra la distribución de presiones en el plano medio, se puede observar como el flujo a $0,6D$ del tanque aguas arriba se ve influenciado por la presencia del tanque.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7.1. INTRODUCCION

En el desarrollo de este trabajo se realizó un estudio de los principios básicos de la mecánica y la dinámica de fluidos para poder describir el flujo del viento y sus características, flujos en capa límite, turbulencia y números adimensionales. Para poder resolver problemas de flujo en capa límite en régimen turbulento es necesario encontrar las soluciones de las ecuaciones matemáticas que gobiernan su comportamiento, pero dada la complejidad y la cantidad de variables que controlan estos fenómenos, arribar a soluciones aceptables solo es posible a través de herramientas computacionales o de ensayos en túnel aerodinámico, los que muchas veces resultan costosos o difíciles de llevar a la práctica.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos mediante CFD de diferentes situaciones estudiadas experimentalmente para poder analizar la correlación entre ambas técnicas de estudio, computacionales y experimentales. Los estudios realizados comprendieron la modelación de tanques con techo en tándem y tanques sin techo en etapa constructiva.

Por otro lado, el uso de las técnicas computacionales permitió obtener la distribución de presiones sobre la superficie de los tanques. Dichas presiones definen los estados de carga bajo los que se encuentran sometidas estas estructuras debido a la acción del viento. De esta manera es posible evaluar la influencia que generan las presiones de viento en las estructuras, predecir efectos no deseados y realizar diseños adecuados.

7.2. RESUMEN DE CONTENIDOS

En esta sección se presenta un resumen de los principales temas tratados en cada capítulo. En el Capítulo 1 se fijaron los fundamentos que condujeron a la realización de la tesis, los objetivos planteados, la metodología de trabajo y el ámbito de desarrollo.

En el Capítulo 2 se describieron las principales características de las tipologías de tanques que se pueden encontrar en el campo y algunas consideraciones y especificaciones de diseño. Se dió un panorama general de los efectos que genera el viento, la distribución de presiones y algunas causas de colapso y falla de estas estructuras. También se presentó una descripción de la problemática en la región patagónica, las baterías de tanques que se observan y los vientos regionales.

El Capítulo 3 se enfocó en los ensayos en túnel de viento, se mencionaron las principales características de los mismos y los tipos de túneles que pueden encontrarse en la práctica. Se describieron los ensayos realizados por Cicerone (2011), Burgos (2012) y Hernández (2017) que se utilizaron para comparar con los resultados obtenidos en este trabajo.

En los Capítulos 4 y 5 se expusieron los conceptos teóricos sobre la dinámica de fluidos y ecuaciones asociadas. En el Capítulo 4 se definieron el flujo y algunos parámetros o números adimensionales que lo describen, como el Número de Reynolds y el Coeficiente de Presión. Los tipos de capa límite, características, turbulencia y modelos teóricos también se encuentran en este capítulo. En el Capítulo 5 se presentaron las ecuaciones matemáticas que definen estos fenómenos de flujo, conceptos sobre análisis numérico y algunos métodos de uso práctico (métodos de diferencias finitas y volúmenes finitos). Se describieron algunos modelos de turbulencia que se utilizan para resolver los problemas de flujo y se realizó la validación en CFD de un caso conocido, como el del cilindro en 2D, para dar inicio al uso del software.

En el Capítulo 6 se encuentran los resultados obtenidos de la modelación en CFD para diferentes configuraciones de tanques. En primer lugar se mostraron los resultados para tanques con techo cónico. Se realizó la modelación para un tanque aislado y luego para un tanque que obstaculiza el flujo a otro para poder comparar los efectos que genera el apantallamiento sobre el mapa de presiones. Los resultados fueron contrastados con los obtenidos en los ensayos de túnel de viento y con los obtenidos por otros autores. En segundo lugar se realizó la modelación del flujo sobre tanques sin techo para evaluar los efectos que se producen bajo esta configuración por

la aparición de vórtices en el interior del recipiente y en la modificación de las presiones inducidas. Los resultados fueron comparados con otros obtenidos en ensayos experimentales.

7.3. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas del presente trabajo.

7.3.1. CONCLUSIONES GENERALES

7.3.1.1. CONCLUSION PRINCIPAL

Se logró cumplir ampliamente con los objetivos propuestos en el inicio de este trabajo:

- ✓ Efectuar la simulación numérica del flujo del viento utilizando técnicas de fluodinámica computacional (CFD).
- ✓ Ajustar los modelos de turbulencia con los parámetros obtenidos de los ensayos experimentales realizados en túnel de viento.
- ✓ Obtener los perfiles de velocidad del viento.
- ✓ Determinar la distribución de presiones sobre un grupo de 2 tanques, tanto en aquellos que se encuentran directamente expuestos a la acción de viento así como también sobre los que sufren el efecto de apantallamiento.
- ✓ Obtener la envolvente de presiones sobre tanques de almacenamiento en etapa constructiva, es decir sin techo.
- ✓ Evaluar la influencia de los flujos producidos en el interior de los recipientes abiertos sobre las presiones generadas en las paredes.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos de la modelación computacional con los obtenidos empíricamente y con modelos teóricos.

7.3.1.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

1. La utilización del software resulta ventajosa para la modelación y resolución de problemas que se pueden presentar en la práctica profesional y que no se encuentran enmarcados dentro de las especificaciones, normas y reglamentos vigentes. Es posible modelar infinidad de configuraciones de estructuras, no solo de tanques, y obtener de esta forma una visión de los efectos producidos por el viento.

2. Una de las principales limitaciones del uso del software fue no poder crear discretizaciones del dominio más densas que las usadas como consecuencia de la utilización de una versión académica (ANSYS R18.0 Academic). El mallado del modelo es uno de los factores más importantes que afectan los resultados obtenidos. Esto queda demostrado en diferentes investigaciones realizadas por otros autores. Mientras mayor cantidad de elementos se obtengan en la discretización, mejor será la aproximación de los resultados, sin embargo para los fines de este trabajo se obtuvieron soluciones aceptables de los modelos estudiados.
3. Se logró representar la capa límite atmosférica y los resultados fueron similares a los obtenidos en el túnel de viento. Las curvas experimentales presentan ciertas diferencias con las obtenidas de la modelación, esto puede deberse, entre otros factores, a cómo se midieron las velocidades en el túnel, ya que el perfil de velocidades se modifica notablemente según nos acerquemos o nos alejemos de los tanques.
4. A pesar de que se utilizó uno de los modelos de turbulencia menos recomendados por la bibliografía, el cual se utilizó dada su sencillez de aplicación y control de parámetros, se lograron representar los ensayos en túnel de viento, razón por la cual este modelo resulta eficiente a la hora de estimar cargas de viento sobre los tanques desde el punto de vista de la ingeniería civil.
5. El parámetro y^+ , es una herramienta de control de CFD muy útil para lograr un tamaño de malla óptimo, si se mantiene este parámetro dentro los límites establecidos por las buenas prácticas, se logra que la modelación sea precisa en la estimación de las variables. Fluent pone a disposición este parámetro en el postproceso, lo cual resulta de gran ayuda para el usuario poco experimentado.

7.3.2. CONCLUSIONES PARTICULARES PARA TANQUES CON TECHO CÓNICO

1. La distribución cualitativa de coeficientes de presión obtenida en la superficie del tanque aislado coincide con la de otros autores y con los ensayos en túnel. Es decir, en la cara a barlovento las presiones son positivas, máximas en la zona media del cilindro del tanque, variables en altura y existe un gradiente de presión importante en

la zona de unión entre el cilindro y el techo. Los valores de los coeficientes de presión entre el punto de estancamiento y el inicio del desprendimiento de la estela son los que mejor se ajustan. En los laterales las presiones son de succión, son máximas en la zona media del tanque y se encuentran entre 80° y 100° con respecto al punto de estancamiento. En esta zona se observa una gran variabilidad entre los resultados obtenidos por diferentes autores pero coinciden en predecir donde se producen los máximos valores. En la cara a sotavento se observan valores de presión cercanos a cero y no existe prácticamente variabilidad en altura, en esta zona también se ven diferencias notables con resultados de otros autores. En el techo las presiones son de succión, máximas en el borde a barlovento y en el centro.

2. En la modelación del tanque apantallado las presiones se modifican tanto en magnitud como en el patrón de distribución. Las mayores diferencias se observan cuando la obstaculización se produce en la dirección de incidencia del viento, a medida que el tanque que genera el bloqueo se aparta de la dirección del flujo la distribución de presiones se acerca a la del tanque aislado. Las presiones máximas en el tanque con apantallamiento directo se generan en la parte superior del cilindro, a diferencia del resto de las orientaciones donde siguen apareciendo en la zona media.
3. Los valores de las presiones máximas en el tanque apantallado en la dirección de incidencia del viento son menores que en las otras direcciones y cuando se encuentra aislado. También se observa que los resultados obtenidos en los ensayos de túnel de viento son mayores que los logrados en la modelación con Fluent.

7.3.3. CONCLUSIONES PARTICULARES PARA TANQUES SIN TECHO

1. Se logró representar el vórtice interior que se genera por la ausencia del techo. En el modelo de Cicerone (2011) se puede visualizar claramente la desviación lateral del flujo dentro del tanque, dando lugar a la formación de dos vórtices en horizontales, simétricos respecto de la línea media del mismo. Esto está relacionado con la configuración del tanque, dado que en el modelo de Hernández (2017) este fenómeno no se presenta tan explícitamente. Esta evidencia y las diferencias de presiones en las tomas laterales de los resultados de Cicerone (2011), dan la pauta que el flujo pudo no haber sido perpendicular a la sección de prueba y dar lugar a la existencia de un solo vórtice horizontal, el cual se visualizó en los ensayos.

2. Para ambos modelos, tanto en el piso del tanque como en la pared interna a barlovento, las presiones se encuentran dentro del orden de las presiones externas en la cara expuesta al viento. Debido a la importancia de las succiones en la cara interna de la zona a barlovento del tanque las presiones producidas por el vórtice interior deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar el tanque, más allá de que las mismas solo puedan ocurrir en el corto plazo de la etapa constructiva.
3. El parámetro de Jensen en función de la longitud característica del obstáculo D , logra aproximar eficientemente la rugosidad del suelo del modelo Z_{OM} , en función de la rugosidad del prototipo Z_{OP} , para el caso en que no se cuente con la rugosidad que se utilizó en los ensayos.

7.4. RECOMENDACIONES

1. Queda pendiente la utilización y comparación de los distintos modelos de turbulencia disponibles, para los cuales se recomienda que el parámetro y^+ se encuentre dentro de estos límites para un mallado óptimo:
 - Modelo κ - ω : $y^+ < 1$
 - Modelo RSM: $y^+ > 11$
 - Modelo SST: $y^+ < 1$
2. Se recomienda para futuras investigaciones de pandeo de cascaras, el uso del módulo de estructuras de Ansys, ya que este permite realizar la interacción Fluido-Estructura FSI. La FSI toma las presiones simuladas con Fluent como cargas sobre la estructura en el módulo Static Structural. Este tipo de simulación se realiza mediante análisis de una vía o dos vías, a través del módulo System Coupling, la cual requiere de un experto en fluidos y otro en estructuras, dado que el conocimiento necesario es muy amplio.
3. Para lograr una mejor representación de los resultados se debería probar una discretización de la malla de volúmenes finitos más densa y utilizar diferentes modelos de turbulencia.

BIBLIOGRAFIA

- Burgos, C., Estudio fluidodinámico y de estabilidad en batería de tanques bajo cargas de viento, mediante modelación experimental y numérica, Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue, 2012.
- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles (2005). Acción del viento sobre las construcciones. CIRSOC 102. Buenos Aires.
- Chang, J. I. y Cheng-Chung, L. (2006). A study of storage tank accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 51-59
- Cicerone, J.E., Estudio de estabilidad y fluidodinámica en tanques de pared delgada frente a cargas de viento mediante modelación física y ensayos en túnel de viento, Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue, 2011.
- Falcinelli, O.A., Elaskar, S.A., Godoy, L.A., y Tamango, J. (2002). Efectos del viento sobre tanques y silos mediante CFD, *Mecánica Computacional*, 21, 256-273.
- Falcinelli, O.A., Elaskar, S.A., y Godoy, L.A. (2003). Influencia de la topografía sobre presiones por viento en tanques usando CFD, *Mecánica Computacional*, 22, 110-123.
- Fernández Diez, P. (2000-17). *Mecánica de Fluidos*, Pág. Internet: <http://es.pfernandezdiez.es/>
- Flores, F.G., y Godoy, L.A. (1998). Buckling of short tanks due to hurricanes, *J. Engineering Structures*, 20(8), 752-760.
- Grióni, M., Elaskar, S.A., Mirasso, A.E. (2016). Simulación de la acción del viento sobre un tanque de almacenamiento usando el código Fluent. *Mecánica Computacional Vol XXXIV*, pags.2047-2062, Córdoba 8-11 Noviembre.
- Greiner, R. (1998). *Cylindrical shells: Wind loading*. C.J. Brown, L. Nilssen (Eds.), *Silos*, 378-399 [Chapter 17], EFN Spon, London.
- Hernández, F. (2017). Evaluación numérica y experimental de inestabilidad de equilibrio por acción de viento de un tanque de almacenamiento de fluidos no anclado. Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue.
- Jaca, R.C., y Godoy, L.A. (2003). Colapso de un tanque metálico en construcción bajo la acción del viento, *RIDNAIC*, 3(1), 73-83.
- MacDonald, P.A., Kwok, K.C. and Colmes, J.H. (1988). Wind Loads on circular storage bins, silos and tanks. *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 31, 165-188.

- Mancinelli Nazareno, Capítulo 5, Modelos de turbulencia en FLUENT. Comparación de modelos BEM y CFD para un aerogenerador de eje vertical, Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires.2013
- Meseguer Ruiz, J, Perales, J.M., Sanz Andrés, A., Pindado, C. (2000). Aerodinámica de instalaciones aeroportuarias. Fundación AENA, ISBN: 84-95567-02-4.
- Palese, C. and Lassig, J.L. (2012). Exponente del perfil de la velocidad del viento en el departamento Confluencia, Neuquén, Argentina.
- Pashley, H. and Park, C. (2000). Computational fluid dynamics study of flow around floating-roof oil storage tanks, *J. Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, 86, 37-54.
- Portela, G. and Godoy, L.A. (2007). Wind pressures and buckling in grouped steel tanks. *Wind and Structures: An International Journal*, 10(1), 1-22.
- Portela, G. and Godoy, L.A. (2005). Shielding effects and buckling of steel tanks in tandem arrays under wind pressures. *Wind and Struct.: An International Journal*, 8, 325-342.
- Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill – 3° Edición. Bufalo USA. (ISBN 958-600-246-2)
- Tominaga, Y., Mochida, A., Shirasawa, T., Yoshie, R., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T. (2004). Cross Comparisons of CFD Results of Wind Environment at Pedestrian Level around a high-rise Building and within a Building Complex, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 63-70.
- Usmani, A., Rotter, J.M., Lamont, S., Sanad, A.M. y Gillie, M. (2001). Fundamental principles of structural behavior under thermal effects, *Fire Safety Journal*, 721-744.
- White, F.M. (2003). *Fluid Mechanics*. Mc Graw Hill – 5° Edición. (ISBN 84-481-4076-1).
- Wittwer, Adrian R., Moller, Sergio V. (2000). Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84 (2000) 307-320.