



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“COEFICIENTES DE PRESIÓN EN UN
HANGAR INFLABLE POR ACCIONES
DE VIENTO.”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. SHERLY JOANNA POOL BLANCO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017

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

AGRADECIMIENTOS

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

RESUMEN

Con el paso de los años, el empleo de estructuras de membrana se ha vuelto más recurrente, su aplicación en la ingeniería civil puede apreciarse en estructuras permanentes y temporales, tales como estacionamientos, salas de exhibición, cuerpos de almacenamiento para la industria e incluso como hangares en los aeropuertos.

En esta investigación, se presentan los coeficientes de presión generados por fuerzas externas de viento en un hangar inflable, obtenidos a través de la experimentación en el túnel de viento con un modelo rígido a escala. Esta estructura inflable se encuentra instalada y en funcionamiento en el aeropuerto de Budapest, Hungría; sin embargo, por ser un artículo de patente, solamente la empresa fabricante tiene los datos de diseño del mismo. El modelo fue ensayado en dos configuraciones: cerrado y abierto. Se obtuvieron los coeficientes de presión externos (C_{pe}), internos (C_{pi}) y netos (C_{pn}). Se estudiaron tres direcciones de viento, dos recomendadas por los códigos de diseño consultados 0° y 90° , respecto a la cresta del modelo, y una dirección intermedia a 45° . En la configuración cerrada en dirección a 0° , el coeficiente de presión externo de mayor magnitud fue de 1.81 (succión). Por otro lado, en la configuración abierta la dirección más desfavorable fue a 45° , con un coeficiente neto de 1.36 (empuje). Debido a que no todos los códigos de diseño vigentes cuentan con parámetros de diseño para estructuras de membrana y a que éstas poseen formas atípicas. Esta investigación, se considera como el inicio de un proceso iterativo para la definición de los valores de diseño de una estructura con esta misma geometría.

ABSTRACT

Over the years, the application of membrane structures in civil engineering has increased. They can be permanent or temporary structures and may be seen in places like parking lots, exhibition rooms, containers, hangars, and many other places.

In this research the pressure coefficients on an inflatable hangar due to wind external forces are presented. The pressure coefficients were obtained by using rigid models on wind tunnel tests. The actual inflatable structure is installed and is operating as a hangar in Budapest airport, Hungary. All the information about the inflatable hangar is private because it is a patented product. The rigid models were tested using two configurations: closed and open building. The externals, internals and net pressure coefficients were obtained in these experiments. The wind test directions were three: 0° and 90° respect to the model crest, as recommended by design codes, and 45° as an intermediate direction. The maximum external pressure coefficient in the closed configuration was 1.89 (suction). In the open configuration the most adverse direction was 45° and the maximum net pressure coefficient was 1.36 (push). Not all design codes have specifications for membrane structures due to their unusual and particular geometry. All the results obtained in this investigation are considered as the first step of an iterative process to define the design specifications of a structure with the similar geometric characteristics.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II.....	4
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
2.1 Historia de las estructuras de membrana.....	4
2.2 Materiales.....	5
2.3 Clasificación.....	5
2.3.1 Clasificación de acuerdo a su forma.....	6
2.3.2 Clasificación por el sistema de pretensado.....	7
2.4 Estructuras con paredes inflables.....	11
2.4.1 Estructuras inflables de alta presión.....	13
2.4.2 Estructuras inflables de baja presión.....	13
2.5 Análisis de las estructuras de membrana.....	15
2.6 Estudios previos de estructuras de membrana.....	16
2.7 Normas de diseño para las estructuras de membrana.....	19
2.8 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	20
CAPÍTULO III.....	22
METODOLOGÍA.....	22
3.1 Modelación.....	22
3.1.1 Semejanza geométrica.....	22
3.1.2 Semejanza cinemática.....	27

3.1.3 Semejanza dinámica.....	28
3.2 Instrumentación.....	28
3.3 Ensaye en el túnel de viento.	29
CAPÍTULO IV.....	34
RESULTADOS.....	34
4.1 Coeficientes de presión medios: configuración cerrada.....	35
4.1.1 Dirección 0°.....	36
4.1.2 Dirección 90°.....	38
4.1.3 Dirección 45°.....	39
4.1.4 Comparación entre códigos de diseño.....	41
4.2 Coeficientes de presión medios: configuración abierta.....	44
4.2.1 Dirección 0°.....	44
4.2.2 Dirección 90°.....	46
4.2.3 Dirección 45°.....	48
4.3 Comparación de los coeficientes de presión externos entre las dos configuraciones.....	50
4.3.1 Dirección 0°.....	51
4.3.2 Dirección 90°.....	51
4.3.3 Dirección 45°.....	52
4.4 Comparación entre resultados obtenidos experimentalmente y mediante CFD (Computational Fluid Dynamic). Configuración cerrada.....	53
4.4.1 Dirección 0°.....	53
4.4.2 Dirección 90°.....	54
4.5 Comparación entre resultados obtenidos experimentalmente y mediante CFD (Computational Fluid Dynamic). Configuración abierta.....	54
4.5.1 Dirección 0°.....	55
4.5.2 Dirección 90°.....	55
4.6 Deformada de la estructura.....	57

CAPÍTULO V	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1 Configuración cerrada.	59
5.2 Configuración abierta.....	60
5.3 Comparación entre coeficientes de presión externos en la configuración cerrada y abierta.	61
5.4 Recomendaciones.	62
APÉNDICE A.....	66
A1. Espaciamiento angular entre los puntos de medición de presiones.....	66
A2. Detalle de instrumentación para la experimentación en túnel de viento. 66	
APÉNDICE B.....	68
B1. Análisis de sensibilidad para definir tiempo y frecuencia de muestreo.	68
B2. Estabilización de los coeficientes de presión.....	70
APÉNDICE C.....	74
C1. Coordenadas en dimensiones del prototipo exteriores e interiores, con base en los puntos instrumentados en el modelo.	74
ANEXO I	83
I.I. Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UADY.	83
I.II. Equipos de medición para el túnel de viento.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estadio de las Olimpiadas de Múnich, 1972.	5
Figura 2.2. Clasificación de las estructuras de membrana.....	6
Figura 2.3. Estructura con forma de paraboloides.....	6
Figura 2.4. Edificio con forma ondulada.....	7
Figura 2.5. Anfiteatro en forma de arco.....	7
Figura 2.6. Carpa con forma cónica.	7
Figura 2.7. Torre de refrigeración, Schmiehausen (permanente).	8
Figura 2.8. Edificio Festo, Stuttgart (alta presión, estructura permanente).	8
Figura 2.9. Edificio "Buildair", Barcelona (baja presión, estructura temporal).	9
Figura 2.10. Cubierta de cancha de tenis (estructura permanente).....	9
Figura 2.11. Techo inflado con una cámara de presión.	9
Figura 2.12. Globo de gran altitud (estructura flotante).	10
Figura 2.13. Cadena de aire (Stuttgart, 1999).	10
Figura 2.14. Paracaídas de doble ala con guía automática de vuelo (Stuttgart, 2003).	11
Figura 2.15. Hangar inflable.....	11
Figura 2.16. Diagrama del sistema soportado por aire.....	14
Figura 2.17. Diagrama del sistema inflado por aire.	14
Figura 2.18. Pabellón inflable de 250m ² formado por el ensamble de tubos de baja presión, Barcelona, 2002 (exhibición móvil).	15
Figura 3.1. Idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.....	24
Figura 3.2. Distribución de puntos de medición.	25
Figura 3.3. Orificios para medición de presiones internas.	25
Figura 3.4. Orificios para medición de presiones externas.	25
Figura 3.5. Distribución de orificios de las tapas frontal y posterior.....	26
Figura 3.6. Isométrico 3D del modelo.	26

Figura 3.7. Modelo completo (vista frontal).....	27
Figura 3.8. Modelo completo (vista en planta).....	27
Figura 3.9. Modelo en configuración abierta instrumentado.	29
Figura 3.10. Direcciones de estudio.	30
Figura 3.11. Prueba del modelo en configuración cerrada a 0°.	31
Figura 3.12. Prueba del modelo en configuración cerrada a 90°.	31
Figura 3.13. Prueba del modelo en configuración cerrada a 45°.	31
Figura 3.14. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración cerrada a 0°.	32
Figura 3.15. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración cerrada a 90°.	32
Figura 3.16. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración abierta a 45°.	33
Figura 4.1. Franjas extremas y centrales perpendiculares a la generatriz del modelo.	35
Figura 4.2. Franja central, paralela a la generatriz del modelo.	35
Figura 4.3. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 0°.	36
Figura 4.4. Coeficientes de presión externos para los puntos en la tapa frontal, configuración cerrada, dirección 0°.	37
Figura 4.5. Coeficientes de presión externos para los puntos en la tapa posterior, configuración cerrada, dirección 0°.	37
Figura 4.6. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 90°.	38
Figura 4.7. Coeficientes de presión externos para los puntos en ambas tapas, configuración cerrada, dirección 90°.	39
Figura 4.8. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 45°.	40

Figura 4.9. Coeficientes de presión externos para los puntos en tapa frontal, configuración cerrada, dirección 45°	40
Figura 4.10. Coeficientes de presión externos para los puntos en tapa trasera, configuración cerrada, dirección 45°	41
Figura 4.11. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franja central, dirección 0°	42
Figura 4.12. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franja central, dirección 90°	43
Figura 4.13. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franjas extremas, dirección 90°	44
Figura 4.14. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 0°	45
Figura 4.15. Coeficientes de presión internos para los puntos en el modelo, configuración abierta, dirección 0°	45
Figura 4.16. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 0°	46
Figura 4.17. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 90°	47
Figura 4.18. Coeficientes de presión internos para los puntos en dentro del modelo, configuración abierta, dirección 90°	47
Figura 4.19. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 90°	48
Figura 4.20. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 45°	49
Figura 4.21. Coeficientes de presión internos para los puntos en dentro del modelo, configuración abierta, dirección 45°	49
Figura 4.22. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 45°	50

Figura 4.23. Coeficientes de presión externos de ambas configuraciones, dirección 0°. 51

Figura 4.24. Coeficientes de presión externos de ambas configuraciones, dirección 90°. 52

Figura 4.25. Coeficientes de presión externos, ambas configuraciones, dirección 45°. 52

Figura 4.26. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración cerrada, dirección 0°. 53

Figura 4.27. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración cerrada, dirección 90°. 54

Figura 4.28. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración abierta, dirección 0°. 55

Figura 4.29. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración abierta, dirección 90°. 56

Figura 4.30. Deformada de la estructura. Vista isométrica. 57

Figura 4.31. Deformada de la estructura. Vista frontal. 58

Figura 4.32. Comparación entre el modelo no deformado y el deformado. 58

Figura A.1.Enumeración de los puntos de medición en el modelo. 67

Figura A.2. Enumeración de los puntos de medición de las tapas del modelo. 67

Figura B.1. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración cerrada, dirección 0°. 70

Figura B.2. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración cerrada, dirección 90°. 71

Figura B.3. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración abierta, dirección 0°. 71

Figura B.4. Estabilización de los coeficientes de presión interior, configuración abierta, dirección 0°. 72

Figura B.5. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración abierta, dirección 90°. 72

Figura B.6. Estabilización de los coeficientes de presión interior, configuración abierta, dirección 90°.....	73
Figura C.1. Coordenadas globales del prototipo en planta y frontal, respectivamente.	74
Figura I.I. Zona de rectificación y pantallas correctoras de flujo.	83
Figura I.II. Zona de Contracción.	84
Figura I.III. Cámara de ensayos.	84
Figura I.IV. Difusor.	85
Figura I.V. Zona de ventilador (vista interior).	85
Figura I.VI. Micromanómetro con tubo de Pitot.	86
Figura I.VII. Multisensor de Presiones marca Esterline, modelo 9116.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros para semejanza geométrica.	23
Tabla A.1. Espaciamiento angular de los puntos de medición de presiones para la investigación.	66
Tabla B.1. Resumen de datos obtenidos del análisis de sensibilidad.	68
Tabla C.1. Coordenadas exteriores en dimensiones del prototipo, dimensiones en mm.	75
Tabla C.2. Coordenadas interiores en dimensiones del prototipo, dimensiones en mm.	79

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Debido al sedentarismo, el ser humano se preocupó por construir espacios para su resguardo y disposición de actividades utilizando los recursos que tenía a su alcance. Muchos grupos prehistóricos construyeron sus primeras “chozas” usando pieles de animales. Con base en esta idea y con la invención de nuevos materiales y tecnologías, el uso de textiles es cada día más común en las edificaciones del presente. Permitiendo crear espacios no solamente versátiles y cómodos, sino también agradables a la visión.

La principal característica del uso de membranas textiles como parte de una estructura, es la longitud de claro que permiten tener a las edificaciones, mismas que pueden ser cubiertas totalmente de una forma económica y sin soporte interno. Las construcciones de este tipo transforman las fuerzas externas a tensión (Seidel 2009).

En los últimos años, las estructuras de membrana pueden verse en los techos de las paradas de los autobuses públicos, techos de teatros, estadios e incluso en algunas zonas de los aeropuertos (Lang et al. 2015).

1.2 Planteamiento del problema.

En años recientes, la aplicación de las estructuras de membrana en las construcciones de diversos sectores, ha permitido el reemplazo, en algunos casos, de materiales como el acero y concreto. Con el empleo de este tipo de estructuras no sólo se acortan los largos períodos de construcción, sino también se permite un fácil manejo, instalación y traslado de las mismas.

Para el diseño de las estructuras convencionales, en la práctica se ha establecido que la forma de la estructura puede ser determinada primero y después se realiza el cálculo de los esfuerzos internos o pretensiones, sin embargo, esto no es posible con las estructuras de membrana. Debido a la rigidez a flexión de casi cero y la eficiencia del material solamente a tensión, el diseño de la forma está absolutamente interconectado con el diseño de las pretensiones. Por lo que cada una puede ser comprendida como un sistema de fuerzas en equilibrio, las cuales definen su forma (Lang et al. 2015).

La particularidad de las estructuras de membrana radica en que la membrana trabaja estructuralmente (junto a cables y estructuras sólidas) y no sólo cubre la estructura soportante; mezcla formas cóncavas, capaces de resistir las cargas verticales (como la nieve) y convexas, que hacen frente al viento, resistiendo las fuerzas debidas a presiones y succiones (Maldonado 2009).

En el cálculo de estructuras ligeras, las acciones por viento y nieve son las cargas predominantes que rigen el diseño. Las acciones debidas a la nieve imponen un cierto ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de las superficies cubiertas. Por otro lado, la determinación de las acciones de viento para dicho tipo de estructuras se complica debido a las geometrías que éstas adoptan y los grandes claros para los cuales son diseñadas. Los códigos sugieren la utilización de resultados obtenidos en estructuras semejantes, bajo recomendaciones de expertos en la materia o en el mejor de los casos, la realización de pruebas en un túnel de viento (Gamboa Marrufo et al. 2011).

En las últimas décadas, las estructuras de membrana han sido empleadas como una forma alternativa para construir; sin embargo, el proceso de investigación y experimentación continúa en desarrollo. Por la geometría particular de cada proyecto, estos tienen requerimientos y especificaciones diferentes y aunque existen empresas dedicadas al diseño, fabricación e instalación de las estructuras

de membrana, en los códigos de diseño de nuestro país, la información técnica o especializada respecto a dichas estructuras no es extensa.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Determinar experimentalmente los coeficientes de presión **media**, así como la configuración de la deformada de un modelo a escala de una estructura de membrana inflable, sometida a un flujo de aire laminar.

Comentado [SP1]: Le quité "externos e internos"

1.3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar la modelación para los ensayos en el túnel de viento.
- Construir un modelo rígido a escala que represente una estructura de membrana inflable (hangar) para hacer ensayos en el túnel de viento.
- Obtener los coeficientes de presión externos, internos y netos del modelo respecto a tres diferentes direcciones del flujo, y en dos configuraciones del hangar, abierto y cerrado.
- Presentar la configuración deformada de la estructura obtenida en colaboración con el Dr. Krisztián Hincz¹, utilizando los coeficientes de presión netos obtenidos experimentalmente.

¹ Profesor investigador de la Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, Departamento de Mecánica Estructural.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Historia de las estructuras de membrana.

Las estructuras de membrana son conocidas por ser superficies de paredes muy delgadas y flexibles, para las cuales, su forma y estabilización son proporcionadas por pretensiones. Tienen la ventaja de ser desmontables, de fácil transportación e instalación, y pueden ser de uso permanente o temporal (Oñate y Kröplin 2005).

Los datos de la aplicación de las estructuras de membrana como nuevas tecnologías, apuntan a partir del año 1957 cuando el arquitecto alemán Otto Frei (1925-2015) fundó el Centro para el Desarrollo de Estructuras Ligeras en la ciudad de Berlín, dentro del cual dedicó mucho de su tiempo para la creación de estructuras tensadas complejas. En ese mismo año, en España se fundó la Asociación Internacional para Carpas y Estructuras Espaciales (The International Association for Shell and Spatial Structures, IASS) donde se reunieron profesionistas interesados en el desarrollo de domos y otro tipo de estructuras, que hasta ese tiempo se realizaban en su mayoría con concreto. Sin embargo, a principios de los sesentas, la utilización de estructuras de membrana comenzó a sustituir paulatinamente el costoso proceso constructivo por emplear concreto. El pabellón alemán para la EXPO de 1968 en Montreal y los techos tensados del estadio utilizado para las Olimpiadas de Múnich (Figura 2.1), fueron diseñados por el arquitecto Otto Frei; estas edificaciones fueron punto de partida para la siguiente generación de estructuras espaciales, mediante el uso de acero, lonas de PVC y cables de tensión (Revista ARQHYS.com, 2012).

Comentado [SP2]: Eliminé la parte que dice .”La pretensión de las membranas estructurales puede obtenerse por un sistema externo o por presurización interna.”, ya que se repetía más adelante.



Figura 2.1. Estadio de las Olimpiadas de Múnich, 1972.

2.2 Materiales.

Las estructuras de membrana están constituidas por un tejido y un revestimiento para protección e impermeabilización. Existen de distintas calidades y colores. Las combinaciones más conocidas son PTFE-Glass (fibra de vidrio), Silicone-Glass y PVC Polyester, siendo esta última, la más económica y de aplicación más frecuente (Maldonado 2009).

2.3 Clasificación.

Existe una diferencia entre autores para establecer un criterio al momento de clasificar las estructuras de membrana, algunos lo hacen de acuerdo a su forma geométrica alcanzada y otros, de acuerdo al sistema de pretensión utilizado para su estabilización (Figura 2.2).

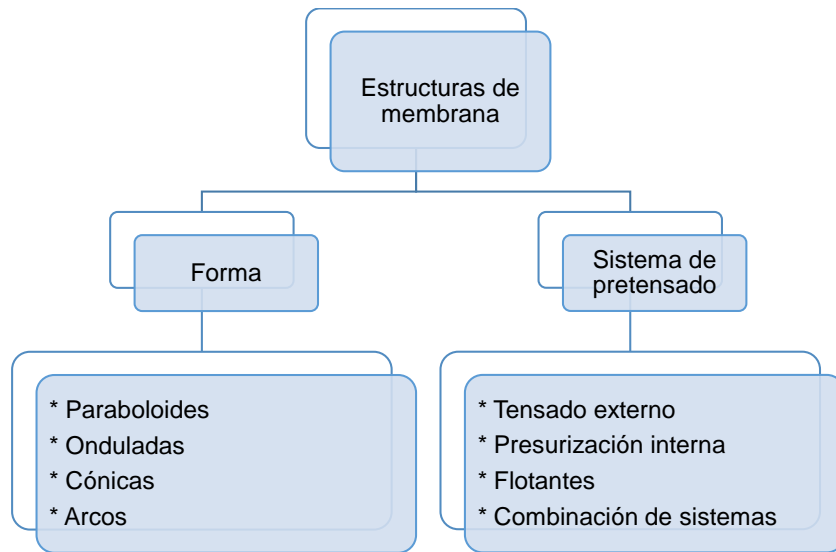


Figura 2.2. Clasificación de las estructuras de membrana.

2.3.1 Clasificación de acuerdo a su forma.

Existe una gran cantidad de formas geométricas que pueden tomar este tipo de estructuras, según Hernández et al. (2010), por lo general pueden clasificarse en: paraboloides, onduladas, arcos y cónicas (Figuras 2.3-2.6).



Figura 2.3. Estructura con forma de paraboloide.



Figura 2.4. Edificio con forma ondulada.



Figura 2.5. Anfiteatro en forma de arco.



Figura 2.6. Carpa con forma cónica.

2.3.2 Clasificación por el sistema de pretensado.

La pretensión puede ser por un sistema externo a tensión o por una presurización interna. La variación en la construcción de acuerdo al sistema de pretensado puede ser clasificada según Kröplin (2005) en:

Comentado [SP3]: Eliminé la parte que dice "La pretensión de las membranas estructurales puede obtenerse por un sistema externo o por presurización interna." Y "Tienen la ventaja de ser desmontables, de fácil transportación e instalación, y pueden ser de uso permanente o temporal"

A) Estructuras de membrana permanentes con pretensión externa.

La tensión de la membrana es externa, normalmente se conforma por cables, puntales y vigas (Figura 2.7).



Figura 2.7. Torre de refrigeración, Schmiehausen (permanente).

B) Estructuras de membrana con paredes inflables permanentes y temporales.

Las paredes de la estructura pueden ser infladas con alta o baja presión (Figuras 2.8 y 2.9). Las primeras probablemente son presurizadas excediendo 1 bar del refuerzo requerido por el material de la membrana. Mientras que, en las segundas, es aproximadamente 50 mbar. La presión es inyectada de forma permanente por un “soplador” capaz de mantener erguida la estructura. (1 bar es aproximadamente 1 atm o 100,000 Pa).



Figura 2.8. Edificio Festo, Stuttgart (alta presión, estructura permanente).



Figura 2.9. Edificio "Buildair", Barcelona (baja presión, estructura temporal).

C) Estructuras con volumen total de gas.

La presión de aire debe mantenerse permanente para la estabilidad de la estructura, por lo que las puertas son diseñadas con doble cerradura de presión (Figura 2.10). Otra forma de cubrir totalmente el espacio interior es solamente inflar el techo (Figura 2.11).



Figura 2.10. Cubierta de cancha de tenis (estructura permanente).

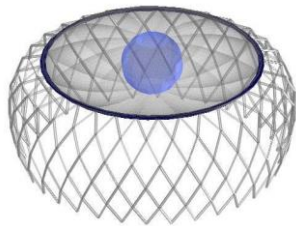


Figura 2.11. Techo inflado con una cámara de presión.

D) Estructuras flotantes.

El espacio interior de estas estructuras es llenado con un gas más ligero que el aire, lo que provoca que la estructura flote (Figura 2.12). Este sistema depende de la diferencia entre densidades del medio interno y externo. Uno de los gases más utilizados para este tipo de estructuras es el helio, el cual, por ejemplo, puede elevar aproximadamente 1 kg usando 1m³.



Figura 2.12. Globo de gran altitud (estructura flotante).

E) Combinaciones Interesantes.

Para obtener una estructura óptima, los diferentes métodos de pretensado pueden ser combinados. Por ejemplo: combinación de globos de gran altitud conectados en cadena y cubiertos por una superficie lisa aerodinámica; el conjunto puede volar por el control de los motores en cada segmento (Figura 2.13).



Figura 2.13. Cadena de aire (Stuttgart, 1999).

Otro ejemplo, es la combinación inteligente de una membrana pretensada externamente y una inflada, lo que proporciona una mejor estabilidad, así como control de vuelo (Figura 2.14).



Figura 2.14. Paracaídas de doble ala con guía automática de vuelo (Stuttgart, 2003).

2.4 Estructuras con paredes inflables.

Dentro de la clasificación de las estructuras de membrana, se encuentran las estructuras inflables, las cuales también son livianas, flexibles, alcanzan su equilibrio mediante la tensión y son fáciles de montar y desmontar. Difieren de otras por contener aire dentro de sus elementos estructurales, lo que provoca presión en sus paredes. El aire contenido permite tomar la forma esperada, y proporciona estabilidad y resistencia a la estructura (Buildair, Engineering and Architecture s.f.) (Figura 2.15).



Figura 2.15. Hangar inflable.

Una estructura inflable se conforma por una membrana exterior flexible, la cual contiene un fluido en su interior (en general aire o helio). La función del fluido interior es mantener la membrana exterior bajo esfuerzos. Su forma final y resistencia estructural depende de la resistencia de la membrana externa y el patrón de diseño que se haya elegido. El esfuerzo de la membrana externa está directamente relacionado con la presión del aire que se tiene en el interior y el volumen entre membranas externas (Marcipar et al. 2005).

El empleo de las estructuras con paredes inflables se ha incrementado en los últimos años en ámbitos arquitectónicos, en la ingeniería civil, en la aeronáutica, así como para estudios en el espacio. Los ejemplos palpables de estructuras inflables son: estructuras temporales y plegables para cubrir grandes espacios o soportar otros elementos, techos o cascarones permanentes con un alto grado de transparencia, construcciones móviles como una casa temporal para apoyo logístico a misiones civiles (desastres naturales o situaciones de rescate), en la construcción de estructuras como túneles y presas, en antenas terrestres o para el espacio, en aeronaves extremadamente ligeras, entre otros ejemplos. En aplicaciones para la ingeniería civil, las estructuras inflables son muy competitivas debido a su peso mínimo, facilidad para ensamblar y desensamblar, y debido a que permiten una transportación rápida y necesidad mínima de mano de obra y mantenimiento (Marcipar et al. 2005).

Como se mencionó anteriormente, las estructuras con paredes inflables pueden ser de dos tipos: con baja y alta presión. De acuerdo a Marcipar et al. (2005) se describen a continuación.

2.4.1 Estructuras inflables de alta presión.

La presión excede a 1 bar. Este tipo de estructuras se forma por el ensamble de tubos presurizados de alta presión para formar un solo cuerpo. Tienen la desventaja de que la reparación y mantenimiento son costosos.

2.4.2 Estructuras inflables de baja presión.

Tienen una presión menor a 50 mbar. Son ideales para cubrir grandes áreas, se adaptan fácilmente a cualquier forma de diseño, tienen un mínimo requerimiento de mantenimiento y toman en cuenta las pérdidas de aire a través de los poros del material y las costuras. La inclusión del aire en éstas puede ser de dos tipos: sistema soportado por aire y sistema inflado por aire.

A) Sistema soportado por aire.

El espacio interior se genera a partir de un perímetro de membrana completamente cerrado y es inflado con aire de baja presión. Existen áreas con más de 30,000 m² cubiertas con dicho sistema. Es muy común, pero tiene ciertas desventajas: se necesita un exceso de volumen de aire para mantener la cubierta, requiere el diseño de un acceso complejo para asegurar la estabilización del espacio interior, debido al contacto de la membrana con el aire frío o caliente se forman gotas condensadas que caen en forma de lluvia dentro del espacio cubierto, es difícil de mover a otro lugar debido al anclaje necesario para apoyar la fuerza de la membrana, entre otros (Figura 2.16).

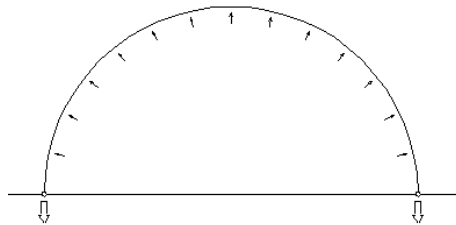


Figura 2.16. Diagrama del sistema soportado por aire.

B) Sistema inflado por aire.

También conocido como de doble membrana. Los textiles utilizados, son diseñados para soportar acciones externas como el fuego o agentes climáticos. Este sistema se conforma por tubos de diferentes materiales textiles rellenos de aire de baja presión. El diámetro de los tubos depende de las necesidades del proyecto y las dimensiones del espacio a cubrir. La presión de inflado varía entre 5-15 mbar de acuerdo a la rigidez estructural requerida; dicha presión, puede ser obtenida a partir de ventiladores simples de baja producción de ruido, por lo que no requiere el uso de compresores de aire y equipos de inflado caros o ruidosos. (Figuras 2.17 y 2.18).

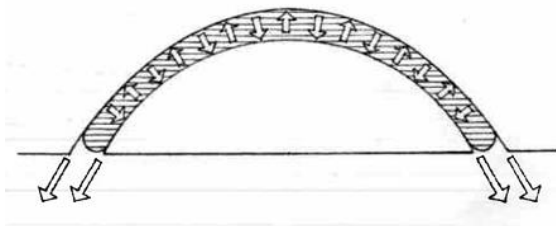


Figura 2.17. Diagrama del sistema inflado por aire.



Figura 2.18. Pabellón inflable de 250m² formado por el ensamble de tubos de baja presión, Barcelona, 2002 (exhibición móvil).

2.5 Análisis de las estructuras de membrana.

Cuando se efectúa la labor del diseño estructural de cualquier edificación, es necesario considerar todas aquellas cargas a las cuales la estructura estará sujeta. Por lo general, las cargas contempladas en el diseño de cualquier estructura son: cargas muertas, vivas, sísmicas, viento, nieve, entre otras. Al realizar un diseño por cargas de viento, se debe considerar el cálculo de las cargas estáticas equivalentes. Por lo que es importante conocer los coeficientes de presión debidos al embate del flujo de viento.

De forma general, Hernández et al. (2010) propone dos procedimientos para el análisis de cubiertas flexibles o deformables:

- a) Por medio de pruebas experimentales en un túnel de viento con modelos aerolásticos.
- b) Utilizando software especializado basado en Dinámica Computacional de Fluidos (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Cuando los coeficientes de presión se calculan de manera experimental en un túnel de viento, por simplicidad, los modelos pueden ser rígidos, ya que se puede considerar que las deformaciones reales de la membrana en condiciones de trabajo no son muy grandes, tales que puedan influir en el flujo transversal y modificar los

Comentado [SP4]: Cambié el orden de los párrafos

coeficientes de presión. Sin embargo, es mejor la utilización de modelos flexibles, formando la cubierta con material textil de propiedades similares a la estructura real. Las pruebas en un túnel de viento pueden reproducir cualquier efecto por desprendimiento de vórtices creado por la estructura y que se deben considerar en el análisis (Hernández et al. 2010).

Los túneles aerodinámicos (túneles de viento), son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas, para medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y generalmente el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante (Meseguer 2001).

Cuando el enfoque es conocer las fuerzas externas sobre una edificación, al emplear modelos rígidos, se hace énfasis en la similitud geométrica, después de seleccionar una escala. Las dimensiones de modelo están definidas por las dimensiones de la sección de pruebas del túnel de viento a utilizar (Puerta 2008).

2.6 Estudios previos de estructuras de membrana.

- Dietz et al. (1969) ensayaron en túnel de viento 17 diferentes estructuras inflables de membrana simple, 6 construidas con telas porosas y 11 con no porosas. Igualmente experimentaron 19 estructuras de doble membrana. La variación entre modelos radicó en las alturas y en su forma (elipsoidal o cilíndrica). Estudiaron a una velocidad estable por arriba de 110 millas/hora (aproximadamente 49 m/s). Sus datos reportados incluyen la resistencia a flexión de una viga inflable, vibraciones para las estructuras estudiadas, efecto del viento en los anclajes y los factores para mejorar la estabilidad de las estructuras de doble membrana. Algunas conclusiones fueron las siguientes: la porosidad afecta características como el levantamiento, el arrastre, la deflexión y las fuerzas aerodinámicas para las estructuras de membrana simple; la mayor deflexión fue en la parte frontal (barlovento) de la membrana; para

las estructuras de doble membrana, un incremento en el tamaño de la celda, aumenta la rigidez de la membrana y por ende sufre una menor deflexión, igualmente la aplicación de líneas de refuerzo en este tipo de membranas proporciona una mejor resistencia para prevenir deformaciones excesivas ante fuerzas de viento altas. El volumen interno de la estructura, la presión y tamaño de las celdas son factores importantes que afectan la estabilidad de la estructura.

- Kawamura y Kiuchi (1986) experimentaron en túnel de viento modelos ejemplificando la respuesta de una estructura inflable ante fuerzas de viento. Construyeron dos modelos rígidos y dos flexibles, con dos variaciones de altura para cada caso. En los modelos rígidos midieron la presión media y la fluctuación del viento. En los flexibles investigaron el comportamiento de la membrana. Los coeficientes de presión media para los modelos de poca altura con $H/L = 0.1$ y 0.2 variaron de -0.71 a 0 y -0.79 a 0 respectivamente; mientras que para los modelos de mayor altura fueron de -1.2 a 0.6 . En conclusión, la distribución de los coeficientes de presión media para los modelos de poca altura fue aproximadamente la misma. Así mismo, el comportamiento de la membrana tuvo algunos modos mixtos y existió un tiempo de desfase entre la presión del viento y la respuesta de la membrana.

- Puerta (2008) construyó un modelo rígido de acrílico ejemplificando una velaria, el cual instrumentó con 48 puntos para medir presiones, colocando 24 puntos en la parte superior y 24 en la parte inferior. Los ensayos se realizaron con flujo de viento turbulento y laminar; tomando mediciones cada 15° , con velocidades de viento de 10.85 m/s y 14.45 m/s. De estos ensayos, se tomó la dirección más desfavorable para el análisis de la velaria; resultando ser a 60° a partir del eje para flujo turbulento y 150° para flujo laminar.

- Gamboa Marrufo et al. (2011) obtuvieron los coeficientes de presión de un modelo impreso en 3D de una estructura consistente en una red de cables soportada por un arco y cubierta con una membrana, usaron una escala de 1:260

(385 mm diagonalmente y 71 mm de altura). Estudiaron tres direcciones con respecto a la arista del arco de soporte: perpendicular, paralela y a 45° , durante 120 segundos y velocidades de viento de 20 y 25 m/s, por cada ensaye. La dirección de estudio más desfavorable (tanto para presiones positivas como negativas) resultó ser cuando la dirección del flujo estuvo a 45° , el valor absoluto máximo de succión fue mayor respecto al de empuje, -1.50 contra 0.40. Los valores de las presiones medias medidas fueron bajo un flujo de aire laminar y no consideraron los efectos de la capa límite.

- Canavesio y Natalini (s.f.) elaboraron un modelo a escala de 1:150 con un borde rígido con geometría de un paraboloides hiperbólico de planta circular. La velocidad de viento máxima fue 25 m/s y tres direcciones de estudio 0° , 45° y 90° . El prototipo se construyó de madera, fibra de vidrio y resina poliéster; se implementaron 48 puntos de medición de presión en un cuadrante del modelo y por simetría se obtuvieron mediciones para el resto de la superficie. Con el fin de considerar el efecto del número de Reynolds que normalmente se produce sobre superficies curvas en túneles de baja velocidad, variaron el acabado exterior del modelo, siendo liso y rugoso, para este último, se adhirió arena de granulometría uniforme a la superficie del modelo. Se observó que las diferencias en la distribución de los coeficientes de presión en ambos casos no son relevantes, siendo los valores máximos para la dirección a 45° de 0.05 y 0.07 entre el de textura lisa y rugosa, respectivamente, por lo que no es necesario simular el efecto del número de Reynolds.

- Hincz y Gamboa Marrufo (2015) ensayaron en el túnel de viento dos modelos rígidos que ejemplificaban una estructura de membrana tensada, uno sin deformaciones por no estar sometido a ninguna carga y otro con desplazamientos por cargas de viento; para poder observar la variación en los coeficientes de presión. El modelo deformado fue determinado usando el método de relajación dinámica usando los datos de coeficientes de presión del primer modelo y la aplicación del

código de diseño Europeo (CEN, 2005). La escala para ambos modelos fue 1:30 y fueron impresos en 3D. Cada ensaye fue de 120 segundos a velocidades de 20 y 25 m/s. Los coeficientes de presión en el modelo no deformado difirieron significativamente de los obtenidos en el modelo deformado; por ejemplo, el máximo valor del coeficiente positivo del modelo deformado (0.41) es el doble respecto al no deformado (0.20).

2.7 Normas de diseño para las estructuras de membrana.

A) Norma europea.

El prototipo de esta investigación fue un hangar inflable ubicado en el aeropuerto de Budapest Hungría; mismo que fue diseñado, fabricado e instalado por la empresa Buildair, basándose en la norma UNE-EN 13782:2005 “Estructuras Temporales. Carpas. Seguridad”. El objeto y campo de aplicación de esta norma es: “Especificar los requisitos de seguridad que deben observarse durante el diseño, el cálculo, la fabricación, la instalación, el mantenimiento, la utilización, la verificación y los ensayos de las carpas móviles y temporales que tengan una superficie en planta superior a 50 m²”. Estos requisitos de seguridad buscan proteger a las personas y a los objetos contra los daños derivados del diseño, la fabricación y la explotación de estas estructuras.

B) Norma estadounidense.

ASCE 17-96 “Air-Supported Structures”. Proporciona los criterios mínimos para el diseño y operación de las estructuras soportadas por aire, que sean independientes o adjuntas a otra estructura. Se analizan los requisitos de materiales, sistemas auxiliares y componentes, así como la necesidad de experimentar por agencias de

investigación calificadas. Esta norma también explica la determinación de las cargas específicas de acuerdo con el código de construcción aplicable y el método de análisis usado para determinar el efecto de las cargas en cada elemento de la estructura.

C) Norma mexicana.

Respecto a las normas mexicanas no existen requerimientos específicos para las estructuras inflables debido a la novedad del tema. Sin embargo, en el Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (2008); en el apartado 4.4.6 "Respuesta dinámica de cubiertas deformables con forma cónica" hace referencia a dicho tipo de tenso estructuras. También, de forma general, se mencionan las direcciones de viento a experimentar en un túnel de viento para cubiertas semicirculares, las cuales son 0° y 90° .

2.8 Conclusiones de la revisión de la literatura.

Debido a que las estructuras inflables son un tema que hace unos años empezó a desarrollarse para el ámbito de la ingeniería civil, son contadas las publicaciones de ensayos en túneles de viento para estas estructuras en específico. Además, cada una comprende una geometría en particular. Sin embargo, son fabricadas con los mismos materiales que las estructuras con pretensión externa para las cuales, la investigación ha sido más frecuente. En la bibliografía consultada se observa que, por la particularidad que tienen las estructuras de membrana de poseer formas atípicas con respecto a las estructuras mencionadas en códigos de construcción, es necesario realizar investigación, tanto de carácter estático como dinámico. Por ejemplo, la determinación de los coeficientes de presión debido a fuerzas de viento bajo ensayos experimentales.

A pesar de que ya existen empresas dedicadas a la fabricación e instalación de las estructuras inflables, sus datos de diseño quedan fuera del alcance de personas ajenas a las mismas.

Las cargas de viento y nieve son las cargas más críticas para las estructuras inflables. La presente investigación consideró únicamente las fuerzas externas por viento a través de los coeficientes de presión en el hangar inflable de geometría definida.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la experimentación en el túnel de viento, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán del modelo rígido a escala que representa un hangar inflable. Dicho procedimiento, fue dividido en las siguientes fases: (1) modelación, (2) instrumentación y (3) ensaye en túnel de viento.

3.1 Modelación.

La modelación, es la fase en la cual se definen los parámetros a emplear en la experimentación, con el fin de trasladar el fenómeno observado a un laboratorio de estudio. En una experimentación donde se involucran los efectos de las fuerzas de viento, es importante que las características físicas del modelo sean lo más próximas a la estructura prototipo, de igual forma, las características dinámicas del flujo en cuestión deben ser semejantes al entorno de estudio.

De acuerdo con los principios del análisis dimensional y de las semejanzas habituales en la Mecánica de Fluidos, la realización de un ensayo en túnel de viento con un modelo a escala de la estructura prototipo, requiere la existencia entre éstos de semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica (Meseguer, 2001). A continuación, se describe cada una.

3.1.1 Semejanza geométrica.

La semejanza geométrica es la similitud de forma. La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares es que la relación de cualquier longitud en un sistema (modelo) con respecto a la longitud correspondiente en el otro sistema

(prototipo), es en todas partes igual. Esta relación se conoce por lo general como el factor de escala (Massey 1984).

Para establecer el factor de escala se consideró un valor aceptable del coeficiente de bloqueo, que es la relación del área transversal del modelo entre el área transversal de la cámara de ensayos utilizada respecto a una dirección de viento en particular; según Meseguer (2001) dicho coeficiente debe ser igual o menor al 10% del área transversal de la cámara de ensayos. El área transversal de la cámara de ensayos del túnel de viento de la FIUADY es de 1m². De acuerdo con las direcciones de estudio del flujo de viento 0°, 45° y 90°, las direcciones extremas son en las cuales el modelo proporcionó áreas transversales mayores, por lo que la escala seleccionada para esta investigación fue de 1:72.5.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las dimensiones de la estructura prototipo y el modelo de acuerdo al factor de escala seleccionado. Adicionalmente, se muestra el coeficiente de bloqueo expresado en porcentaje. Se observa que éste fue menor al 10% tal como se recomienda en la literatura.

Tabla 3.1. Parámetros para semejanza geométrica.

Escala= 1:72.5	Medidas				Área de bloqueo	
	Prototipo		Modelo		Longitud x altura (90°)	Ancho x Altura (0°)
Longitud	1,300.0	cm	17.9	cm	320.41 cm ²	503.30 cm ²
Altura	1,300.0	cm	17.9	cm		
Ancho	2,600.0	cm	35.9	cm		
Claro altura	1,000.0	cm	13.8	cm		
Claro ancho	2,000.0	cm	27.6	cm		
Diámetro de tubos	300.0	cm	4.1	cm		
Espesor de la membrana	0.5	cm			Coeficiente de bloqueo	
					3.20%	5.03%

Debido a la geometría del modelo, se optó por elaborarlo a través de la impresión en 3D. El dibujo y diseño se realizó por medio de un programa CAD. La impresora utilizada fue una Duplicator 4 marca Wanhao con una resolución de 0.25 mm (altura de capa) y un porcentaje de relleno del 15%. Dicha impresora utilizó como material de impresión el PLA (Poliácido láctico). Además, para lograr una superficie completamente lisa, se aplicaron capas de pintura acrílica.

En la Figura 3.1 se muestra la idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.

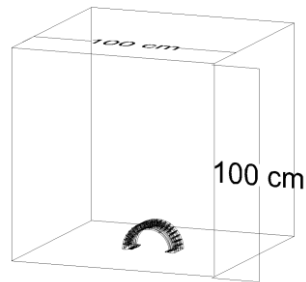


Figura 3.1. Idealización del modelo dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.

En el diseño del modelo se consideraron los orificios para medir presiones internas y externas, ambas para la configuración abierta y sólo externas para la cerrada. Los orificios se colocaron alrededor de las paredes externas e internas del modelo, con espaciamientos angulares de 10° (Figura 3.2). En las Figuras 3.3 y 3.4 se presentan las diferencias de las geometrías entre los orificios para medición de presiones internas y externas, respectivamente. En el Apéndice A1 se describen los detalles de la elección del espaciamiento angular.

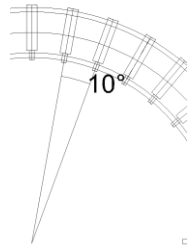


Figura 3.2. Distribución de puntos de medición.

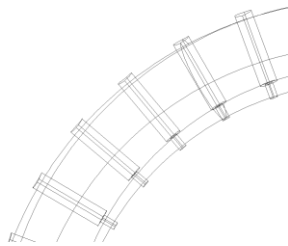


Figura 3.3. Orificios para medición de presiones internas.

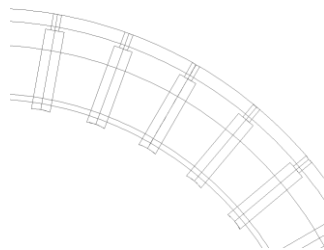


Figura 3.4. Orificios para medición de presiones externas.

La longitud total del modelo se conformó por un conjunto de 6 piezas tubulares, 3 diseñadas con orificios para la medición de las presiones externas y 3 para internas. Para la configuración cerrada, en las tapas frontal y posterior, se consideró una distribución angular de orificios a 18° entre ellos (Figura 3.5).

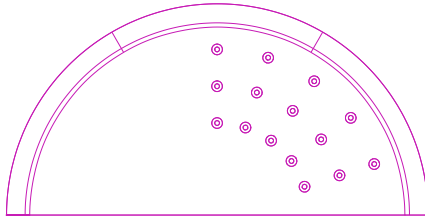


Figura 3.5. Distribución de orificios de las tapas frontal y posterior.

Respecto a las direcciones de viento a estudiar, la distribución de los orificios sobre el modelo se realizó únicamente en dos cuartas partes del mismo, por lo que por simetría, se obtuvieron las lecturas en las superficies donde el modelo no fue instrumentado. El total de orificios en planta del modelo fueron 54, una mitad se utilizó para presiones internas y la otra para externas. En las tapas fueron un total de 30 orificios (15 frontales y 15 posteriores). La versión digital final del modelo se muestra en la Figura 3.6. Mientras que en las Figura 3.7 y 3.8 se presentan las fotografías del modelo físico.



Figura 3.6. Isométrico 3D del modelo.



Figura 3.7. Modelo completo (vista frontal).



Figura 3.8. Modelo completo (vista en planta).

3.1.2 Semejanza cinemática.

La semejanza cinemática es la similitud de movimiento. Establece que las velocidades en las partículas en el prototipo y el modelo deben mantener una relación de magnitud en el tiempo correspondiente (Massey 1984).

La semejanza cinemática se obtuvo de acuerdo al comportamiento del flujo alrededor del modelo. Se consideraron velocidades de viento en las cuales se generara turbulencia alrededor del modelo y que además ésta sea constante. Debido a lo anterior, los coeficientes de presión obtenidos a partir de las presiones medidas en el túnel de viento fueron estables.

3.1.3 Semejanza dinámica.

La semejanza dinámica es similitud de fuerzas. Si dos sistemas son dinámicamente similares, entonces las magnitudes de las fuerzas en los puntos similarmente localizados en cada sistema se encuentran en una relación fija (Massey 1984).

La semejanza dinámica se logró una vez cumplidas la similitud geométrica y cinemática. A partir de esto, con las lecturas de presiones obtenidas por la instrumentación de los transductores de presión en el modelo, se obtuvieron los coeficientes de presión (C_p). Los coeficientes de presión, son valores adimensionales y de acuerdo con Meseguer (2001), se definen como la diferencia entre la presión en un punto considerado (p) y la presión de referencia. Normalmente, la presión de referencia se considera como la presión estática de la corriente incidente (p_∞), dividida por la presión dinámica de la corriente incidente, ($\rho U_\infty^2/2$) es decir:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde: U_∞ es el valor de la velocidad media del viento de referencia corriente arriba y ρ es la densidad del aire.

Los coeficientes de presión permiten trasladar los resultados experimentales obtenidos del modelo al prototipo y se utilizan para establecer valores de referencia para catalogar las propiedades aerodinámicas de las formas geométricas dadas (Simiu y H. Scalan 1996).

3.2 Instrumentación.

La instrumentación se refiere a la instalación del equipo de medición que se utiliza en el túnel de viento y en los modelos. Ésta puede ser muy variable dependiendo del tipo de ensaye que se desea realizar (Chulin 2007).

Durante los ensayos en el túnel de viento, se instalaron ductos conectados a transductores de presión en los orificios del modelo para obtener lecturas simultáneas de hasta 15 orificios (Figura 3.9). Por lo que la experimentación de cada configuración se dividió en grupos. Los ductos fueron conectados al multisensor de presiones marca Esterline, modelo 9116.

El modelo se ensayó en dos etapas. La primera fue referente a la configuración cerrada, al no existir flujo de aire en el interior del elemento por no contar con alguna abertura, únicamente se midieron presiones externas. Se instrumentaron 27 de los 54 puntos totales del modelo y los 15 puntos pertenecientes a una de las tapas.

La segunda etapa fue la configuración abierta. Debido a que el flujo atravesó el interior del modelo, se instrumentaron los 54 puntos del modelo y consecuentemente se midieron presiones internas y externas que, sumados, proporcionaron las presiones netas. En el Apéndice A2 se muestran más detalles de la instrumentación.



Figura 3.9. Modelo en configuración abierta instrumentado.

3.3 Ensayo en el túnel de viento.

Las pruebas se hicieron utilizando el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UADY. Las características del túnel de viento así como del equipo de medición, se presentan en el Anexo I.

Cada prueba se realizó durante 120 segundos con lecturas de presión a razón de 10 Hz (10 datos por segundo). Las velocidades de estudio fueron 17, 19, 21 y 23 m/s, para las cuales se consideró que el régimen del flujo en el modelo ya era turbulento debido a que los coeficientes de presión, obtenidos por la medición de presiones, se estabilizaron. En el Apéndice B1 se presenta el análisis de sensibilidad que se realizó para definir los parámetros antes mencionados.

Las direcciones de viento estudiadas en esta investigación fueron 0° , 45° y 90° respecto a la cresta del modelo (Figura 3.10). La dirección de 0° , fue considerada cuando la cresta del modelo se encontraba paralela al flujo del viento (Figura 3.11). La dirección de 90° se asignó cuando la cresta del modelo estuvo perpendicular al flujo del viento (Figura 3.12). Por último, la dirección de 45° correspondió a cuando el modelo se rotó dicha cantidad de grados respecto a la primera dirección (Figura 3.13).

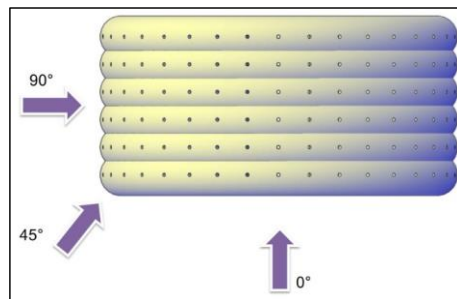


Figura 3.10. Direcciones de estudio.



Figura 3.11. Prueba del modelo en configuración cerrada a 0°.

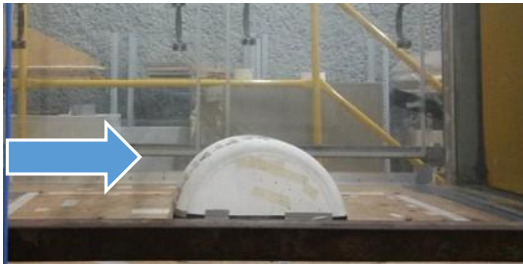


Figura 3.12. Prueba del modelo en configuración cerrada a 90°.



Figura 3.13. Prueba del modelo en configuración cerrada a 45°.

Los coeficientes de presión fueron obtenidos mediante la aplicación de la Ecuación 3.1 y con las lecturas registradas durante cada ensaye. El valor $(p - p_{\infty})$ y la velocidad promedio del viento (U_{∞}) durante cada ensaye, fueron medidos con el

manómetro con tubo de pitot en unidades de Pa y m/s, respectivamente. La densidad del aire (ρ) se consideró igual a 1.23 kg/m^3 , considerada como la densidad aproximada del aire a presión atmosférica normal y a 15°C , densidad estándar del aire (Munson 2005).

En las Figuras 3.14-3.16 se representa el embate del viento en el modelo durante la experimentación.



Figura 3.14. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración cerrada a 0° .



Figura 3.15. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración cerrada a 90° .

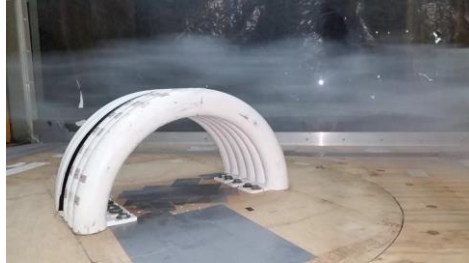


Figura 3.16. Embate del viento en el modelo durante el ensaye en configuración abierta a 45°.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS

En este capítulo, se incluyen los resultados obtenidos mediante la experimentación en el túnel de viento. Los coeficientes de presión medios medidos y graficados son: externos (C_{pe}), internos (C_{pi}) y netos (C_{pn}), de los cuales, para la configuración abierta se obtuvieron los tres y para la cerrada solamente los externos. Las direcciones de estudio fueron 0° , 45° y 90° .

Los datos graficados corresponden a todos los puntos instrumentados en planta del modelo y los pertenecientes a las tapas frontal y posterior. Todos los puntos se presentan en coordenadas del prototipo. Los coeficientes externos y netos se presentan en coordenadas exteriores (Apéndice C1, Tabla C1), por ende, los internos en coordenadas interiores (Apéndice C1, Tabla C2).

Para representar los resultados obtenidos en las Figuras del presente capítulo, se utilizó una escala de color rojo que hace referencia a coeficientes de presión negativos (succiones), mientras que una escala de azul representa coeficientes de presión positivos (empujes).

Primeramente, se presentan los coeficientes de presión de la configuración cerrada. Mismos que se comparan con los manuales y códigos vigentes en México y Europa. Posteriormente, se presentan los coeficientes obtenidos en la configuración abierta. Después, se hace una comparación entre los coeficientes de presión externos de ambas configuraciones.

Finalmente, se incluye la comparación entre los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos por Pérez (Tesis en proceso) mediante CFD (Computational Dynamic Fluids), dicha comparación se realizó respecto a los coeficientes de presión externos de ambas configuraciones.

Las comparaciones antes descritas son referidas a los valores obtenidos en el modelo pertenecientes a las franjas centrales (paralelas y perpendiculares) así como los valores de las franjas extremas. La definición de estas franjas del modelo se encuentran en las Figuras 4.1 y 4.2.

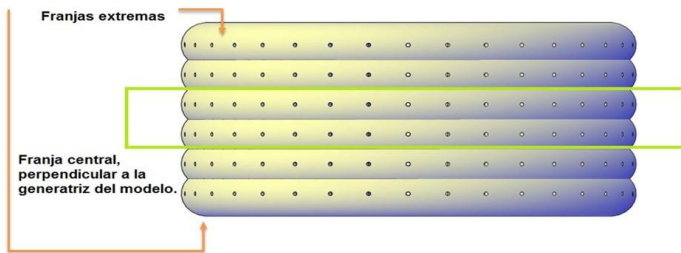


Figura 4.1. Franjas extremas y centrales perpendiculares a la generatriz del modelo.

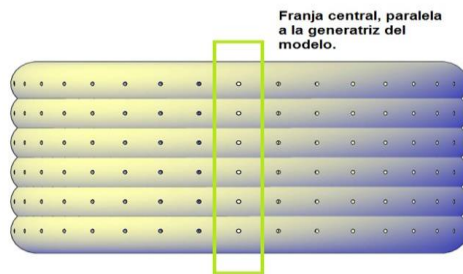


Figura 4.2. Franja central, paralela a la generatriz del modelo.

4.1 Coeficientes de presión medios: configuración cerrada.

A continuación, se presentan los C_{pe} medidos para las tres direcciones de estudio en configuración cerrada. Además, se anexan gráficas comparativas entre los resultados obtenidos experimentalmente y los valores proporcionados por los códigos de diseño vigentes en México y Europa para estructuras de forma cilíndrica.

4.1.1 Dirección 0°.

En la Figura 4.3 se observa que todos los puntos en planta del modelo presentaron succiones. El área de la tapa frontal primeramente bloqueó el transcurso del flujo, lo que conllevó al desprendimiento de la capa límite en la arista formada por la unión de ésta con el primer componente tubular del modelo a sotavento. Consecuentemente, en dicha zona se presenta la mayor cantidad de turbulencia y por ende los coeficientes de succión de mayor magnitud, siendo el máximo de -1.81, mientras que en los componentes posteriores el menor fue de -0.37.

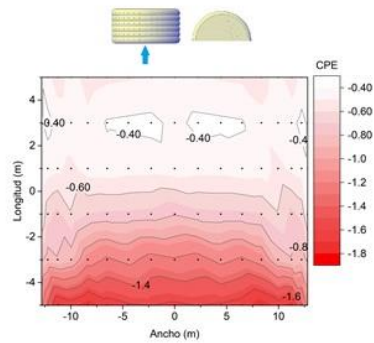


Figura 4.3. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 0°.

La tapa frontal del modelo a barlovento presentó presiones de empuje (Figura 4.4). El C_{pe} máximo fue 0.86 y el mínimo 0.28.

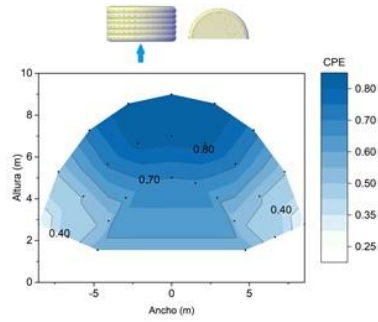


Figura 4.4. Coeficientes de presión externos para los puntos en la tapa frontal, configuración cerrada, dirección 0° .

La tapa posterior a sotavento estuvo sometida a succión (Figura 4.5) y la variación entre los C_{pe} máximos y mínimos fue de apenas 10% (mayor -0.30 y menor -0.27).

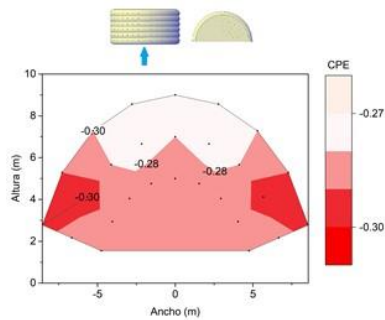


Figura 4.5. Coeficientes de presión externos para los puntos en la tapa posterior, configuración cerrada, dirección 0° .

4.1.2 Dirección 90°.

En la Figura 4.6 se visualiza que en la zona de barlovento se presentaron presiones de empuje, siendo el C_{pe} máximo de 0.75. Sin embargo, conforme el flujo incidía en la porción más elevada del modelo, se registraron las mayores succiones con un C_{pe} máximo de -0.76. Además, en toda la zona de sotavento se presentaron succiones. En esta dirección, la estabilización de los coeficientes estuvo ligada con las velocidades del viento ensayadas, por lo que el desprendimiento de la capa límite ocurrió aproximadamente en los mismos puntos.

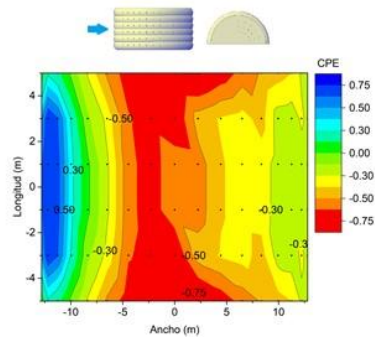


Figura 4.6. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 90°.

Debido a la dirección de estudio y la simetría del modelo, los valores en ambas tapas fueron iguales con C_{pe} de succión. La variación fue de mayor a menor de izquierda a derecha como se presenta en la Figura 4.7, estando el lado izquierdo de la tapa a barlovento, en donde también se presentó el desprendimiento de la capa límite del flujo.

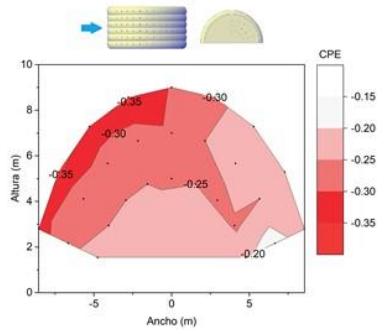


Figura 4.7. Coeficientes de presión externos para los puntos en ambas tapas, configuración cerrada, dirección 90°.

4.1.3 Dirección 45°.

En la Figura 4.8, se observa que en la zona de barlovento se presentaron los C_{pe} máximos tanto de empuje como de succión. Con valores de 0.41 y -1.17, respectivamente. El C_{pe} máximo de empuje se encontró en un punto localizado en la parte inferior del primer componente tubular del modelo en el que impactaba el viento, ya que fue la zona que primeramente bloqueó el flujo. De la misma manera, el C_{pe} máximo de succión se registró en este primer componente tubular del modelo, sin embargo fue en punto cercano a la cresta del modelo. Debido a la dirección de estudio, la cresta de este primer componente tubular del modelo fue el área donde se presentaron las mayores succiones, ya que por la presencia de la tapa frontal, el desprendimiento de la capa límite fue más brusco que en esta zona que en el resto del modelo.

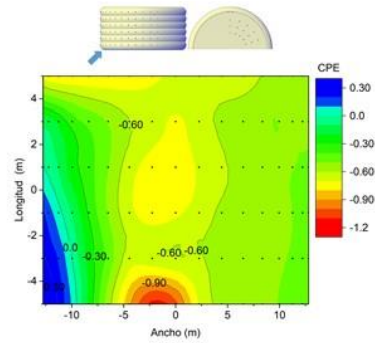


Figura 4.8. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración cerrada, dirección 45°.

En la tapa frontal, el 96% de los puntos fueron coeficientes de empuje (C_{pe} máximo de 0.62), sin embargo, en el último punto de medición (lado derecho) se registró una succión de -0.01 (Figura 4.9).

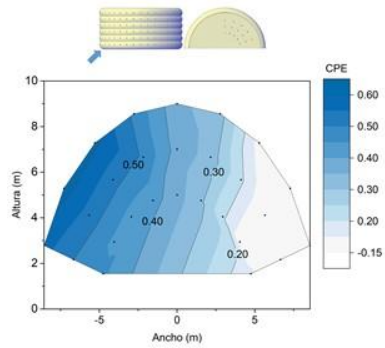


Figura 4.9. Coeficientes de presión externos para los puntos en tapa frontal, configuración cerrada, dirección 45°.

Mientras tanto, la tapa posterior estuvo sometida a succión, con un C_{pe} máximo de -0.72 y un mínimo de -0.50 (Figura 4.10).

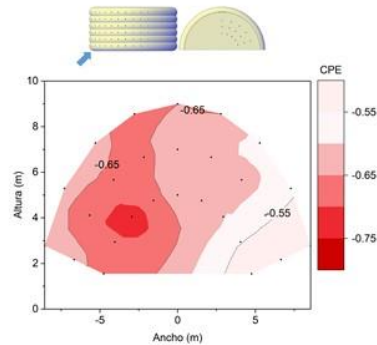


Figura 4.10. Coeficientes de presión externos para los puntos en tapa trasera, configuración cerrada, dirección 45°.

4.1.4 Comparación entre códigos de diseño

Se presentan gráficas de comparación entre los valores de coeficientes de presión proporcionados por normas oficiales para el diseño de estructuras con geometría circular y los resultados obtenidos en el túnel de viento. La comparación fue respecto a las direcciones de estudio de 0° y 90°. Se tomaron los valores referentes a las franjas del modelo centrales (paralelas y perpendiculares) y las extremas, previamente descritas.

- Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad, (MDOCV-CFE 2008) (Inciso 4.3.2.4.a para elementos principales).
- Eurocódigo 1: Acciones en las Estructuras: Acciones Generales. Acciones por Viento, (EN1991-1-4 2005) (*Tomado del artículo "Wind loads on curved roofs", P.A. Blackmore, E Tsokri).

A) Dirección 0°, franja central.

Los C_{pe} medidos en los puntos pertenecientes a los primeros componentes tubulares del modelo resultaron de mayor magnitud que los indicados en el manual MDOCV-CFE (2008), mientras que los obtenidos en los últimos puntos quedaron por debajo de lo establecido en dicho código (Figura 4.11).

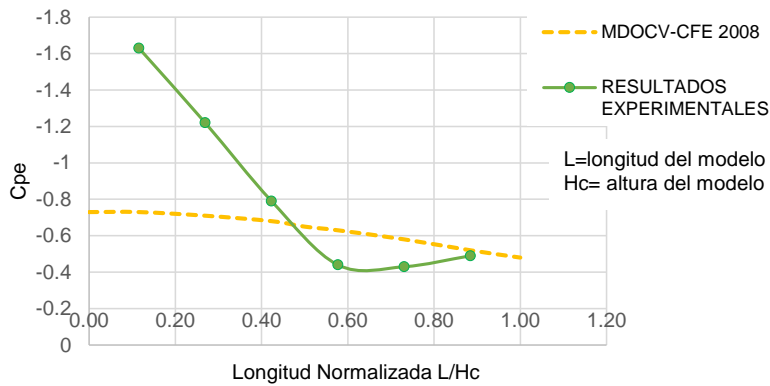


Figura 4.11. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franja central, dirección 0°.

La diferencia se puede atribuir a que el MDOCV-CFE (2008), no especifica si los valores corresponden a una geometría que se encuentra completa o parcialmente cerrada, como es el caso del modelo ensayado en configuración cerrada. Por lo que los valores proporcionados por el manual pueden hacer referencia a coeficientes de presión netos. El EN1991-1-4 (2005) no proporciona datos para dicha dirección.

B) Dirección 90°, franja central.

En la Figura 4.12 se observa que la tendencia de los coeficientes de presión experimentales es similar a lo indicado en ambos códigos. No obstante, en ciertos intervalos los códigos vigentes sobreestiman los valores experimentales. Aun así, particularmente para la dirección de 90°, los valores de los coeficientes de presión dependieron más del régimen del flujo alrededor del modelo, el cual fue turbulento y por ende el desprendimiento de la capa límite fue en aproximadamente los mismo puntos.

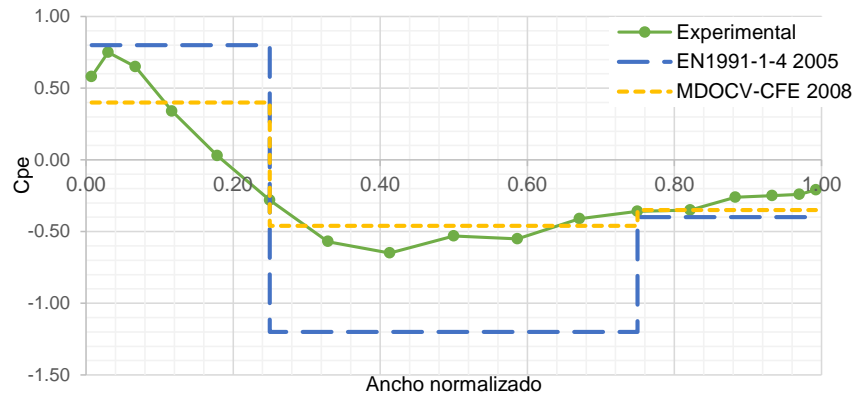


Figura 4.12. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franja central, dirección 90°.

C) Dirección 90°, franjas extremas.

Tal como fue el caso del inciso anterior, la tendencia de los valores para las franjas extremas es similar entre los experimentales y las normas de diseño, sin embargo, en ciertos intervalos los valores experimentales fueron sobreestimados y en otros subestimados por los códigos de diseño (Figura 4.13).

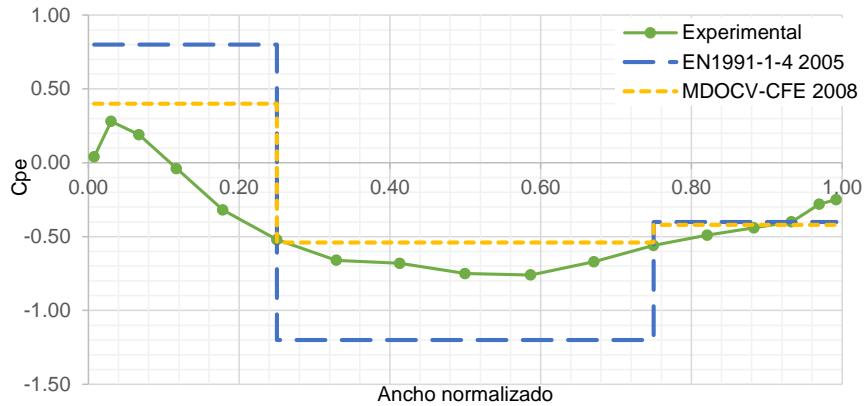


Figura 4.13. Coeficientes de presión externos para geometría circular, franjas extremas, dirección 90°.

4.2 Coeficientes de presión medios: configuración abierta.

En este apartado se muestran los coeficientes de presión medidos en la configuración abierta (C_{pe} , C_{pi} , C_{pn}) para las tres direcciones de estudio.

4.2.1 Dirección 0°.

En la Figura 4.14 se observa que todos los C_{pe} fueron de succión. Debido a la ausencia de la tapa frontal, la capa límite se desprendió a partir del área transversal del primer componente tubular del modelo [a sotavento](#), presentando un C_{pe} máximo -1.23. Mientras que los de menor magnitud se encontraron entre el cuarto y quinto componente tubular, siendo el mínimo de -0.30.

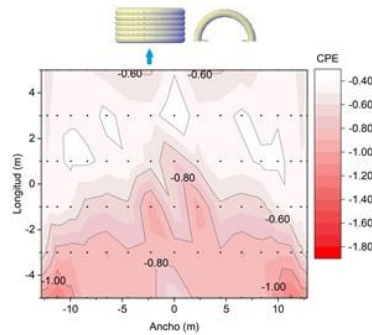


Figura 4.14. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 0° .

Todos los C_{pi} fueron de succión, el valor máximo fue de -0.79 y el mínimo de -0.07, ubicados en el último y el segundo componente tubular, respectivamente (Figura 4.15). En la primera mitad del modelo se registraron las succiones menores debido a que sólo fueron generadas por el aire que atravesó el interior del modelo. Por otro lado, la succión interior en la mitad posterior se incrementó por la succión exterior

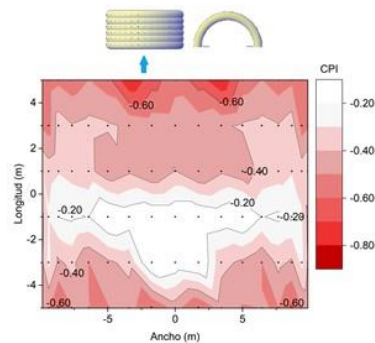


Figura 4.15. Coeficientes de presión internos para los puntos en el modelo, configuración abierta, dirección 0° .

Los C_{pn} se presentan en la Figura 4.16. El mayor valor de empuje fue 0.18, por otro lado, el de succión fue -0.86. Como se observa, los C_{pn} de empuje se localizaron en la mitad posterior del modelo, esto se debió a que las succiones interiores fueron mayores que las exteriores. De forma contraria, en la mitad frontal del modelo, los C_{pn} fueron de succión porque la succión externa fue mayor que la interna.

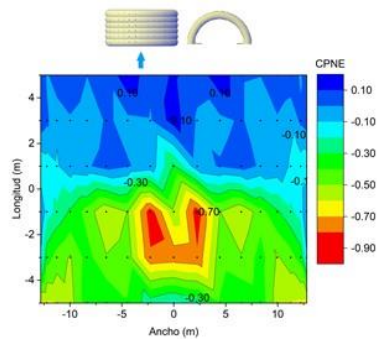


Figura 4.16. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 0° .

4.2.2 Dirección 90° .

Como se muestra en la Figura 4.17, en la zona de barlovento se presentaron los mayores C_{pe} de empuje (máximo de 0.73); mientras que en los puntos de la cresta, al centro de la longitud del modelo, se presentaron los mayores C_{pe} de succión (máximo -0.80), esto se debió a que aproximadamente en esa zona se desprendió la capa límite del viento. El comportamiento del flujo alrededor del modelo para esta dirección fue similar al de la configuración cerrada, el cual dependió de la magnitud de las velocidades ensayadas, mismas que permitieron el desprendimiento de la capa límite en aproximadamente las mismas zonas del modelo.

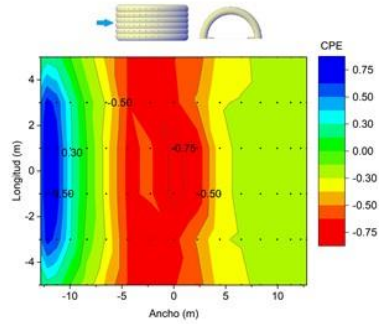


Figura 4.17. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 90°.

En todo el interior del modelo se presentaron succiones (Figura 4.18). Los C_{pi} de mayor magnitud fueron de -0.64 y los menores de -0.04.

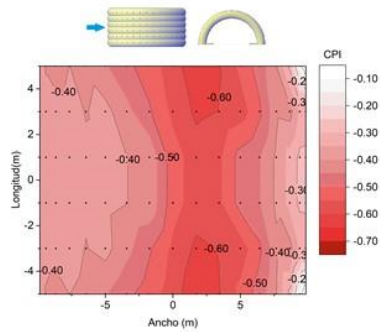


Figura 4.18. Coeficientes de presión internos para los puntos en dentro del modelo, configuración abierta, dirección 90°.

En la Figura 4.19 se presentan los C_{pn} , se observan valores de empuje en la zona de barlovento y sotavento, mientras que en la parte central valores de succión. En la zona de barlovento, los C_{pn} positivos resultaron por la adición de los empujes externos y la succión interna. Adicionalmente, en la zona de sotavento los C_{pn} fueron positivos porque la succión interior fue mayor respecto a la exterior. La parte central con C_{pne} de succión se debió a que la succión externa fue mayor que la interna, caso que también se presentó en los extremos de la longitud del modelo en la zona de sotavento. El máximo C_{pn} de empuje fue 1.11 y el de succión -0.27.

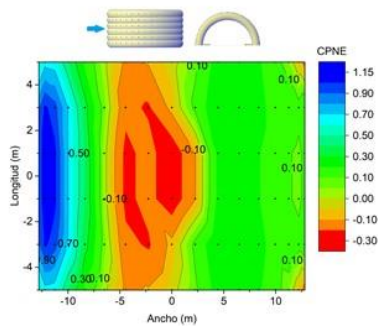


Figura 4.19. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 90°.

4.2.3 Dirección 45°.

Con base en la Figura 4.20, una parte de la zona de barlovento presentó C_{pe} de empuje (máximo de 0.77). Sin embargo, ciertos puntos del primer componente registraron C_{pe} de succión (máximo de -1.39). En este ensaye, la incidencia del viento en el modelo no fue desviada por la presencia de la tapa frontal, ya que al no existir ésta, el flujo tuvo un transcurso casi libre y solamente fue desviado por la sección transversal de los componentes tubulares del modelo.

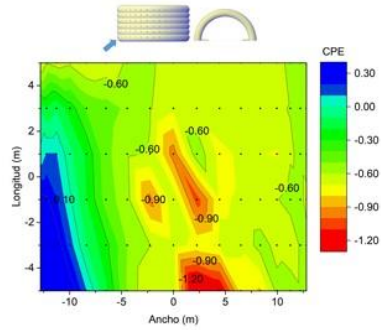


Figura 4.20. Coeficientes de presión externos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 45°.

Los valores de los C_{pi} se observan en la Figura 4.21, en esta dirección se presentó una zona de empujes internos. El máximo valor de empuje fue 0.69, mientras que el de succión -1.20.

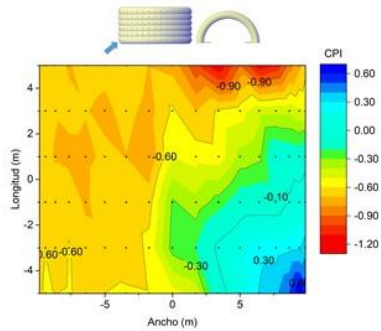


Figura 4.21. Coeficientes de presión internos para los puntos en dentro del modelo, configuración abierta, dirección 45°.

De acuerdo con la Figura 4.22. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 45°. Figura 4.22, el C_{pn} máximo de empuje fue 1.36 y el de succión de -1.28. Los C_{pn} de empuje se originaron por dos efectos: adición del empuje externo y la succión interna o que la succión interna fue mayor respecto a la succión externa. Por otro lado, también los C_{pn} de succión se presentaron por dos razones: como el resultado de la adición del empuje interno y la succión externa o porque la succión externa fue mayor que la interna.

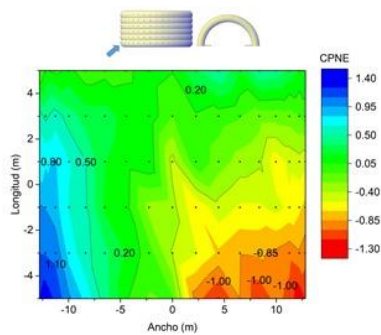


Figura 4.22. Coeficientes de presión netos para los puntos en planta del modelo, configuración abierta, dirección 45°.

4.3 Comparación de los coeficientes de presión externos entre las dos configuraciones.

Se presentan imágenes comparativas de los coeficientes de presión externos entre ambas configuraciones: cerrada y abierta, respectivamente. Se utilizó la misma escala de colores para cada dirección.

4.3.1 Dirección 0°.

Los coeficientes de ambas configuraciones pertenecientes a los primeros tres componentes del modelo, variaron a causa de la presencia de la tapa frontal en la configuración cerrada. Puesto que en ésta, fue más brusco el desprendimiento de la capa límite al tener una mayor área de bloqueo del flujo que en la configuración abierta, en la cual solamente actuó la sección transversal de los componentes tubulares (Figura 4.23).

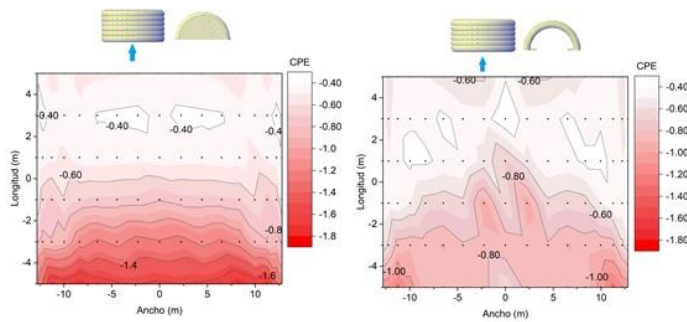


Figura 4.23. Coeficientes de presión externos de ambas configuraciones, dirección 0°.

4.3.2 Dirección 90°.

Se presentó un comportamiento similar de los C_{pe} en ambas configuraciones (Figura 4.24). Siendo positivos en la parte de la zona de barlovento, las succiones máximas en la parte central y la zona de sotavento en succión moderada. La presencia de las tapas en esta dirección no proporcionó diferencia significativa entre los valores obtenidos para ambas configuraciones. Esto fue en respuesta al desprendimiento de la capa límite del flujo al incidir el modelo, mismo que dependió de las velocidades utilizadas en la experimentación, por lo que dicho desprendimiento fue aproximadamente en los mismos puntos del modelo.

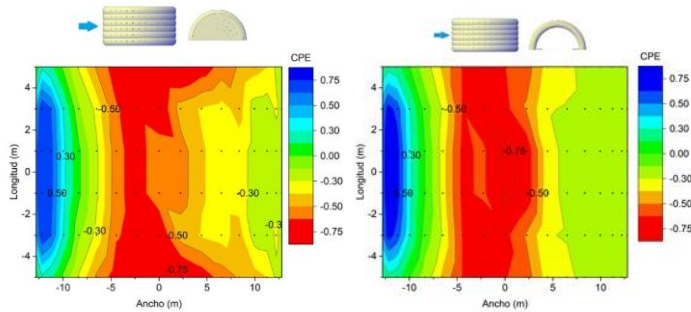


Figura 4.24. Coeficientes de presión externos de ambas configuraciones, dirección 90° .

4.3.3 Dirección 45° .

El comportamiento del flujo sobre el modelo fue similar en ambas configuraciones, sin embargo, se presentaron más áreas de succión en la configuración abierta que en la cerrada (Figura 4.25). En la configuración cerrada, la tapa frontal desvió el flujo a las paredes laterales. Mientras que en la configuración abierta, el flujo atravesó libremente el modelo, generando más succiones en la cresta central del mismo.

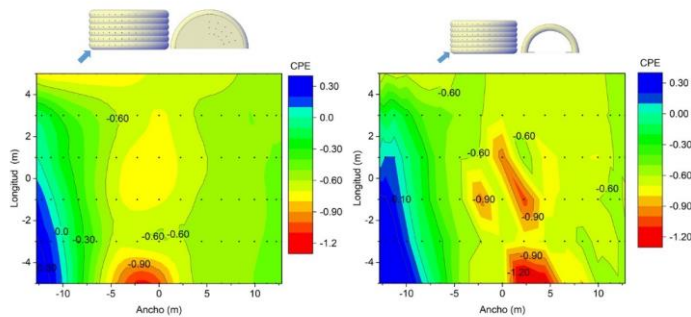


Figura 4.25. Coeficientes de presión externos, ambas configuraciones, dirección 45° .

4.4 Comparación entre resultados obtenidos experimentalmente y mediante CFD (Computational Fluid Dynamic). Configuración cerrada.

En este apartado, se incluye la comparación de los coeficientes de presión externos de la configuración cerrada obtenidos experimentalmente y mediante un método numérico por CFD (Pérez Tesis en proceso). Los valores mostrados son los puntos de la franja central paralela a la generatriz del modelo (Dirección 0°) y los puntos de las franjas centrales perpendiculares a la misma (Dirección 90°).

4.4.1 Dirección 0°.

Se observa un comportamiento similar entre ambos métodos para longitudes normalizadas mayores a 0.25 (Figura 4.26), sin embargo, para los intervalos menores los resultados difieren en mayor proporción. La diferencia promedio fue 34% y la desviación estándar 31%.

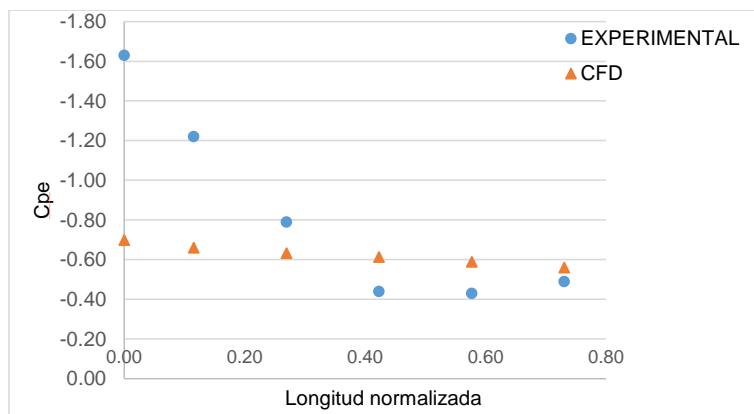


Figura 4.26. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración cerrada, dirección 0°.

4.4.2 Dirección 90°.

Con base en la Figura 4.27, los C_{pe} tanto experimentales como por CFD fueron regidos por la misma tendencia, incluso para la última cuarta parte del modelo los resultados pueden considerarse como coincidentes. Sin embargo, entre la segunda y tercera cuartas partes si hay variación más visible de las magnitudes de los coeficientes. La diferencia media entre los valores fue 15%, mientras que la desviación estándar 12%.

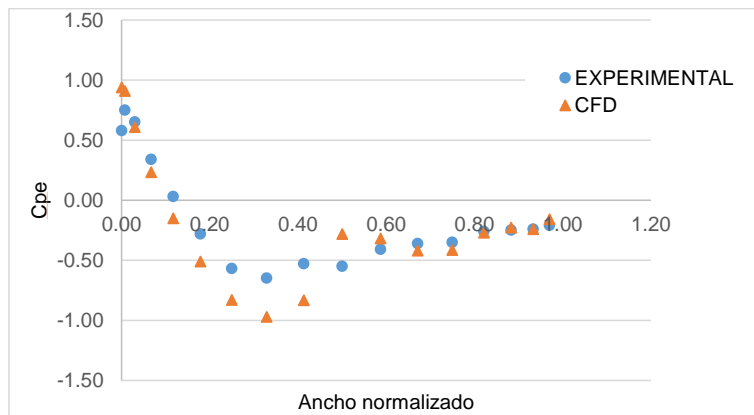


Figura 4.27. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración cerrada, dirección 90°.

4.5 Comparación entre resultados obtenidos experimentalmente y mediante CFD (Computational Fluid Dynamic). Configuración abierta.

Se presentan las comparaciones de los coeficientes de presión externos de la configuración abierta obtenidos en el ensaye por túnel de viento y mediante un método numérico por CFD (Pérez Tesis en proceso). Los valores mostrados hacen

referencia a los puntos centrales paralelos a la cresta del modelo (Dirección 0°) o centrales perpendiculares a la misma (Dirección 90°).

4.5.1 Dirección 0°.

En la Figura 4.28 se observa una mayor aproximación en magnitudes entre ambos métodos para el intervalo de longitud normalizada entre 0.25 a 0.60. Pero no así para los intervalos restantes. Se obtuvo una diferencia media del 32% y una desviación estándar del 36%.

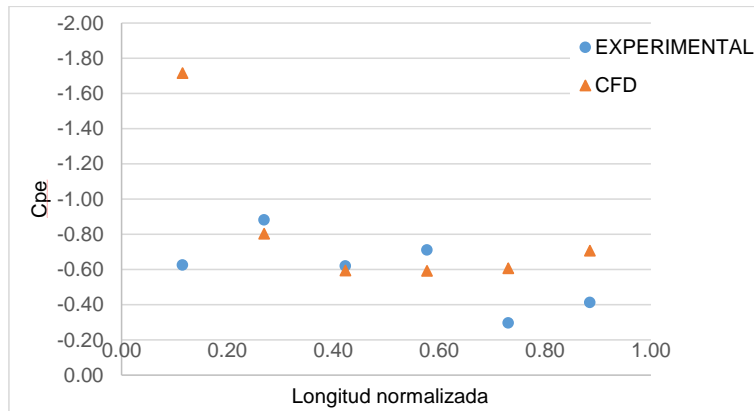


Figura 4.28. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración abierta, dirección 0°.

4.5.2 Dirección 90°.

La similitud en tendencia entre ambos métodos se cumple. Para los intervalos de ancho normalizado de [0.07, 0.33] U [0.67, 1], las variaciones de las magnitudes de los coeficientes fueron entre [0.0-0.10]. Por otra parte, las variaciones para los intervalos de [0, 0.03] U [0.41, 0.59] fueron mayores a [0.10] (Figura 4.29). La diferencia media fue 12% con una desviación estándar de 11%.

Comentado [SP5]: Reescribí el párrafo

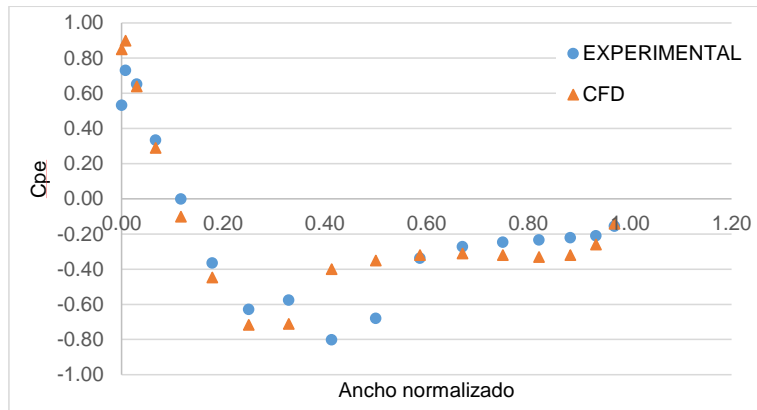


Figura 4.29. Coeficientes de presión externos experimentales y mediante CFD, configuración abierta, dirección 90°.

De forma general, para cualquier dirección y configuración de estudio, decir con exactitud la causa de la diferencia entre ambos métodos resulta difícil, ya que ésta pudo ser originada por diversos factores y harían falta otras experimentaciones y simulaciones. Pero como se observó, las mayores diferencias se presentaron en las zonas donde ocurrió el desprendimiento de la capa límite del viento. Aunque en ambos métodos se origina la turbulencia alrededor del modelo, cada uno tiene una metodología diferente para el cálculo de los coeficientes de presión. Las diferencias mayores pueden explicarse debido a que la resolución numérica de las ecuaciones, utilizadas por el CFD en un punto de desprendimiento del flujo, tienden a valores infinitos y los programas de cómputo compensan este problema requiriéndose un mayor refinamiento de las mallas en estas áreas para obtener valores más aproximados a los reales. Éstas y otras diferencias son comentadas en Amaya et al. (2016), donde se realizó la comparación de coeficientes de presión de un cubo obtenidos mediante túnel de viento y por CFD.

4.6 Deformada de la estructura.

Se presenta la geometría deformada obtenida a partir del método de Relajación Dinámica a cargo del Dr. Krisztián Hincz (Figuras 4.30-4.32). La deformada fue el resultado de utilizar los coeficientes de presión netos como fuerzas actuantes en la estructura, mismos que generaron una geometría diferente en la misma. Por cuestiones prácticas para hacer el modelo de la estructura deformada, los valores de C_{pn} utilizados, correspondieron a los obtenidos en la configuración abierta a 90° . Esto se debió a que en la dirección a 90° se descartó la incertidumbre de lo que ocurre con los valores entre uniones de los elementos tubulares del modelo. Además, la configuración abierta es la condición para la cual la estructura prototipo opera normalmente.

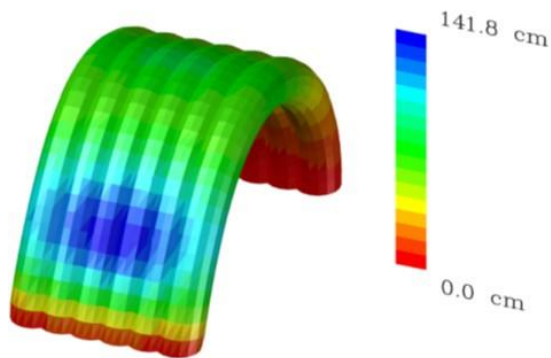


Figura 4.30. Deformada de la estructura. Vista isométrica.

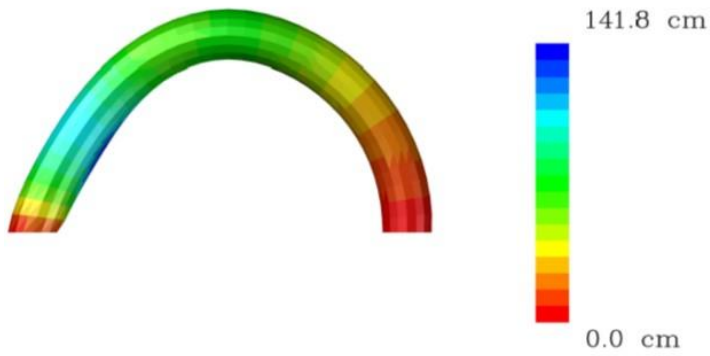


Figura 4.31. Deformada de la estructura. Vista frontal.

■ Modelo deformado
■ Modelo No deformado

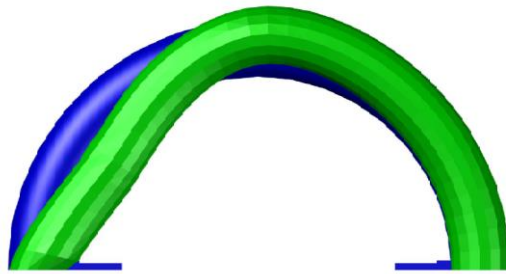


Figura 4.32. Comparación entre el modelo no deformado y el deformado.

De acuerdo con las figuras anteriores, las deformaciones en la estructura son de mayor magnitud en su pared de barlovento, debido a que es la pared que principalmente bloquea el flujo incidente con los C_{pe} de mayor magnitud, mientras que en la pared de sotavento los desplazamientos son incluso nulos en los puntos cercanos a la base y por lo tanto, los C_{pe} y C_{pi} son de menor magnitud.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se incluyen las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada sobre la medición de los coeficientes de presión por acciones de viento en un hangar inflable. Los ensayos realizados en el túnel de viento de la FIUADY, consistieron en la instrumentación de un modelo rígido a escala de un hangar inflable. La fase experimental se realizó para dos configuraciones del modelo: cerrado y abierto. Para realizar la experimentación se establecieron los requisitos para cumplir con la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, lo que permitió la obtención de los coeficientes de presión externos (C_{pe}), internos (C_{pi}) y netos (C_{pn}). Las direcciones del flujo de viento para ambas configuraciones fueron 0° , 45° y 90° . Finalmente, se presentó la configuración deformada de la estructura prototipo en configuración abierta en la dirección a 90° . Las conclusiones y recomendación son descritas a continuación:

5.1 Configuración cerrada.

- La dirección más desfavorable fue a 0° , en la cual se presentaron los coeficientes de presión externos de mayor magnitud tanto para succión como para empuje. Los valores fueron -1.81 (succión) medidos sobre el modelo y 0.86 (empuje) obtenido en la tapa frontal.
- En la dirección a 0° , el coeficiente de presión externo máximo de empuje en la tapa frontal del modelo (zona de barlovento) fue 0.86, valor aproximado a lo indicado en el manual MDOCV-CFE (2008) para geometrías con caras planas en zona de barlovento (0.80). De igual forma, la tapa trasera (zona de sotavento), tuvo un coeficiente de presión externo máximo de -0.30 (succión), semejante a lo

indicado para secciones planas en sotavento de acuerdo al manual mencionado anteriormente (-0.30).

- Cuando el flujo impactaba sobre la estructura a 0° , los coeficientes de presión externos medidos en los puntos localizados en la franja central, paralela a la generatriz del modelo, resultaron de mayor magnitud que los especificados en el manual MDOCV-CFE (2008) los pertenecientes a los primeros componentes tubulares del modelo, mientras que los obtenidos en los últimos puntos quedaron por debajo de lo establecido en dicho código.

- En la dirección a 90° , la tendencia de los valores experimentales tanto de los puntos en la franja central como los extremos es semejante a lo indicado en el manual MDOCV-CFE (2008) y el EN1991-1-4 (2005).

5.2 Configuración abierta.

- La dirección más desfavorable en la cual se presentaron los coeficientes de presión netos de mayor valor absoluto fue a 45° , tanto de succión como de empuje. El coeficiente de presión neto máximo de succión fue de -1.28, esto debido a la suma de la succión externa y el empuje interno. Mientras que el mayor coeficiente de presión neto de empuje fue 1.36, consecuencia de la adición del empuje externo y la succión interna.

- Los coeficientes de presión externo e interno de mayores magnitudes también se presentaron cuando el flujo incidió sobre el modelo a 45° , con valores de -1.37 y -1.20, respectivamente.

5.3 Comparación entre coeficientes de presión externos en la configuración cerrada y abierta.

- En la dirección a 0° , la máxima succión externa del modelo en configuración cerrada fue mayor que en la abierta, con un valor de -1.81 en la primera y un valor de -1.23, en la segunda. La presencia de la tapa frontal durante la experimentación del modelo en configuración cerrada, originó un desprendimiento abrupto de la capa límite, provocando una mayor turbulencia. Estos valores de máxima succión se presentaron en el primer componente tubular del modelo a sotavento. Entre las succiones de menor magnitud, la diferencia fue de |0.07|, valores que se obtuvieron en la parte posterior del modelo.

- Respecto a la dirección a 90° , la diferencia entre las máximas succiones y empujes externos entre ambas configuraciones es mínima, siendo de |0.04| para succión y |0.02| para empuje. La presencia de las tapas no generó un cambio significativo en los resultados debido a la dirección de viento, ya que el desprendimiento de la capa límite dependió del desarrollo de la turbulencia del flujo sobre el modelo durante la experimentación.

- En la dirección con el embate del flujo a 45° , la diferencia entre las mayores succiones externas entre la configuración cerrada y abierta fue de |0.22|, con un valor de -1.17 en la primera y -1.39 en la segunda. Mientras que para los mayores empujes la mayor diferencia fue de |0.36|, con coeficientes de 0.41 y 0.77 en las configuraciones cerrada y abierta, correspondientemente. Estos valores se presentaron en el primer componente tubular del modelo en donde impactaba el flujo. En esta dirección y en la configuración cerrada, se considera que la tapa frontal influyó en el desprendimiento abrupto de la capa límite del flujo incidente, al funcionar como un elemento de bloqueo del paso del viento.

5.4 Recomendaciones.

Debido a la geometría atípica de la estructura prototipo, se recomienda que en investigaciones próximas o similares, se coloquen puntos de medición en las costuras entre los componentes tubulares del modelo. Lo anterior, para tener en cuenta los cambios de presión originados por los pequeños vórtices entre las crestas, ya que en esta investigación no se consideraron.

La configuración deformada de la estructura, a partir de los coeficientes de presión obtenidos en el túnel de viento, pueden servir como base para la continuación del proceso iterativo que se puede realizar debido a los cambios en la geometría del modelo, a partir de las fuerzas externas de viento. El proceso iterativo puede continuarse para cualquier configuración del modelo (cerrada o abierta), en las direcciones experimentadas en esta investigación. Particularmente, se recomienda el ensaye de la deformada para la dirección a 90° en configuración abierta, ya que la deformada presentada fue obtenida a partir de los datos experimentales en dichas condiciones. Además, la configuración abierta es aquella para la cual la estructura prototipo se encuentra en condiciones de operación normales, y la dirección de viento utilizada es aquella en donde no se espera un cambio significativo de presiones entre las costuras del modelo.

REFERENCIAS

American Society of Civil Engineers (1997). ASCE 17-96 Air-Supported Structures. Reston, Virginia.

Buildair, Engineering and Architecture (s.f.). Disponible en: <http://www.buildair.com>, recuperado el 5 de Noviembre de 2015.

Canavesio O., Natalini M. (s.f.). Acciones Locales de Viento sobre un Estadio con Cubierta Textil. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería, Chaco, Argentina.

Chulin Tec V. A. (2007). Estudio aerodinámico en túnel de viento de los muros de casa-maya, casa económica convencional y de una propuesta de vivienda económica. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Comisión Federal de Electricidad (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento. México, D.F.

Dietz A. E., Proffitt R. B., Chabot R. S., Moak E. L., Monego C. J. (1969). Wind Tunnel Test and Analyses for Ground-Mounted Air-Supported Structures. Natick, Massachusetts.

Gamboa Marrufo M., Hincz K., Tun Cruz V. (2011). Medición de Presiones aerodinámicas en una estructura de membrana. Ingeniería. Revista Académica. Universidad Autónoma de Yucatán., 15(3), 167-175.

Hernández Barrios H., Valdés Vázquez G., Hernández Martínez A. (2010). Procedimiento Simplificado de Diseño Eólico de Tenso-Estructuras. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato.

Hincz K., Gamboa Marrufo M. (2015). Deformed Shape Wind Analysis of Tensile Membrane Structures. "American Society of Civil Engineers."

Kawamura S., Kiuchi T. (1986). An Experimental Study of a one-membrane type pneumatic structure - Wind load and response. "Jornal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", 23, 127-140.

Kröplin Bern (2005). Inflated Membrane Structures on the Ground, in the Air and in Space- A Classification. Textile Composites and Inflatable Structures. Springer. Netherlands. 213-220.

Lang R., Nemeč I., Martinasek J. (2015). Specific Aspects of Tensile Structures. Applied Mechanics and Materials. 769, 19-24.

Maldonado D. (2009). Membranas Estructurales. Tensión Creativa. Revista BIT, 64, 102-106.

Marcipar J., Oñate E., Canet J. (2005). Experiences in the Design Analysis and Construction of Low Pressure Inflatable Structures. Textile Composites and Inflatable Structures. Springer. Netherlands. 241-257..

Massey B. (1984). Mecánica de Fluidos. Van Nostrand Reinhold Company LTD. México, D.F.

Meseguer Ruiz J. (2001). Aerodinámica Civil. McGraw-Hill. Interamericana, España.

Munson B. R. (2005). Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Limusa Wiley. México, D.F.

Oñate E., Kröplin B. (2005). Textile Composites and Inflatable Structures. Springer. Netherlands.

Puerta Avella D. Y. (2008, Abril). Acción del viento sobre una velaria de gran claro. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

Revista ARQHYS.com (2012). Historia de las estructuras con membrana tensada. Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/historia-estructuras-tensada.html>. Recuperado en Agosto de 2016.

Seidel M. (2009). Tensile Surface Structures. Ernst & Sohn. Germany.

Simiu E., H. Scanlan R. (1996). Wind Effects on Structures (3a. Edición). A. Wiley Interscience Publication. E.U.A.

UNE-EN 13782:2005. European Standard. Temporary structures-Tent-Safety.

APÉNDICE A.

A1. Espaciamiento angular entre los puntos de medición de presiones.

Para la distribución de los puntos de medición de presiones sobre el modelo, se consideraron dos aspectos importantes: una distribución que posibilite la instrumentación práctica en el modelo, tanto interna como externamente, y que además, permita la interpolación entre valores proporcionados en el modelo ensayado. Por lo tanto, los puntos no deben estar muy distantes en la estructura prototipo. Se presenta la Tabla A.1 con las propuestas para espaciamiento angular de los puntos de medición de presiones considerando los aspectos antes mencionados.

Tabla A.1. Espaciamiento angular de los puntos de medición de presiones para la investigación.

ESPACIAMIENTO ANGULAR (°)	NÚMERO DE TUBOS DE MEDICIÓN	MODELO (cm)		PROTOTIPO (m)	
		radios (cm)		radios (m)	
		Exterior	Interior	Exterior	Interior
		35.9	27.6	26	20
		LONGITUD DE CURVA			
		MODELO (cm)		PROTOTIPO (m)	
		Exterior	Interior	Exterior	Interior
15	6	4.70	3.61	3.40	2.62
11	8	3.45	2.65	2.50	1.92
10	9	3.13	2.41	2.27	1.75

La distribución angular seleccionada para colocar los puntos de medición fue a 10°, ya que fue la que mejor se ajustó para cumplir los requisitos descritos previamente.

A2. Detalle de instrumentación para la experimentación en túnel de viento.

Cuando se ensayó el modelo en configuración cerrada, se enumeraron del 1 al 27 los orificios para medición de presiones externas ubicados en planta del modelo (Figura A.1); y en la tapa frontal del 1 al 15 (Figura A.2).

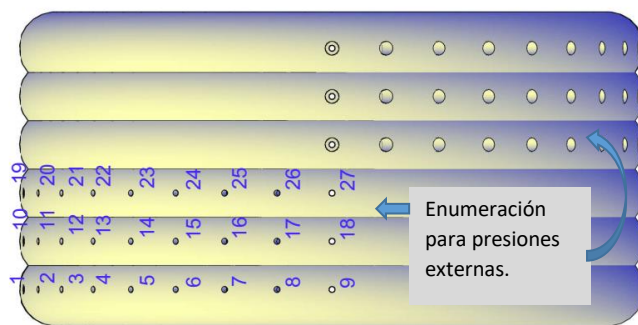


Figura A.1.Enumeración de los puntos de medición en el modelo.

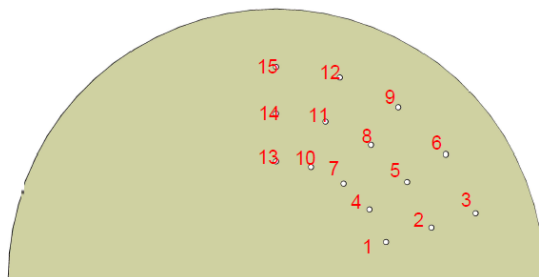


Figura A.2. Enumeración de los puntos de medición de las tapas del modelo.

En la configuración abierta, la enumeración de las externas se mantuvo y se aplicó el mismo criterio de recuento para los orificios internos. Para este caso, las tapas fueron retiradas.

APÉNDICE B.

B1. Análisis de sensibilidad para definir tiempo y frecuencia de muestreo.

Con el modelo en configuración cerrada, se instrumentaron los puntos del 1-10 y 14 para realizar un análisis de sensibilidad para definir el tiempo y la frecuencia de muestreo. Se tomaron tres intervalos de tiempo: 30, 60 y 90 segundos. De igual forma, se midió a tres diferentes frecuencias de muestreo 2, 10 y 60 Hz (lectura de datos por segundo). Las velocidades fueron 15 y 20 m/s, con un par de pruebas cada una. La dirección fue a 0°, cara de barlovento.

El análisis consistió en dos vertientes:

- 1) Tiempo de muestreo constante, variación de la frecuencia de muestreo.
- 2) Frecuencia de muestreo constante, variación del tiempo.

En la Tabla B.1 se presenta un resumen de los datos obtenidos en el túnel de viento para un punto en particular. Punto #9.

Tabla B.1. Resumen de datos obtenidos del análisis de sensibilidad.

Frecuencia de muestreo	2 HZ			10 HZ			60 HZ		
	30 s	60 s	90 s	30 s	60 s	90 s	30 s	60 s	90 s
Tiempo (seg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V=15 m/s	1.42	1.40	1.40	1.42	1.38	1.43	1.40	1.39	1.40
V=20 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.51	1.58	1.60	1.54	1.60	1.61	1.60	1.60	1.61

A partir del análisis de sensibilidad se tomaron las siguientes conclusiones:

- Medir a baja frecuencia de muestreo así como un tiempo de medición corto, resulta insuficiente para obtener valores promedios aproximados.

- Sin embargo, se observó que la frecuencia de muestreo a 2 Hz resulta conveniente cuando se aplica en tiempos mayores o iguales a 90 segundos.
- Las lecturas a 10 y 60 Hz resultan provechosas, pues proporcionaron valores similares para tiempos iguales o mayores a 1 minuto para $V=20$ m/s.

Por lo que en la presente investigación, se eligió una frecuencia de muestro igual a 10 Hz con un tiempo de medición de 120 segundos ya que al obtener valores muy similares, se presume que la turbulencia se estabilizó a esta velocidad, y que la frecuencia que se usa para realizar las mediciones es suficiente para registrarla.

B2. Estabilización de los coeficientes de presión.

En este apartado, se muestran los coeficientes de presión medios obtenidos por cada velocidad en ambas configuraciones, cerrada: coeficientes de presión externos; y abierta: coeficientes de presión externos e internos, para las direcciones de estudio de 0° y 90° (Figuras B.1-B.6). Los coeficientes presentados, son los pertenecientes a la franja central paralela a la generatriz del modelo y las franjas centrales perpendiculares al mismo. La definición de estas franjas se indicó en el Capítulo 4, Resultados.

A) Configuración cerrada, dirección 0° .

Se tuvo una variación media del 4% y una desviación estándar promedio del 2%.

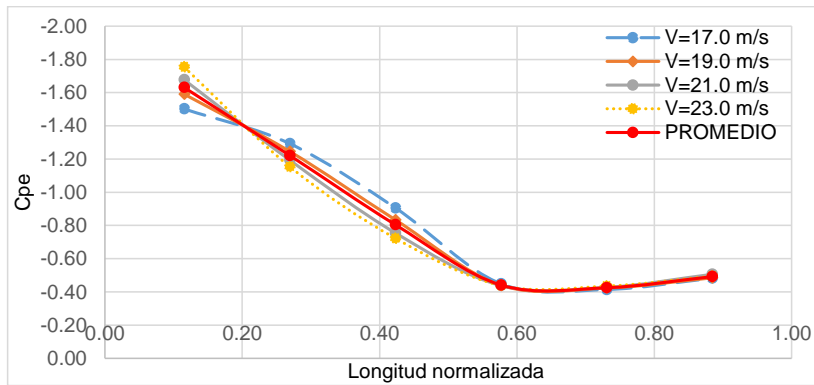


Figura B.1. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración cerrada, dirección 0° .

B) Configuración cerrada, dirección 90° .

La variación media fue 1% y la desviación estándar promedio nula.

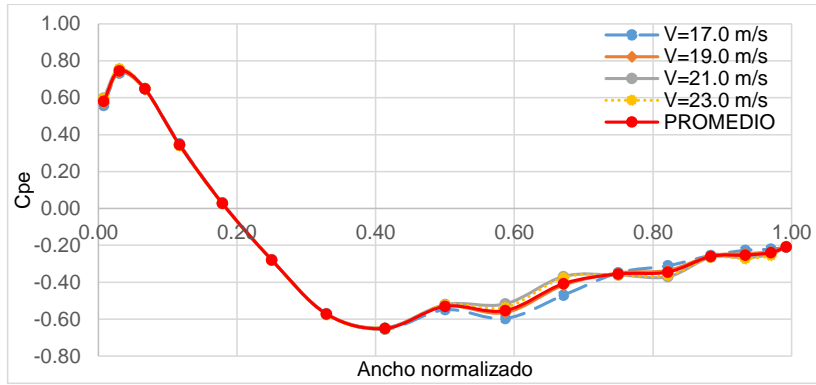


Figura B.2. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración cerrada, dirección 90° .

C) Configuración abierta, dirección 0° .

Se obtuvo una variación media del 2% y una desviación estándar promedio del 1%.

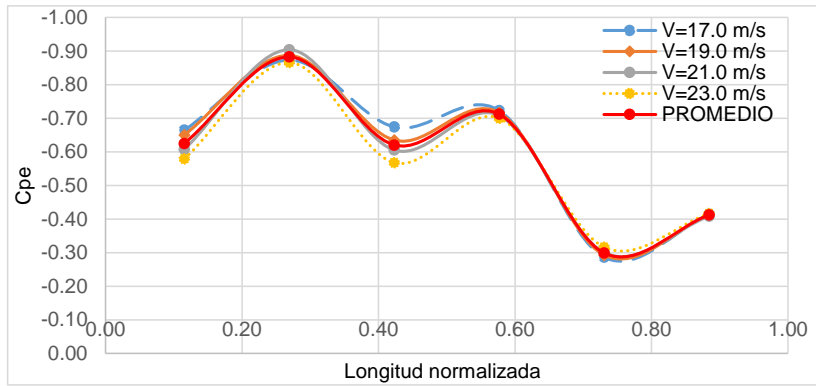


Figura B.3. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración abierta, dirección 0° .

Al igual que los coeficientes de presión externos, la variación media entre los coeficientes de presión interior fue 2% y la desviación estándar promedio 1%.

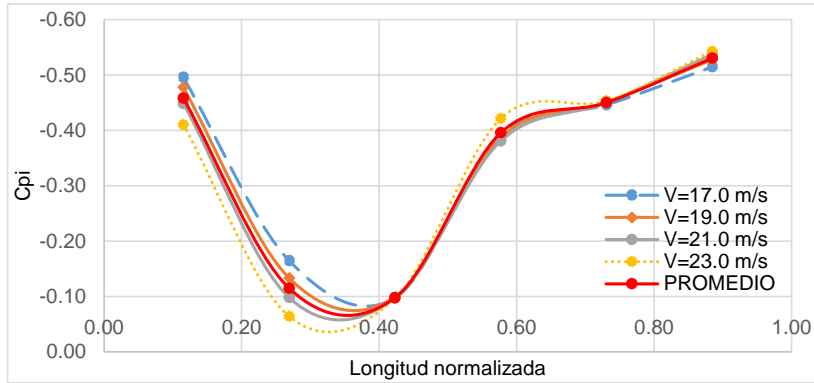


Figura B.4. Estabilización de los coeficientes de presión interior, configuración abierta, dirección 0°.

D) Configuración abierta, dirección 90°.

La variación media fue 0.5% y la desviación estándar promedio 0.2%.

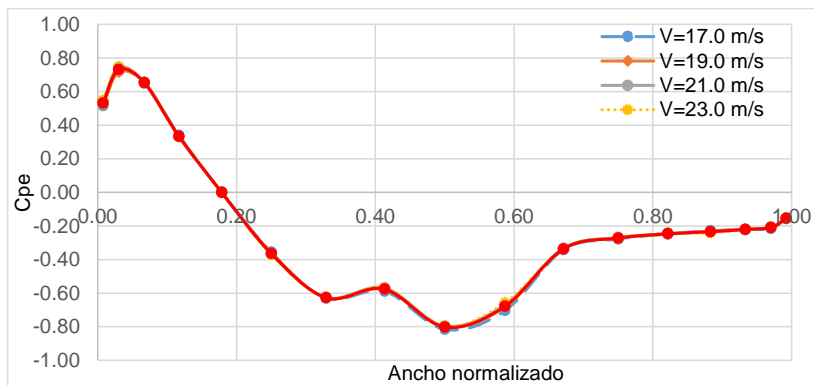


Figura B.5. Estabilización de los coeficientes de presión externos, configuración abierta, dirección 90°.

Entre los coeficientes de presión interior, la variación media fue 1% y la desviación estándar promedio 1%.

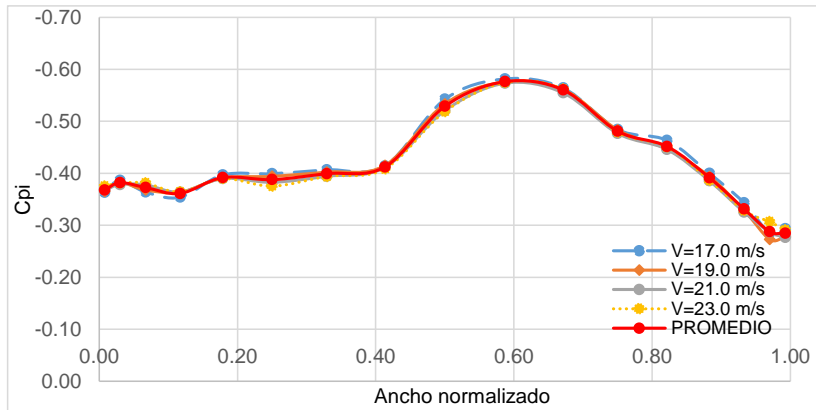


Figura B.6. Estabilización de los coeficientes de presión interior, configuración abierta, dirección 90°.

Como se observó en todas las figuras anteriores, con las velocidades utilizadas en la experimentación, se cumplió la estabilización de los coeficientes de presión tanto externos como internos, es decir, que la turbulencia generada por el embate del flujo en el modelo, se estabiliza a partir de cierta velocidad, lo que permite que la distribución de presiones en la geometría sea la misma a partir de dicha velocidad.

APÉNDICE C.

C1. Coordenadas en dimensiones del prototipo exteriores e interiores, con base en los puntos instrumentados en el modelo.

El eje global se posicionó al centro del modelo con coordenadas x, y, z igual a (0, 0, 0), tal como se indican en la Figura C.1.

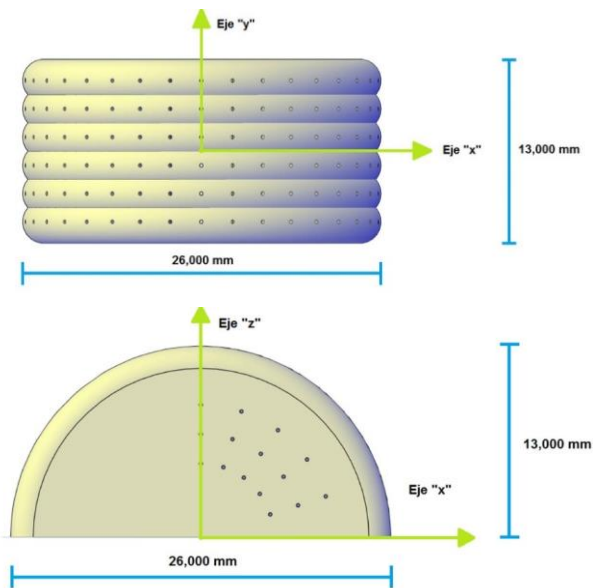


Figura C.1. Coordenadas globales del prototipo en planta y frontal, respectivamente.

- Eje "x", representa el ancho del modelo y comprende un intervalo de -13,000 mm a 13,000 mm.
- Eje "y", está a lo largo del modelo y va -6,500 mm a 6,500 mm.

- Eje “z”, se relaciona con la altura del modelo y es de 0 mm a 13,000 mm.

El modelo es un conjunto de 6 piezas tubulares. Primeramente se presentan las coordenadas de los puntos exteriores medidos y posteriormente los que por simetría se tendrían, con la misma numeración (Tabla C.1).

Tabla C.1. Coordenadas exteriores en dimensiones del prototipo, dimensiones en mm.

COMPONENTE TUBULAR	NUMERACIÓN TÚNEL	X	Y	Z
1	1	-12802.50	-5000.00	2257.43
	2	-12216.00	-5000.00	4446.26
	3	-11258.33	-5000.00	6500.00
	4	-9958.58	-5000.00	8356.24
	5	-8356.24	-5000.00	9958.58
	6	-6500.00	-5000.00	11258.33
	7	-4446.26	-5000.00	12216.00
	8	-2257.43	-5000.00	12802.50
	9	0.00	-5000.00	13000.00
	8	2257.43	-5000.00	12802.50
	7	4446.26	-5000.00	12216.00
	6	6500.00	-5000.00	11258.33
	5	8356.24	-5000.00	9958.58
	4	9958.58	-5000.00	8356.24
	3	11258.33	-5000.00	6500.00
	2	12216.00	-5000.00	4446.26
	1	12802.50	-5000.00	2257.43
2	10	-12802.50	-3000.00	2257.43
	11	-12216.00	-3000.00	4446.26
	12	-11258.33	-3000.00	6500.00
	13	-9958.58	-3000.00	8356.24
	14	-8356.24	-3000.00	9958.58
	15	-6500.00	-3000.00	11258.33
	16	-4446.26	-3000.00	12216.00
	17	-2257.43	-3000.00	12802.50

	18	0.00	-3000.00	13000.00
	17	2257.43	-3000.00	12802.50
	16	4446.26	-3000.00	12216.00
	15	6500.00	-3000.00	11258.33
	14	8356.24	-3000.00	9958.58
	13	9958.58	-3000.00	8356.24
	12	11258.33	-3000.00	6500.00
	11	12216.00	-3000.00	4446.26
	10	12802.50	-3000.00	2257.43
	19	-12802.50	-1000.00	2257.43
	20	-12216.00	-1000.00	4446.26
	21	-11258.33	-1000.00	6500.00
	22	-9958.58	-1000.00	8356.24
	23	-8356.24	-1000.00	9958.58
	24	-6500.00	-1000.00	11258.33
	25	-4446.26	-1000.00	12216.00
	26	-2257.43	-1000.00	12802.50
3	27	0.00	-1000.00	13000.00
	26	2257.43	-1000.00	12802.50
	25	4446.26	-1000.00	12216.00
	24	6500.00	-1000.00	11258.33
	23	8356.24	-1000.00	9958.58
	22	9958.58	-1000.00	8356.24
	21	11258.33	-1000.00	6500.00
	20	12216.00	-1000.00	4446.26
	19	12802.50	-1000.00	2257.43
	19	-12802.50	1000.00	2257.43
	20	-12216.00	1000.00	4446.26
	21	-11258.33	1000.00	6500.00
	22	-9958.58	1000.00	8356.24
	23	-8356.24	1000.00	9958.58
	24	-6500.00	1000.00	11258.33
	25	-4446.26	1000.00	12216.00
	26	-2257.43	1000.00	12802.50
	27	0.00	1000.00	13000.00
	26	2257.43	1000.00	12802.50
4	25	4446.26	1000.00	12216.00

	24	6500.00	1000.00	11258.33
	23	8356.24	1000.00	9958.58
	22	9958.58	1000.00	8356.24
	21	11258.33	1000.00	6500.00
	20	12216.00	1000.00	4446.26
	19	12802.50	1000.00	2257.43
5	10	-12802.50	3000.00	2257.43
	11	-12216.00	3000.00	4446.26
	12	-11258.33	3000.00	6500.00
	13	-9958.58	3000.00	8356.24
	14	-8356.24	3000.00	9958.58
	15	-6500.00	3000.00	11258.33
	16	-4446.26	3000.00	12216.00
	17	-2257.43	3000.00	12802.50
	18	0.00	3000.00	13000.00
	17	2257.43	3000.00	12802.50
	16	4446.26	3000.00	12216.00
	15	6500.00	3000.00	11258.33
	14	8356.24	3000.00	9958.58
	13	9958.58	3000.00	8356.24
	12	11258.33	3000.00	6500.00
	11	12216.00	3000.00	4446.26
	10	12802.50	3000.00	2257.43
6	1	-12802.50	5000.00	2257.43
	2	-12216.00	5000.00	4446.26
	3	-11258.33	5000.00	6500.00
	4	-9958.58	5000.00	8356.24
	5	-8356.24	5000.00	9958.58
	6	-6500.00	5000.00	11258.33
	7	-4446.26	5000.00	12216.00
	8	-2257.43	5000.00	12802.50
	9	0.00	5000.00	13000.00
	8	2257.43	5000.00	12802.50
	7	4446.26	5000.00	12216.00
	6	6500.00	5000.00	11258.33
	5	8356.24	5000.00	9958.58
	4	9958.58	5000.00	8356.24

	3	11258.33	5000.00	6500.00
	2	12216.00	5000.00	4446.26
	1	12802.50	5000.00	2257.43
TAPA FRONTAL	1	-4755.28	-6500.00	1545.09
	2	-6657.40	-6500.00	2163.12
	3	-8559.51	-6500.00	2781.15
	4	-4045.09	-6500.00	2938.93
	5	-5663.12	-6500.00	4114.50
	6	-7281.15	-6500.00	5290.07
	7	-2938.93	-6500.00	4045.09
	8	-4114.50	-6500.00	5663.12
	9	-5290.07	-6500.00	7281.15
	10	-1545.09	-6500.00	4755.28
	11	-2163.12	-6500.00	6657.40
	12	-2781.15	-6500.00	8559.51
	13	0.00	-6500.00	5000.00
	14	0.00	-6500.00	7000.00
	15	0.00	-6500.00	9000.00
	12	2781.15	-6500.00	8559.51
	11	2163.12	-6500.00	6657.40
	10	1545.09	-6500.00	4755.28
	9	5290.07	-6500.00	7281.15
	8	4114.50	-6500.00	5663.12
	7	2938.93	-6500.00	4045.09
	6	7281.15	-6500.00	5290.07
	5	5663.12	-6500.00	4114.50
	4	4045.09	-6500.00	2938.93
	3	8559.51	-6500.00	2781.15
	2	6657.40	-6500.00	2163.12
	1	4755.28	-6500.00	1545.09
TAPA TRASERA	1	-4755.28	6500.00	1545.09
	2	-6657.40	6500.00	2163.12
	3	-8559.51	6500.00	2781.15
	4	-4045.09	6500.00	2938.93
	5	-5663.12	6500.00	4114.50
	6	-7281.15	6500.00	5290.07
	7	-2938.93	6500.00	4045.09

8	-4114.50	6500.00	5663.12
9	-5290.07	6500.00	7281.15
10	-1545.09	6500.00	4755.28
11	-2163.12	6500.00	6657.40
12	-2781.15	6500.00	8559.51
13	0.00	6500.00	5000.00
14	0.00	6500.00	7000.00
15	0.00	6500.00	9000.00
12	2781.15	6500.00	8559.51
11	2163.12	6500.00	6657.40
10	1545.09	6500.00	4755.28
9	5290.07	6500.00	7281.15
8	4114.50	6500.00	5663.12
7	2938.93	6500.00	4045.09
6	7281.15	6500.00	5290.07
5	5663.12	6500.00	4114.50
4	4045.09	6500.00	2938.93
3	8559.51	6500.00	2781.15
2	6657.40	6500.00	2163.12
1	4755.28	6500.00	1545.09

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos interiores (Tabla C.2).

Tabla C.2. Coordenadas interiores en dimensiones del prototipo, dimensiones en mm.

COMPONENTE TUBULAR	NUMERACIÓN TÚNEL	X	Y	Z
1	1	-9848.08	-5000.00	1736.48
	2	-9396.93	-5000.00	3420.20
	3	-8660.25	-5000.00	5000.00
	4	-7660.44	-5000.00	6427.88
	5	-6427.88	-5000.00	7660.44
	6	-5000.00	-5000.00	8660.25
	7	-3420.20	-5000.00	9396.93
	8	-1736.48	-5000.00	9848.08

	9	0.00	-5000.00	10000.00
	8	1736.48	-5000.00	9848.08
	7	3420.20	-5000.00	9396.93
	6	5000.00	-5000.00	8660.25
	5	6427.88	-5000.00	7660.44
	4	7660.44	-5000.00	6427.88
	3	8660.25	-5000.00	5000.00
	2	9396.93	-5000.00	3420.20
	1	9848.08	-5000.00	1736.48
	10	-9848.08	-3000.00	1736.48
	11	-9396.93	-3000.00	3420.20
	12	-8660.25	-3000.00	5000.00
	13	-7660.44	-3000.00	6427.88
	14	-6427.88	-3000.00	7660.44
	15	-5000.00	-3000.00	8660.25
	16	-3420.20	-3000.00	9396.93
	17	-1736.48	-3000.00	9848.08
2	18	0.00	-3000.00	10000.00
	17	1736.48	-3000.00	9848.08
	16	3420.20	-3000.00	9396.93
	15	5000.00	-3000.00	8660.25
	14	6427.88	-3000.00	7660.44
	13	7660.44	-3000.00	6427.88
	12	8660.25	-3000.00	5000.00
	11	9396.93	-3000.00	3420.20
	10	9848.08	-3000.00	1736.48
	19	-9848.08	-1000.00	1736.48
	20	-9396.93	-1000.00	3420.20
	21	-8660.25	-1000.00	5000.00
	22	-7660.44	-1000.00	6427.88
	23	-6427.88	-1000.00	7660.44
	24	-5000.00	-1000.00	8660.25
3	25	-3420.20	-1000.00	9396.93
	26	-1736.48	-1000.00	9848.08
	27	0.00	-1000.00	10000.00
	26	1736.48	-1000.00	9848.08
	25	3420.20	-1000.00	9396.93
	24	5000.00	-1000.00	8660.25

	23	6427.88	-1000.00	7660.44
	22	7660.44	-1000.00	6427.88
	21	8660.25	-1000.00	5000.00
	20	9396.93	-1000.00	3420.20
	19	9848.08	-1000.00	1736.48
	19	-9848.08	1000.00	1736.48
	20	-9396.93	1000.00	3420.20
	21	-8660.25	1000.00	5000.00
	22	-7660.44	1000.00	6427.88
	23	-6427.88	1000.00	7660.44
	24	-5000.00	1000.00	8660.25
	25	-3420.20	1000.00	9396.93
	26	-1736.48	1000.00	9848.08
4	27	0.00	1000.00	10000.00
	26	1736.48	1000.00	9848.08
	25	3420.20	1000.00	9396.93
	24	5000.00	1000.00	8660.25
	23	6427.88	1000.00	7660.44
	22	7660.44	1000.00	6427.88
	21	8660.25	1000.00	5000.00
	20	9396.93	1000.00	3420.20
	19	9848.08	1000.00	1736.48
	10	-9848.08	3000.00	1736.48
	11	-9396.93	3000.00	3420.20
	12	-8660.25	3000.00	5000.00
	13	-7660.44	3000.00	6427.88
	14	-6427.88	3000.00	7660.44
	15	-5000.00	3000.00	8660.25
	16	-3420.20	3000.00	9396.93
	17	-1736.48	3000.00	9848.08
5	18	0.00	3000.00	10000.00
	17	1736.48	3000.00	9848.08
	16	3420.20	3000.00	9396.93
	15	5000.00	3000.00	8660.25
	14	6427.88	3000.00	7660.44
	13	7660.44	3000.00	6427.88
	12	8660.25	3000.00	5000.00
	11	9396.93	3000.00	3420.20

	10	9848.08	3000.00	1736.48
	1	-9848.08	5000.00	1736.48
	2	-9396.93	5000.00	3420.20
	3	-8660.25	5000.00	5000.00
	4	-7660.44	5000.00	6427.88
	5	-6427.88	5000.00	7660.44
	6	-5000.00	5000.00	8660.25
	7	-3420.20	5000.00	9396.93
	8	-1736.48	5000.00	9848.08
6	9	0.00	5000.00	10000.00
	8	1736.48	5000.00	9848.08
	7	3420.20	5000.00	9396.93
	6	5000.00	5000.00	8660.25
	5	6427.88	5000.00	7660.44
	4	7660.44	5000.00	6427.88
	3	8660.25	5000.00	5000.00
	2	9396.93	5000.00	3420.20
	1	9848.08	5000.00	1736.48

ANEXO I

I.I. Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la UADY.

El túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), fue la herramienta utilizada para llevar a cabo la presente investigación. Es un túnel de viento corto y sus principales componentes son:

- Rectificador de flujo y pantallas correctoras: las áreas transversales de éstas miden aproximadamente 3 m x 3 m, son la primera zona por la cual pasa el flujo exterior al ser succionado por el ventilador, la turbulencia en la cámara de ensayos se reduce instalando estas pantallas correctoras de flujo antes de la zona de contracción (Figura I.I.).



Figura I.I. Zona de rectificación y pantallas correctoras de flujo.

- Zona de contracción: conecta a las pantallas correctoras y la cámara de ensayos, su objetivo es cambiar gradualmente el área entre éstas y acelerar el flujo succionado, permitiendo alcanzar las velocidades deseadas en la cámara de ensayos (Figura I.II).



Figura I.II. Zona de Contracción.

- Cámara de ensayos: tiene 1 m x 1 m de área transversal y una longitud de 1.5 m. Es la parte donde mejor se aprovecha el aumento de velocidad por el cambio de secciones entre las pantallas recolectoras y el ventilador; en ella son colocados los modelos a experimentar. Conocer sus dimensiones es una pauta durante la modelación de la experimentación, ya que con base a su área transversal se rigen los parámetros de la similitud geométrica (Figura I.III).



Figura I.III. Cámara de ensayos.

- Difusor: localizado entre la cámara de ensayos y el ventilador. Su función es moderar la velocidad del flujo proveniente de la cámara de ensayos al ventilador, en él ocurre un decremento de la velocidad del flujo y se recupera la presión estática (Figura I.IV).



Figura I.IV. Difusor.

- Ventilador: por succión extrae el aire del medio para hacerlo pasar a lo largo del túnel, haciéndolo que fluya de manera constante dentro del mismo y posteriormente lo regresa a la atmósfera. Las características del túnel de viento y su motor, permiten que se alcancen velocidades de aproximadamente 40 m/s (144 km/h) (Figura I.V).



Figura I.V. Zona de ventilador (vista interior).

I.II. Equipos de medición para el túnel de viento.

A) Micromanómetro con tubo de pitot.

El micromanómetro con tubo de pitot (marca PCE Instruments) es utilizado para la medición de la presión diferencial, la velocidad del flujo de aire y la temperatura ambiental durante el desarrollo de las pruebas (Figura I.VI).



Figura I.VI. Micromanómetro con tubo de Pitot.

B) Multisensor de presiones

Multisensor de presiones marca Esterline, modelo 9116. Integra 16 sensores de presión piezorresistivo de silicio, con la capacidad para capturar presiones entre ± 689 kPa (Figura I.VII).



Figura I.VII. Multisensor de Presiones marca Esterline, modelo 9116.