



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DEL
VIENTO EN UNA NAVE INDUSTRIAL CON CUBIERTA
TIPO ARCO, CONSIDERANDO DIFERENTES
RUGOSIDADES EN LA CUBIERTA**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

JOSUÉ CARLOS MARTÍNEZ VALDERRAMA

DIRECTOR DE TESIS

DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

DEDICATORIAS

A mi Mamá (Lupita Valderrama), a mi hermana (Nallely K. Martínez), a mi Papá (Antolín Martínez), a mis abuelos (Rufa Membrillo y Lorenzo Valderrama) y a mi tía (Edith Valderrama), por el cariño y apoyo incondicional.

Gracias

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por todo lo que me brindo durante mi formación como Ingeniero Civil.

Especial agradecimiento a la Facultad de Ingeniería, UNAM, por el gran compromiso que tienen con cada uno de sus estudiantes, en proveernos herramientas para una formación integral.

Al Instituto de Ingeniería, UNAM (IINGEN), por el gran respaldo y apoyo que brinda a sus becarios, motivo por el cual fue posible realizar el presente trabajo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por el apoyo económico para realizar este trabajo.

A mi país, por ser un ente con mucho potencial de crecimiento, con grandes riquezas y sobre todo con talento invaluable en cada una de sus poblaciones.

A Josué Rodríguez y Mauricio Cruz por el apoyo brindado durante la elaboración de las pruebas de túnel de viento.

Al grupo de Ingeniería del Viento del IIUNAM

Al Dr. Adrián Pozos Estrada por guiarme en la elaboración de este trabajo, por todo el apoyo, por transmitirme grandes cosas no solo académicas y reconocer la gran persona que es, ejemplo a seguir para muchos estudiantes.

A mis sinodales por ser parte de mi formación profesional y humana, transmitiéndome sus conocimientos y ofreciéndome sus consejos.

Por último, agradecerles a mi familia y amigos de los cuales he recibido apoyo incondicional.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio de los efectos del viento en una nave industrial tipo arco – columna, ya que es una tipología ampliamente usada a lo largo de la república mexicana, de la cual se tiene poca información disponible en los reglamentos y manuales para diseño por viento. Este estudio se realiza con base en pruebas experimentales en un túnel de viento de capa límite atmosférica (Túnel de viento operado por el IIUNAM), cuyos resultados son analizados con fundamento en la teoría disponible y comparados contra estudios similares realizados en Argentina, donde ya se tiene amplia investigación sobre estas estructuras; de igual manera, se realiza una comparación entre los resultados experimentales obtenidos en este trabajo y el Manual de Obras Civiles para el diseño por viento publicado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el 2008, así como, con las Normas Técnicas Complementarias para el diseño por viento, emitidas en la Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF) en el 2004. Por otra parte se presentan coeficientes de presión netos como propuesta el diseño de este tipo de estructuras.

ABSTRACT

This work presents the study of the effects of wind in an industrial ship whit type arc - column, since it is a typology widely used throughout the mexican republic, of which little information is available in the regulations and manuals for wind design of these structures. This study is based on experimental tests in an atmospheric boundary layer wind tunnel (LemAT wind tunnel), whose results are analyzed based on the available theory and compared to similar studies carried out in Argentina, where there is already extensive research on these structures; In the same way, a comparison is made between the experimental results obtained in this work and the Manual of Civil Works for wind design published by the Federal Electricity Commission (CFE) in 2008, as well as, with the Technical Standards Complementary for wind design, issued in the Official Gazette of the Federal District (GODF) in 2004. On the other hand, total pressure coefficients are presented as a proposal for future research, as well as, so that the civil engineer in practice has bases for fundamented his criterion.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
JUSTIFICACIÓN	2
ALCANCES	3
LIMITACIONES	3
OBJETIVOS	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1. PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO	4
1.1. ¿QUÉ ES UN TÚNEL DE VIENTO?.....	4
1.2. TIPOS DE TÚNEL DE VIENTO	9
1.3. TIPOS DE PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO	18
2. NAVES INDUSTRIALES SOMETIDAS A VIENTO	20
2.1. TIPOS DE NAVES INDUSTRIALES	22
2.2. NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO Y EFECTOS DE VIENTO EN ÉSTAS	26
2.3. FALLAS COMUNES EN NAVES INDUSTRIALES DEBIDAS A VIENTO	32
2.4. DAÑOS OBSERVADOS EN NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO DEBIDOS A VIENTO	33
3. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO DE UNA NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO.....	40
3.1. DISEÑO DEL MODELO DE NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO.....	41
3.1.1. DISEÑO DEL MODELO CON SUPERFICIE LISA.....	50
3.1.2. DISEÑO DEL MODELO CON SUPERFICIE RUGOSA.....	52
3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO	54
4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	58
4.1. COMPARACIÓN DEL MODELO CON SUPERFICIE LISA Y RUGOSA	58
4.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA NORMATIVIDAD EMPLEADA EN DISEÑO POR VIENTO EN MÉXICO	73
4.3. PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN DE UNA NAVE INDUSTRIAL ARCO - COLUMNA	76

5. CONCLUSIONES GENERALES.....	80
5.1. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VENTILADOR PARA TÚNEL DE VIENTO (SITIO WEB)	5
FIGURA 2. TIPOS DE HONEYCOMB Y SUS COEFICIENTES DE PERDIDA (POPE, 1965)	6
FIGURA 3. CONO DE CONTRACCIÓN FABRICADO EN ACERO (BRUSCA ET AL., 2011).....	6
FIGURA 4. CONO DE CONTRACCIÓN DE MADERA DEL TÚNEL DE VIENTO LEMAT.....	6
FIGURA 5. ZONA DE PRUEBAS EXPERIMENTALES, TÚNEL DE VIENTO LEMAT.....	7
FIGURA 6. DIFUSOR 1, VENTILADOR - HONEYCOMB (BRUSCA ET AL., 2011)	8
FIGURA 7. DIFUSOR 2, SECCIÓN DE PRUEBAS - VENTILADOR (BRUSCA ET AL., 2011).....	8
FIGURA 8. TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO CERRADO (BRUSCA ET AL., 2011).....	8
FIGURA 9. TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO ABIERTO (PEREIRA, 2011)	9
FIGURA 10. TÚNEL DE VIENTO DE UN SOLO RETORNO (POPE A. ET AL., 1965).....	11
FIGURA 11. TÚNEL DE VIENTO DE DOBLE CIRCUITO (POPE ET AL., 1965)	12
FIGURA 12. TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO ANULAR (POPE ET AL., 1965).....	12
FIGURA 13. FOTOGRAFÍAS DE COMPONENTES DEL TÚNEL DE VIENTO LEMAT (PLANO ORIGINAL DEL IUNAM)	15
FIGURA 14. FOTOGRAFÍA DEL PANEL DE CONTROL DEL VENTILADOR	16
FIGURA 15. FOTOGRAFÍA DE LOS DISPOSITIVOS DE ESCANEADO DE PRESIONES EN PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO "ZOC'S"	17
FIGURA 16. MÓDULO DE SERVICIO DIGITAL, LECTOR DE PRESIONES DE LOS ZOC'S (SCANIVALVE WEB).....	17
FIGURA 17. PARQUE EÓLICO LA VENTOSA, OAX, MÉXICO. (SITIO WEB)	18
FIGURA 18. ESTRUCTURAS SENSIBLES A LOS EFECTOS DEL VIENTO (INGENIERÍA DE VIENTO, UNAM, A POZOS ET AL., 2017).....	19
FIGURA 19. MAPA DE PELIGRO POR INCIDENCIA DEL CICLONES (CFE, 2001).....	20
FIGURA 20. ZONIFICACIÓN DE VELOCIDADES MÁXIMAS EN LA REPÚBLICA MEXICANA (CFE, 2001).....	20
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN NAVE INDUSTRIAL CON CUBIERTA A DOS AGUAS CON CFD (AMAYA, 2015).....	21
FIGURA 22. GEOMETRÍA DE NAVE INDUSTRIAL CON CUBIERTA A DOS AGUAS (SITIO WEB).....	23
FIGURA 23. NAVE INDUSTRIAL TIPO A) ARCO CON CERRAMIENTOS, B) ARCO COLUMNA (SIN CERRAMIENTOS) Y C) ARCO - TECHO (PAGINA WEB).....	25
FIGURA 24. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CUBIERTA DE NAVE INDUSTRIAL.....	27
FIGURA 25. CANALÓN DE UNA NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO - COLUMNA (SITIO WEB).....	28
FIGURA 26. SEPARACIÓN LAMINAR Y TURBULENTO DEL FLUJO SOBRE UN CILINDRO CIRCULAR (TAMURA, 2013)	31
FIGURA 27. ESTRUCTURA TIPO ARCO PARA CUBIERTA DE GRADAS, UABCS (IINGEN UNAM, 2015).....	34
FIGURA 28. ESTRUCTURA ARCO - COLUMNA A) DISEÑO ORIGINAL Y B) ESTRUCTURA DAÑADA POR VIENTOS DEL HURACÁN ODILE (IINGEN UNAM, 2015).....	35
FIGURA 29. DEFORMACIONES EN CUBIERTA Y OXIDO POR INTEMPERISMO (IINGEN UNAM, 2015)	35
FIGURA 30. DESPRENDIMIENTO DE CUBIERTA EN ESTRUCTURA TIPO ARCO (IINGEN UNAM, 2015).....	36
FIGURA 31. CUBIERTA EN ARCO ALEDAÑA A TERMINAL 1 DE AEROPUERTO A) VISTA GENERAL Y B) DESPRENDIMIENTO DE CUBIERTA (IINGEN UANM, 2015).....	37
FIGURA 32. CUBIERTAS ONDULADAS EN ZONA COSTERA DE BCS (IINGEN UNAM, 2015).....	38
FIGURA 33. CENTRAL DE ABASTOS DE OAXACA, MÉXICO A) ANTES Y B) DESPUÉS DEL COLAPSO (SITIO WEB)	39
FIGURA 34. DIMENSIONES DE LOS MODELOS PARA PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO	42
FIGURA 35. LOCALIZACIÓN DE TOMAS DE PRESIÓN EN UN CUADRANTE DE LA CUBIERTA DEL MODELO	44
FIGURA 36. OBTENCIÓN DE PRESIONES POR SIMETRÍA, EN TODA LA CUBIERTA DEL MODELO.....	45
FIGURA 37. OBTENCIÓN DE PRESIONES EN TODA LA CUBIERTA POR ROTACIÓN DEL MODELO PARA ÁNGULOS COMPLEMENTARIOS	46
FIGURA 38. INSTRUMENTACIÓN DE MODELO DE NAVE INDUSTRIAL ARCO - COLUMNA PARA A) PRESIONES EXTERIORES Y B) PRESIONES INTERIORES	50
FIGURA 39. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN EL COEFICIENTE DE ARRASTRE (SIMIU Y SCANLAN, 1996).....	51
FIGURA 40. INSTRUMENTACIÓN DE MODELO CON RUGOSIDAD PARA A) PRESIONES EXTERIORES Y B) PRESIONES INTERIORES.....	53
FIGURA 41. SOFTWARE FLOPAC, INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN	55

FIGURA 42. MEDICIÓN DE PRESIÓN DE REFERENCIA CON A) TUBO PITOT Y B) CON TOMA DE PRESIÓN CONVENCIONAL	55
FIGURA 43. MODELO LISO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 0 GRADOS	59
FIGURA 44. MODELO RUGOSO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 0 GRADOS	59
FIGURA 45. MODELO LISO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 45 GRADOS	60
FIGURA 46. MODELO RUGOSO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 45 GRADOS	60
FIGURA 47. MODELO LISO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 90 GRADOS.....	61
FIGURA 48. MODELO RUGOSO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 90 GRADOS.....	61
FIGURA 49. . MODELO LISO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 0 GRADOS	62
FIGURA 50. MODELO RUGOSO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 0 GRADOS	63
FIGURA 51. MODELO LISO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, 45 GRADOS	64
FIGURA 52. MODELO RUGOSO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 45 GRADOS	64
FIGURA 53. MODELO LISO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, INCIDENCIA 90 GRADOS	65
FIGURA 54. MODELO RUGOSO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, 90 GRADOS	65
FIGURA 55. MODELO RUGOSO, 7.6 [M/s], Cp TOTAL, 90 GRADOS	66
FIGURA 56. MODELO RUGOSO, 9.49 [M/s], Cp TOTAL, 90 GRADOS	67
FIGURA 57. DESPRENDIMIENTO DE LA CORRIENTE EN LOS MODELOS A) LISO Y B) RUGOSO PARA UNA VELOCIDAD DE 9.49 [M/s]	67
FIGURA 58. EFECTOS DEL VIENTO EN EL MODELO RUGOSO.....	68
FIGURA 59. EFECTOS DEL VIENTO EN EL MODELO LISO	69
FIGURA 60. Cp. TOTALES EN MODELO RUGOSO Vs. BALBASTRO ET AL. (2005).....	70
FIGURA 61. CONTORNOS DE PRESIÓN PARA Cp. TOTAL EN A) MODELO RUGOSO Y B) BALBASTRO ET AL. (2005).....	70
FIGURA 62. ZONIFICACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN DE Cp. EN NAVES INDUSTRIALES CON CUBIERTA DE ARCO CIRCULAR (CFE, 2008)	71
FIGURA 63. EFECTOS DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN EL MODELO LISO A 90 GRADOS	72
FIGURA 64. EFECTOS DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN EL MODELO RUGOSO A 90 GRADOS	73
FIGURA 65. COEFICIENTES DE PRESIÓN TOTAL EN ZONAS EXTREMAS DE LA CUBIERTA, INCIDENCIA DEL VIENTO A 90 GRADOS	¡ERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 66. COEFICIENTES DE PRESIÓN TOTAL EN ZONA INTERMEDIA DE LA CUBIERTA, INCIDENCIA DEL VIENTO A 90 GRADOS.....	75
FIGURA 67. COEFICIENTES DE PRESIÓN PROPUESTOS PARA LA DIRECCIÓN DEL VIENTO PERPENDICULAR A LAS GENERATRICES DE LA CUBIERTA EN ARCO	77
FIGURA 68. COEFICIENTES DE PRESIÓN PROPUESTOS PARA LA DIRECCIÓN DEL VIENTO PARALELO A LAS GENERATRICES DE LA CUBIERTA EN ARCO	78

INTRODUCCIÓN

La evolución del ser humano y sus necesidades han avanzado a pasos agigantados en las últimas décadas en busca de una mayor calidad de vida, en consecuencia los conocimientos científicos y tecnológicos a través de la ingeniería civil se han encargado de crear viviendas, presas, sistemas de potabilización, sistemas de energía eléctrica, sistemas de transporte, por mencionar unos ejemplos; sin embargo, en la actualidad se sigue realizando investigación en cada uno de estos ámbitos.

En particular para México ha sido un reto solucionar problemas debidos a fenómenos naturales, en especial eventos sísmicos como el que se vivió en la Ciudad de México en el año de 1985, donde hubieron pérdidas monetarias y decesos humanos que impactaron en la moral del pueblo mexicano, siendo un parte aguas en la evolución de la ingeniería sísmica. Por otra parte, los fenómenos atmosféricos e hidrometeorológicos (ciclones, tormentas tropicales, huracanes, etc.) que aquejan al país han causado daños en la economía e integridad del pueblo mexicano, es por ello que la ingeniería estructural se está encargando de realizar investigación para dar solución a los problemas que se presentan en la infraestructura con más probabilidad de ser impactada por estos fenómenos, ya que gran parte de estructuras de este tipo no están diseñadas para resistir las fuerzas del viento.

En la actualidad el país tiene una gran tradición en ingeniería sísmica, por el contrario se había mostrado un menor interés a la ingeniería eólica o de viento, siendo un tema de baja competitividad en los mexicanos, ya que los estudios de las estructuras afectadas por fenómenos de viento se hacían en el extranjero, sin embargo, con la actualización de los conocimientos científicos y tecnológicos, ahora ya se contempla realizar una planeación en los diseños de las estructuras susceptibles a efectos del viento, realizando estudios en nuestro país, con ello se pretenden solucionar los problemas del pasado y en un futuro tener competitividad a nivel mundial en temas afines (ingeniería civil, arquitectura y meteorología).

Por lo mencionado anteriormente en este trabajo se realizar un análisis de los efectos del viento de manera experimental de una nave industrial con cubierta tipo arco soportada por columnas. Los experimentos se realizan en el túnel de viento de capa límite atmosférica operado por el IIUNAM. Este tipo de estructuras es sensible a las fuerzas del viento, y a pesar de ello, existe, existe muy poca o nula información acerca de su comportamiento ante fenómenos hidrometeorológicos. Es común encontrar este tipo de estructuras en México, sobre todo en las zonas de recreo o canchas de las escuelas. Cabe destacar que uno de los objetivos principales de la investigación es variar la rugosidad en la cubierta de la nave industrial ya que se desea conocer el impacto que tiene este cambio en el comportamiento del viento.

En el contenido de este trabajo se encuentra al marco teórico que sustenta los motivos de realización de este trabajo, posteriormente en el Capítulo 2 se presenta la información

necesaria para conocer los túneles de viento y sus aplicaciones, así como los componentes de un túnel de viento específico (Túnel de viento operado por el IIUNAM) que se encuentra en la Ciudad de México y es operado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. En el Capítulo 3 se expone el concepto de nave industrial, los tipos de geometrías que existen actualmente, haciendo especial énfasis en la geometría propuesta para realizar este trabajo; también se explican y muestran con base en imágenes, los daños que se pueden presentar en las naves industriales debidos a fuerzas de viento. En el Capítulo 4 se presenta el análisis experimental, describiendo paso a paso cada proceso que se lleva a cabo para realizar las pruebas en túnel de viento, desde el diseño del modelo hasta la obtención de resultados. En el Capítulo 5 se encuentra la comparación de resultados experimentales entre los modelos con diferentes rugosidades en la cubierta, también la comparación de los resultados experimentales contra la normatividad de seguridad actual en México, por último se proponen coeficientes de presión netos para el diseño de las naves industriales Arco – Columna para México. Para finalizar en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de este trabajo, así como, las observaciones y recomendaciones para futuras investigaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

México está expuesto a fenómenos hidrometeorológicos cada año; sin embargo, estos eventos pueden ser de duración e intensidades muy variables en cada temporada y a pesar de que el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encarga de monitorearlos, la infraestructura en la mayoría de ocasiones no está preparada para resistir la demanda de esfuerzos generados en estos eventos, por ejemplo, las cargas de viento sobre estructuras; es por ello que para mejorar la capacidad estructural es necesario desarrollar investigación que fundamente la aplicación de métodos para mitigar los daños estructurales debidos a fuerzas de viento. Con lo mencionado anteriormente se evitarán daños en la infraestructura de cada estado de la república donde se presentan estos fenómenos y con esto se disminuirán las pérdidas monetarias, pérdidas del patrimonio familiar, pero principalmente pérdidas humanas. Cabe destacar que en la actualidad las investigaciones enfocadas en daños estructurales a causa de fuerzas de viento son escasas en algunas estructuras, en especial para las naves industriales tipo arco - columna y otras estructuras sensibles al viento.

JUSTIFICACIÓN

Los desastres naturales atmosféricos e hidrometeorológicos que aquejan al país son inevitables debido a la posición geográfica en la que se encuentra (paralelos 16° y 32°, latitud Norte) y por la gran longitud de sus litorales, pero se ha observado que tienen una presencia cada vez más impredecible e intensidades que han puesto a prueba la

infraestructura en cada punto de incidencia de los litorales, es por ello que los conocimientos de los efectos del viento sobre las estructuras deben ampliarse o mejorarse. Por lo mencionado anteriormente se decidió realizar el presente trabajo particularizando en la infraestructura industrial específicamente en naves industriales con cubierta tipo arco soportada por columnas (Arco – Columna), ya que es una tipología usada comúnmente en todo el país, de la cual se tiene información escasa y no se contempla en las normas de viento en el país.

ALCANCES

Este trabajo tiene como alcances el análisis y la comparación de los efectos del viento en los modelos de naves industriales propuestas con diferentes rugosidades en la cubierta, realizando pruebas en túnel de viento, con el fin de obtener coeficientes de presión confiables que puedan servir de recomendaciones para las normas de seguridad de obras civiles del país.

LIMITACIONES

- Materiales empleados en la fabricación del modelo rígido de túnel de viento
- Métodos constructivos de modelos para túnel de viento
- Número de tomas de presión en los modelos de túnel de viento (128 tap´s)
- Rugosidad para generar condiciones de capa límite atmosférica en el túnel de viento, por lo que se aplica un flujo suave en las pruebas experimentales

OBJETIVOS

Estudiar los efectos del viento en una nave industrial con cubierta tipo arco soportada por columnas, mediante pruebas experimentales en túnel de viento; variando la rugosidad en la cubierta de los modelos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer los componentes de un túnel de viento y sus aplicaciones
- Realizar pruebas experimentales de una nave industrial con cubierta tipo arco en túnel de viento y comparar los resultados entre las dos superficies propuestas
- Comparar los resultados experimentales obtenidos contra investigaciones similares realizadas en Argentina, así como, contra la normatividad de seguridad estructural para el diseño por viento vigente en México
- Proponer coeficientes de presión neta para una nave industrial Arco - Columna

1. PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO

El principal interés de presentar un capítulo exclusivo a los túneles de viento es entender el funcionamiento y las aplicaciones que tiene cada uno de los diferentes tipos, sin embargo, al ser una herramienta con tecnología de punta para nuestra época, también se pretende conocer su historia y el potencial que tiene para la investigación en ingeniería estructural.

Como antecedente, en sus inicios del túnel de viento, la inquietud de observar y analizar qué pasaba con los diferentes cuerpos inmersos en un flujo como es el aire, llevó a pensar en un aparato en el que se pudiera realizar este tipo de observaciones y fue Frank H. Wenham quien creó el primer túnel de viento en 1871, en el cual ya se podían analizar los efectos del viento sobre diferentes cuerpos, generando el flujo de aire con un ventilador (Rotondo et al., 2003); posteriormente con la creación de los primeros aviones, los túneles de viento fueron exclusivamente aplicados a la industria aeronáutica; sin embargo, el interés de analizar el comportamiento del viento que afectaba a las estructuras fue creciendo con aportaciones de diferente persona; sin embargo, fue Alan G. Davenport (1932 - 2009) quien realizó las primeras pruebas en un túnel de viento enfocadas en analizar el comportamiento de las estructuras ante los efectos del viento, dirigiendo con esto a la creación de métodos para calcular los desplazamientos y las cargas en edificios altos y puentes, es por ello que la teoría de Davenport es base fundamental en la ingeniería de viento y estructural.

En la actualidad las investigaciones de los efectos del viento se han centrado principalmente en los daños ocasionados a edificaciones sensibles a efectos del viento (edificios altos y de baja altura, puentes, torres de control, entre otros.), por el contrario se ha puesto menor atención a los efectos del viento sobre las personas (confort, ventilación, calidad del aire, etc.) y estructuras de otro tipo, por ejemplo, paneles solares y aerogeneradores (Baker, 2007).

1.1.¿QUÉ ES UN TÚNEL DE VIENTO?

Un túnel de viento puede definirse como un dispositivo que genera un flujo de aire en condiciones controladas con la finalidad de realizar pruebas de interés para los ingenieros (Pope et al., 1965) y poder comprender de mejor manera los fenómenos físicos del comportamiento del flujo, con este estudio experimental se puede lograr confiabilidad en los diferentes diseños estructurales, y una efectividad en los costos de construcción a partir de un diseño eficiente (Pereira, 2011); en la actualidad las aplicaciones de un túnel de viento son mayores en cada campo de la ingeniería y ciencias afines, no solo para la ingeniería aeroespacial como lo era en el pasado.

Por otra parte, es común considerar números adimensionales como parámetros para la obtención de buenos resultados en pruebas de túnel de viento, estos son: el número de Reynolds, número Mach (en túneles de viento de alta velocidad) y el número de Froude, estas relaciones ayudan a identificar las condiciones del flujo y el impacto que tienen en las pruebas que se realizan variando sus valores admisibles, en algunos casos pueden despreciarse el efecto de alguno de ellos según el tipo de prueba que se vaya a realizar (Pope, 1965).

La mayoría de los dispositivos de túnel de viento dedicados a la experimentación tienen componentes fundamentales y dispositivos adicionados que caracterizan a cada uno de ellos. Para un túnel de viento la nomenclatura de los componentes principales que a continuación se presenta es la utilizada comúnmente, sin embargo, esta puede cambiar de acuerdo a la aceptación terminológica.

COMPONENTES FUNDAMENTALES DE UN TÚNEL DE VIENTO

✓ Ventilador

Máquina principal de un túnel de viento que genera el gradiente de presión necesario para que exista flujo de la masa de aire, también es conocido como impulsor o extractor según sea su aplicación. Se compone de un motor que puede ser de corriente eléctrica o de combustible, un impulsor y aspas.



Figura 1. Ventilador para Túnel de Viento (Sitio Web)

✓ Honeycomb

El honeycomb también es conocido como *estabilizador de flujo*, es un componente principal porque gracias a él se logra uniformizar el flujo de aire, es decir, que dada una situación turbulenta generada en el ventilador, el aire cambie su comportamiento a un flujo laminar al pasar por este instrumento reticulado; se coloca con el objetivo de que en la

sección de pruebas se logren mediciones más precisas y se logre caracterizar el flujo. Este instrumento forma parte de la cámara de asentamiento del flujo. Las formas del honeycomb pueden ser de diferentes tipos con base en su geometría (Figura 2.) según el diseño del túnel de viento ya que influye en la pérdida de energía del flujo que circula a través de él.

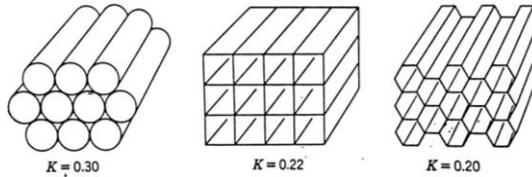


Figura 2. Tipos de Honeycomb y sus coeficientes de pérdida (Pope, 1965)

✓ Cono de contracción

El cono de contracción también es conocido como *cono de entrada* siendo la conexión entre el *honeycomb* y la zona de pruebas; su función es incrementar la velocidad de la corriente y disminuir la turbulencia en la sección de pruebas, con ello se puede caracterizar de mejor manera el flujo. El *cono de contracción* pueden ser de diferentes materiales; sin embargo, el proceso constructivo generalmente determina el material del cual se va a construir (comúnmente de acero), ya que debido a su forma caprichosa debe ser construido exactamente como el diseño lo indica; también se puede decir que el cono de contracción es el componente más difícil de diseñar, porque, la relación del área debe ser maximizada para reducir pérdidas de presión en el paso por la cámara de asentamiento (Brusca et al., 2011).



Figura 4. Cono de contracción de madera del túnel de viento LemAT.

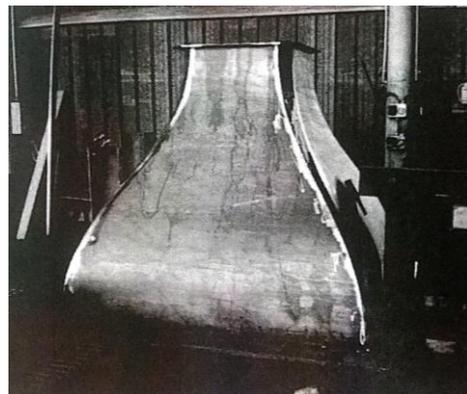


Figura 3. Cono de contracción fabricado en acero (Brusca et al., 2011)

✓ Sección de pruebas

Esta zona es la más importante en un túnel de viento, porque es donde se realizarán las pruebas de los diferentes modelos de estudio y deben presentarse las condiciones del flujo que se requiere para cada una de ellas; es por ello que todos los componentes se diseñan con el objetivo de poder caracterizar al flujo en esta zona. La sección de pruebas es de dimensiones transversales constantes y pueden variar sus medidas de acuerdo con el diseño de cada túnel de viento; cabe destacar que es la sección de todo el túnel de viento (de circuito cerrado o abierto) donde se presenta la máxima velocidad del flujo.

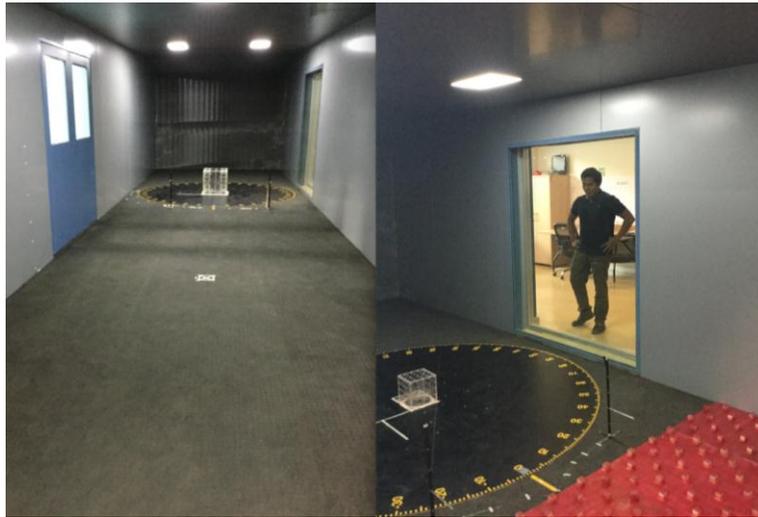


Figura 5. Zona de pruebas experimentales, Túnel de viento LemAT.

✓ Difusor

Es un elemento diseñado siempre con sección transversal variable, que va de un área transversal menor a una mayor, esto en sentido del flujo; su principal función es evitar que los vórtices producidos afecten al flujo en la *sección de pruebas*.

En los túneles de viento de circuito cerrado comúnmente hay dos difusores, uno ubicado posterior a la sección de pruebas “Difusor 1” con geometría transversal igual a la de la zona de pruebas y dimensiones variables hasta igualar las medidas de la sección transversal de la entrada al ventilador (Figura 6); y otro difusor localizado después del ventilador en sentido del flujo, “Difusor 2” cuya geometría de la sección transversal de entrada es obligadamente igual a la sección de salida en el ventilador (generalmente circular) y posteriormente se diseña la sección de salida del mismo difusor con base en las dimensiones de la cámara de asentamiento (Figura 7).

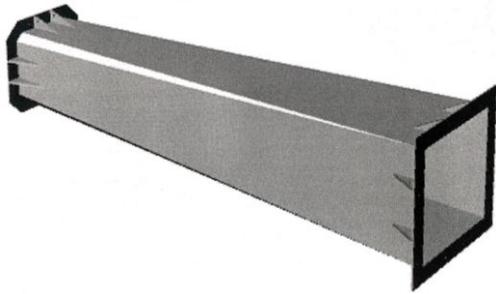


Figura 7. Difusor 2, sección de pruebas - ventilador (Brusca et al., 2011)

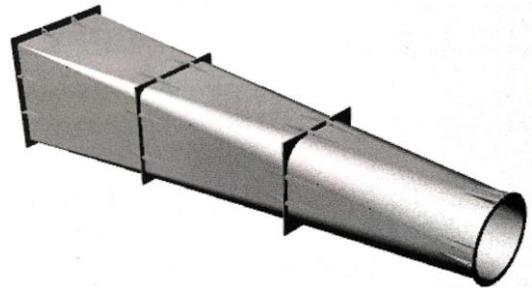


Figura 6. Difusor 1, ventilador - honeycomb (Brusca et al., 2011)

En el esquema que se muestra a continuación se puede identificar cada componente mencionado anteriormente en un túnel de viento de circuito cerrado; en el siguiente subtema se presentaran más tipos de túneles de viento y sus particularidades.

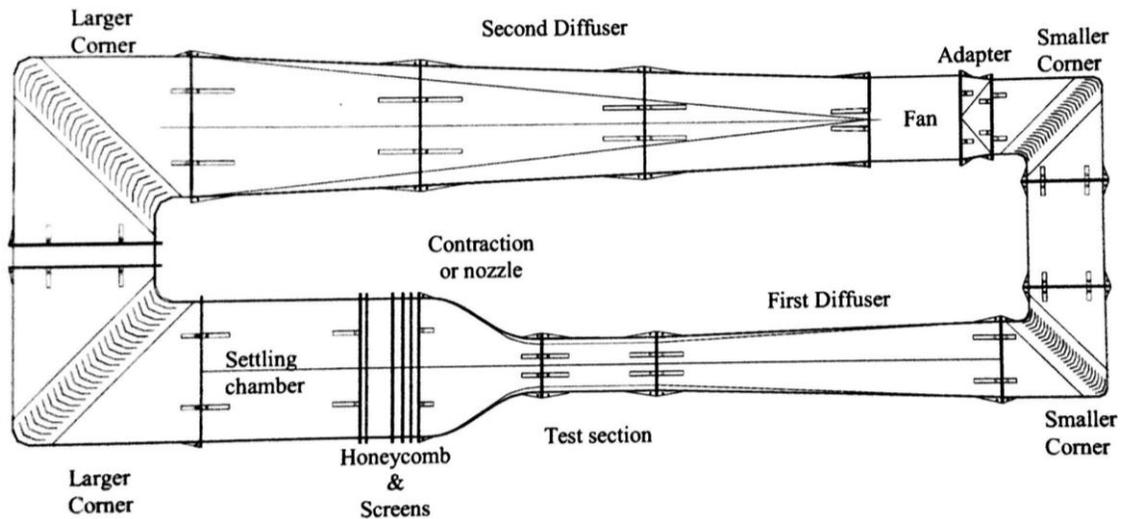


Figura 8. Túnel de viento de circuito cerrado (Brusca et al., 2011)

1.2. TIPOS DE TÚNEL DE VIENTO

Los túneles de viento se pueden clasificar principalmente de acuerdo a su configuración geométrica, ya sea de circuito abierto o cerrado; pero también se pueden clasificar de acuerdo a la velocidad del flujo de aire que puede presentarse en su interior. En este trabajo se exponen de manera particular los de túneles de viento clasificados de acuerdo a su configuración geométrica y se mencionarán de manera general los tipos de túneles de viento clasificados con base en la velocidad de operación del flujo.

TIPOS DE TÚNELES DE VIENTO CON BASE EN SU GEOMETRÍA

TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO ABIERTO

Un túnel de viento de circuito abierto, también conocido como “túnel recto”, tiene como principal característica la configuración geométrica de su circuito, ya que generalmente son rectos en sentido longitudinal, con una admisión de aire en el cono de entrada, una cámara de estabilización del flujo, un cono de contracción, una sección de pruebas y una emisión de aire en el difusor como se muestra en la Figura 9.

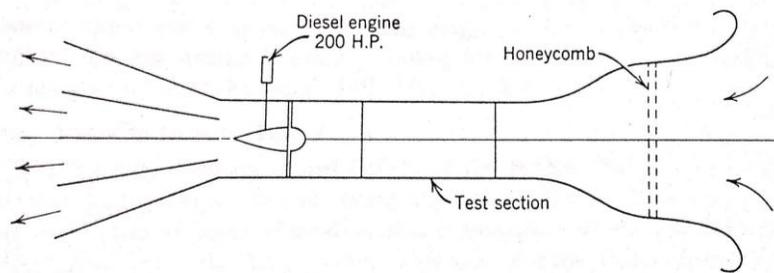


Figura 9. Túnel de viento de circuito abierto (Pereira, 2011)

En este tipo de túnel de viento el flujo de aire que ingresa al circuito solo pasará una vez a través de él, para ser liberado sin redirigirlo por conductos al inicio del circuito; también, el aire que ingresa al circuito lo hace por medio de mecanismo de succión o de inyección que varían de acuerdo a la posición del ventilador, éstas pueden ser al inicio del circuito (inyección de aire) o al final del circuito (succión de aire). A su vez en los túneles de circuito cerrado se puede diferenciar entre dos tipos de acuerdo a su geometría, y son el tipo *Eiffel* y el *NPL*. Un túnel tipo *Eiffel* (creado por Gustav Eiffel quien fue ingeniero

aeronáutico) tiene la particularidad de que la sección de pruebas es una zona abierta, es decir, sin continuidad en las paredes del circuito. Por el contrario en el tipo *NPL*, su característica es que la sección de pruebas es una cámara sellada limitada por paredes que dan continuidad al circuito en la sección de pruebas.

Existen otros tipos de túnel de viento de circuito abierto, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su geometría: tipo *Eiffel* o *NPL*; de acuerdo a las condiciones del flujo: de baja turbulencia y de flujo estable; de acuerdo a sus aplicaciones: de pruebas generales, de pruebas V/STOL (Vertical/Short Take-Off or Landing, Despegues y aterrizajes verticales/cortos), pruebas para Automóviles.

Entre las desventajas de un túnel de viento de circuito abierto se encuentran las siguientes:

- Presencia de ráfagas en el flujo, ya que pueden causar una variación de la presión dinámica en la sección de pruebas, esto también depende del número de ventiladores que se usen; una forma de disminuir estas ráfagas es con la inyección del aire en vez de la succión, y con la aplicación de *Honeycomb*.
- El ruido es desventaja en comparación con un túnel cerrado, este puede ser causado por el paso directo del viento en el circuito, pero es mayor por las vibraciones que inducen los motores en las paredes del túnel causando molestias en construcciones vecinas; el ruido depende de diferentes aspectos como, la cantidad de aire que se impulsa, los materiales de construcción y los mecanismos acústicos para disminuir la intensidad del ruido.
- En túneles abiertos que son montados en campos abiertos representa una desventaja el polvo y las aves del lugar, es por ello que se deben colocar retículas o mallas inclinadas para contener y hacer que caigan las partículas o cuerpos que pudieran introducirse en el circuito del túnel.

TÚNEL DE VIENTO DE CIRCUITO CERRADO

Son tres los tipos de túnel de viento de circuito cerrado conocidos como: túnel de viento de un solo retorno, de doble retorno y de retorno anular.

En la actualidad el túnel de un circuito cerrado es el más aceptado, ya que en los otros tipos, el viento generalmente presenta turbulencia en la sección de pruebas lo cual hace que sea más difícil e imprecisa la interpretación de los resultados.

Túnel de viento de un retorno

El túnel de viento de un solo retorno es también llamado “canal de viento” y como su nombre lo indica se compone de un solo paso por donde circula el flujo de aire, este tipo es

el más empleado en la actualidad para la investigación, debido a la capacidad para realizar la mayoría de pruebas de túnel de viento, pero también es elegido gracias a su económico costo de construcción y operación.

Los componentes fundamentales son ubicados según el diseño propio de túnel, pero, por lo general en túneles de un circuito se colocan en el siguiente orden: Ventilador, Difusor, Honeycomb, Cono de contracción y Sección de pruebas. También otros elementos son utilizados comúnmente en este tipo de túneles de viento son los deflectores, intercambiador térmico y mallas de seguridad.

También se contemplan los deflectores de viento localizados en cada esquina del túnel para direccionar al flujo y evitar que se produzcan turbulencia y con ello pérdidas de energía en los cambios de dirección; también se usan mallas o retículas en los extremos de la sección de pruebas para evitar que en un posible desprendimiento de los modelos pueda dañar otros elementos del túnel de viento.

Como referencia el área en la sección de pruebas es cercana a $65 \text{ [ft}^2\text{]} (6.0 \text{ [m}^2\text{]})$ y se aplican cerca de 300 [hp] en el motor, para generar velocidades del orden de hasta 125 [mph] (200 [Km/h]), las características mencionadas anteriormente hacen un buen túnel de viento de baja velocidad, aunque estas características pueden variar.

Una de las ventajas de este tipo de túnel de viento es que el ventilador tiende a uniformizar alguna variación en el flujo de aire debida a los modelos que se prueban.

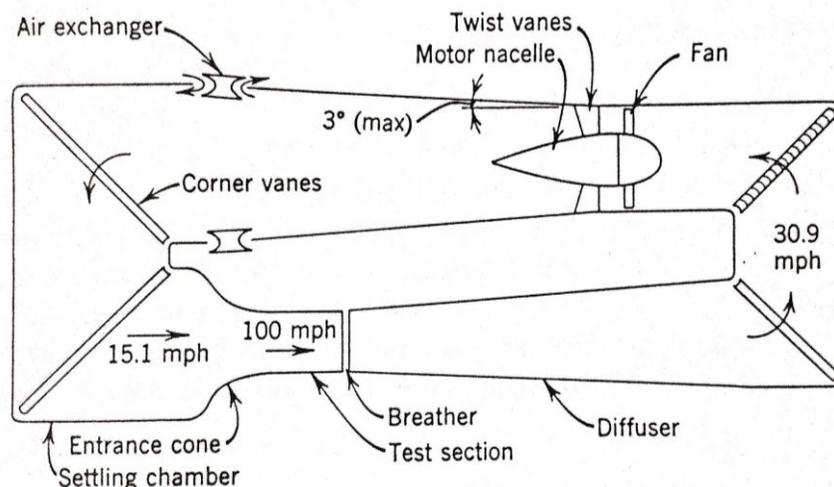


Figura 10. Túnel de viento de un solo retorno (Pope A. et al., 1965)

Túnel de viento de doble retorno

Es una geometría poco usada debido a que presenta una desventaja importante con respecto al túnel de viento de un retorno, que está relacionada con la variación en la distribución de velocidad en la sección transversal de la zona de pruebas, la cual puede ser causada por la perturbación del flujo consecuencia de la estela de un modelo de gran tamaño.

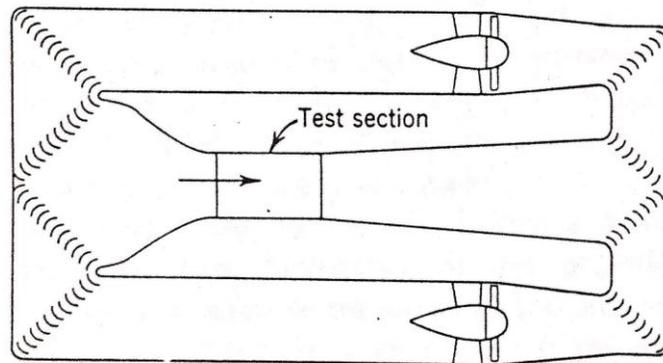


Figura 11. Túnel de viento de doble circuito (Pope et al., 1965)

Túnel de viento de retorno anular

El túnel de viento de retorno anular es una configuración poco usada, ya que se ha encontrado una mayor aceptación en los resultados que se obtienen en las pruebas del túnel de viento de un solo retorno, y al igual que el túnel de viento de doble retorno, se puede llegar a presentar turbulencia que dificulte la caracterización del flujo en la sección de pruebas.

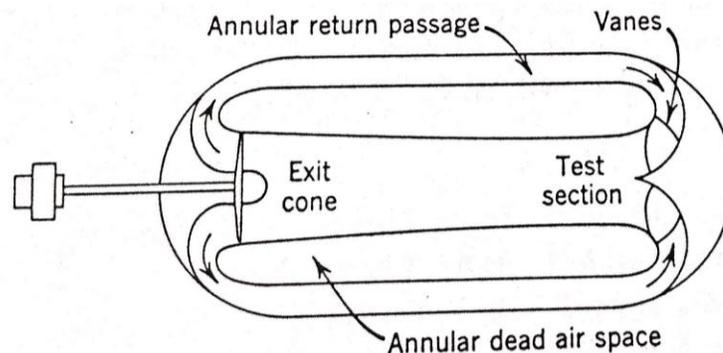


Figura 12. Túnel de viento de circuito anular (Pope et al., 1965)

En general los tipos de túnel de viento de circuito cerrado se pueden clasificar de acuerdo a su geometría: de un retorno, de doble retorno y de retorno anular; de acuerdo a las condiciones del flujo: presión o densidad variable en el circuito; de acuerdo a sus aplicaciones: de escala real, de dispersión de contaminantes aplicando humo, pruebas de vuelo libre y pruebas de giro (en aeronaves).

TIPOS DE TÚNELES DE VIENTO CON BASE EN LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL FLUJO

Como se mencionó, otra clasificación de túneles de viento es de acuerdo a la velocidad a la que opera el flujo de aire en la sección de pruebas, es por ello que se distingue entre túneles de viento de alta y baja velocidad.

Túnel de viento de baja velocidad

Se dice que un túnel de viento es de baja velocidad cuando la velocidad máxima que puede alcanzar el viento en la sección de pruebas tiene un valor de 300 [mph] (482.8 km/h) o menor; En general los túneles de viento de este tipo hacen posible el uso de modelos que son viables por su rapidez y económica elaboración y ofrecen resultados confiables para la investigación.

En esta clasificación se encuentran los túneles de viento (para circuito cerrado) de un retorno, de presión de un solo retorno, de densidad variable, de escala real, de humo, de vuelo libre y de giro; también los túneles de viento (para circuito abierto) de baja turbulencia, de estabilidad, de dos dimensiones, de hielo, de pruebas generales, de V/STOL y para automóviles.

Túnel de viento de alta velocidad

Se puede decir que un túnel de viento es de alta velocidad si el número Mach es aproximadamente de 0.5, con una velocidad mínima en la sección de pruebas de 380 [mph] (611.5 [km/h]). En esta clasificación se encuentran los túneles de viento Sónicos, Transónicos, Supersónicos e Hipersónicos (Pope, 1965).

DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO LemAT

En este subtema se describen los componentes, dimensiones y capacidades del túnel de viento en el cual se realizaron las pruebas para este trabajo. Para el análisis experimental de la nave industrial tipo arco soportada por columnas que se propone en este trabajo, se realizaron pruebas en el túnel de viento de LemAT, ubicado en Delfín Madrigal 668 en Coyoacán, Ciudad de México; dentro de las instalaciones de la UNAM; es un túnel de viento de un circuito cerrado y de capa límite atmosférica, cuenta con los componentes fundamentales de un túnel de viento como el ventilador, difusor, cámara de asentamiento, cono de contracción, sección de pruebas y deflectores en los cambios de dirección del flujo; una descripción más detallada se hace a continuación.

El ventilador axial tiene una dimensión de 3.30 [m] de diámetro, conectado a un motor con capacidad de 600 [rpm], para impulsar un flujo de aire de $170 [m^3/s]$ aproximadamente; tiene dos difusores, en la entrada y en la salida del ventilador con el fin de controlar el comportamiento del flujo del viento; en cada esquina se usan deflectores que tienen la función de darle dirección al viento evitando pérdidas grandes de energía en el flujo, esto dispositivos son diseñados para cada caso particular de túnel de viento ya que existen diferentes geometrías básicas aplicables. Se tiene una cámara de asentamiento conformada por dos mallas protectoras en la entrada y en la salida, un intercambiador térmico, donde circula agua para mantener un control de la temperatura y un *honeycomb* que uniformiza el flujo; cuenta con un cono de contracción fabricado en madera, reforzado con acero en el exterior, sus dimensiones son de 5.50 [m] por 5.50 [m] en la entrada y 3.0 [m] de ancho por 2.6 [m] de alto, en la salida este cono de contracción puede incrementar la velocidad hasta 110 [km/h] en la sección de pruebas, cuando el ventilador opera a su máxima capacidad. El túnel de viento de LemAT cuenta con dos secciones de pruebas, una de ellas (la principal) se encuentra dentro de las 14 más grandes del mundo de acuerdo a su longitud (14 [m] centro a centro entre las mesas giratorias), con dimensiones transversales de 3 [m] de ancho por 2.6 [m] de alto, y es en esta sección donde se alcanza la máxima velocidad en el circuito; la segunda sección de pruebas tiene dimensiones de 4.3 [m] de ancho por 4 [m] de alto, con una longitud de 5 [m]. Las mesas giratorias donde se montan los modelos tienen un diámetro de 2.70 [m] y en su perímetro tiene una escala graduada con precisión de un grado angular, que ayuda a saber la dirección de incidencia del viento sobre los modelos. Para completar el circuito se tiene un difusor conectado mediante un adaptador de geometría al ventilador.

Todos los componentes mencionados anteriormente se muestran en el plano general del túnel de viento LemAT (Figura 13); se hace énfasis en que cada componente de un túnel de viento, tienen un diseño justificado en conocimientos teóricos y prácticos que se han llevado a cabo con el paso del tiempo, algunos ejemplos se encuentran en las referencias bibliográficas [1] y [2].

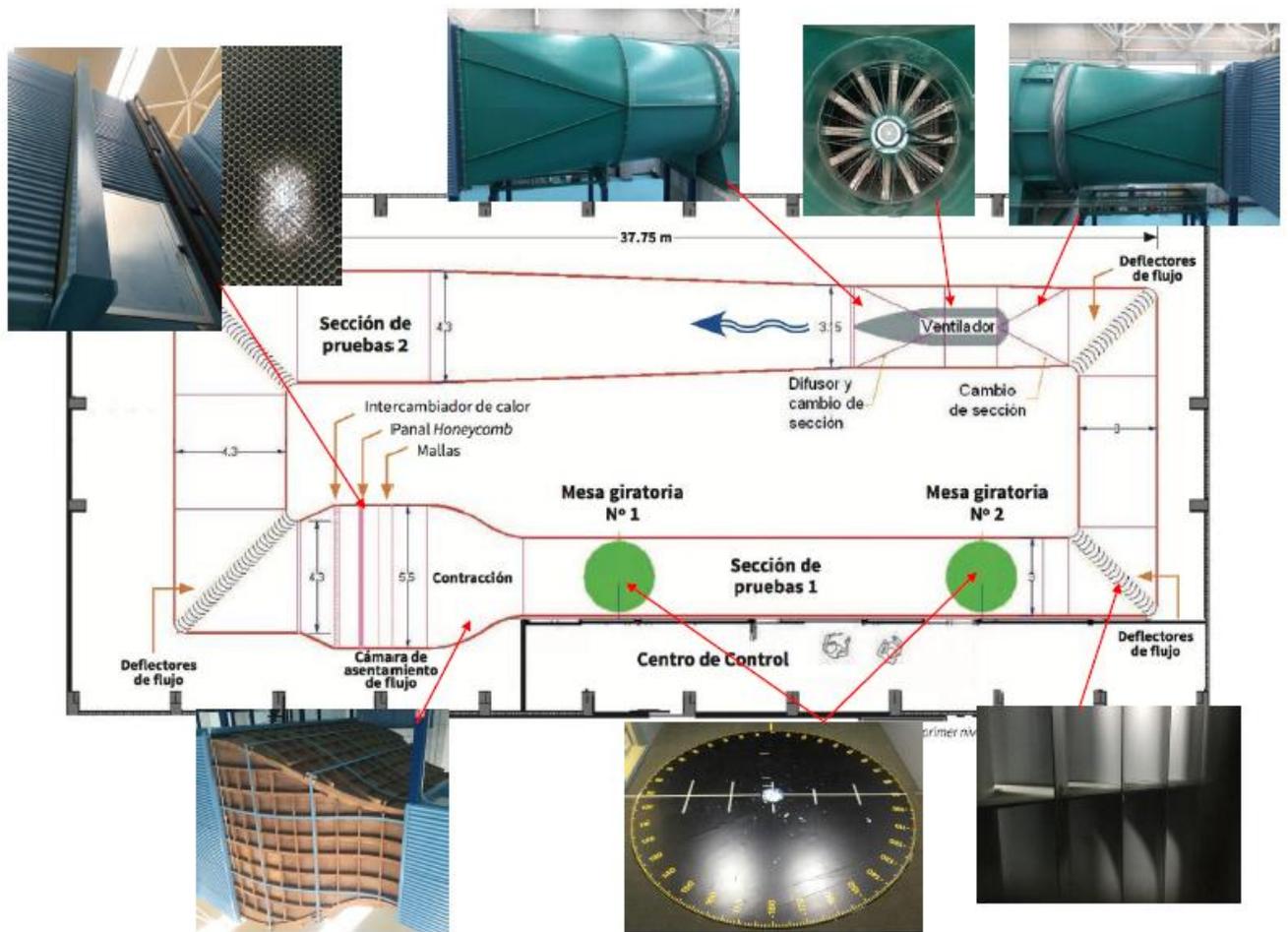


Figura 13. Fotografías de componentes del túnel de viento LemAT (Plano original del IIUNAM)

Las funciones del túnel de viento se operan desde un cuarto de control, donde se controla la posición de las mesas giratorias en la sección de pruebas, ahí también se encuentra el panel de operación del ventilador, para realizar variaciones en las revoluciones a las que opera y con ello modificar la velocidad del flujo de aire (Figura 14).



Figura 14. Fotografía del panel de control del ventilador

Otro tipo de componente necesario para el análisis de modelos en túnel de viento es el dispositivo de medición de presión, el cual tiene la finalidad de escanear las presiones en diferentes puntos o canales simultáneamente en una prueba de túnel de viento.

Los dispositivos principales que componen el sistema de escaneo de presiones en el túnel de viento LemAT son:

- Los dispositivos miniatura de escáneres ZOC (Figura 15) proporcionan una salida de datos muy precisos y pueden trabajar con altos niveles de señales electrónicas; son 32 las entradas o canales que se pueden ejecutar en un dispositivo como este, son elegidos porque ahorran grandes costos en la instrumentación ya que pueden introducirse en algunos modelos; en el túnel de viento LemAT se cuenta con cuatro dispositivos ZOC con lo cual se pueden realizar lecturas de hasta 128 canales simultáneamente.

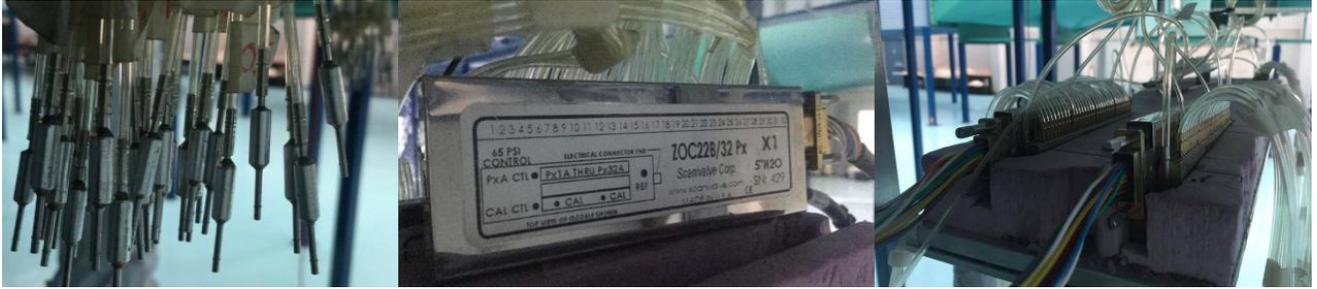


Figura 15. Fotografía de los dispositivos de escaneo de presiones en pruebas de túnel de viento "Zoc's"

- Los dispositivos de lectura de datos de salida en el ZOC pueden ser de tres tipos, el primero es mediante tarjetas de interfaz para lectura de datos del ZOC, el segundo es mediante el dispositivo ERAD4000 (Scanivalve) que permite una conexión mediante cable tipo Ethernet que se coloca desde el dispositivo ZOC en el interior del modelo hasta la conexión a los dispositivos de lectura con un alcance máximo de 100 [m], evitando con esto el “ruido” en las señales; la tercera opción es la utilizada en el túnel de viento LemAT que es con el dispositivo digital DSM4000 (Figura 16.) que se puede comunicar mediante cable Ethernet TCP / IP o UDP. (Sitio web, Scanivalve)



Figura 16. Módulo de servicio digital, lector de presiones de los Zoc's (Scanivalve Web)

1.3. TIPOS DE PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO

Las pruebas en túnel de viento tienen numerosas aplicaciones en diferentes áreas científicas y tecnológicas, dependiendo del objetivo de cada una de ellas, por ejemplo, en la industria aérea, automotriz, edificaciones, energías renovables y en general para investigaciones basadas en el flujo del viento como la aerodinámica de los cuerpos. Se considera que es importante tener en cuenta las aplicaciones disponibles para poder seguir avanzando en el conocimiento enfocado a cada una de las áreas mencionadas.

Los tipos de pruebas relacionadas con energía eólica (Figura 17) es un tema que en la actualidad se le ha adjudicado mucho potencial, ya que, ante la problemática que se presenta en el consumo de recursos naturales no renovables para producir energía eléctrica, es muy importante crear e innovar mecanismos que permitan aprovechar los fenómenos climatológicos como la temperatura, precipitación y fuerza del viento para producir energía. Estas pruebas pueden estar enfocadas en la solución de aspectos directamente con la resistencia de la estructura ante fuerzas del viento de algún objeto, así como, con la eficiencia en el aprovechamiento de las fuerzas del viento para generar energía eléctrica.



Figura 17. Parque eólico La ventosa, OAX, México. (Sitio Web)

Otro tipo de pruebas que es posible realizar en un túnel de viento es la dispersión de partículas contaminantes, con el objetivo de saber el movimiento de las partículas emitidas por una fuente en un punto geográfico determinado, con base en las características climatológicas, topográficas, orográficas y otras; de los resultados de estas pruebas pueden derivarse otro tipo de estudios en diferentes áreas científicas, por ejemplo, la concentración de elementos químicos en la atmósfera, los cuales pueden afectar la salud humana de algunas poblaciones.

En cuanto a pruebas en túnel de viento para obras civiles, el campo de aplicación es amplio para diferentes tipos de construcciones, pueden ser pruebas en edificios altos, edificios de baja altura, puentes, torres de enfriamiento, torres de control aéreas, tenso – estructuras, techumbres, torres de transmisión, chimeneas, cables, antenas, anuncios espectaculares y estructuras con geometrías poco regulares, por mencionar algunas; sin embargo los objetivos en cada una de ellas son muy diferentes, ya que, pueden realizarse pruebas para analizar los desplazamientos, las vibraciones, la resistencia de materiales ante las fuerzas del viento, así como, estudiar los efectos del viento sobre una estructura considerando edificaciones vecinas.

Existen estudios relacionados con estructuras civiles enfocados únicamente al confort de las personas, ya que la geometría o configuración de las edificaciones modifica el comportamiento del flujo del viento, originando incomodidad o condiciones desfavorables para la circulación de las personas y en ocasiones poniendo en riesgo su integridad, ya sea en lugares abiertos o cerrados. (Figura 18, Clase Ingeniería de Viento, UNAM, A. Pozos et al., 2017).



Figura 18. Estructuras sensibles a los efectos del viento (Ingeniería de viento, UNAM, A Pozos et al., 2017)

Se realizan estudios referidos a otras áreas tan importantes como la ingeniería civil, tal es el caso de pruebas en túnel de viento para aeronaves, naves aeroespaciales y automóviles, sin embargo, todos parten de estudios de aerodinámica en diferentes cuerpos geométricos básicos, los cuales aún son tema importante de investigación.

2. NAVES INDUSTRIALES SOMETIDAS A VIENTO

Las naves industriales se pueden definir como edificaciones de geometría variable de acuerdo a sus aplicaciones, generalmente usada en las diferentes actividades económicas y recreativas para alojar, almacenar o cubrir objetos, productos y/o personas. Estas edificaciones representan un aspecto económico fundamental en una línea de producción pero también una opción muy común para resguardar personas, es por ello que los daños causados en este tipo de estructuras por la presencia de fenómenos naturales puede ocasionar pérdidas económicas importantes o poner en riesgo la vida de las personas en la zona de ocurrencia.

Los daños que puede causar el viento en una nave industrial dependen de varios factores, sin embargo, dentro de los aspectos más importantes se encuentran la geometría de la nave industrial, los materiales con los que se construye, el entorno terrestre, la topografía, así como, la velocidad y dirección del viento.

En general en México las velocidades máximas de viento debidas fenómenos hidrometeorológicos se presentan en zonas costeras en los estados de Baja california Sur, Sonora, Sinaloa, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Yucatán y Quintana Roo, como se observa en las imágenes (Figura 19 y 20); donde hay una gran cantidad de edificaciones sensibles a los efecto del viento entre las que se encuentran las naves industriales.

Figura 90. Zonificación de velocidades máximas en la Republica Mexicana basada en datos de CFE

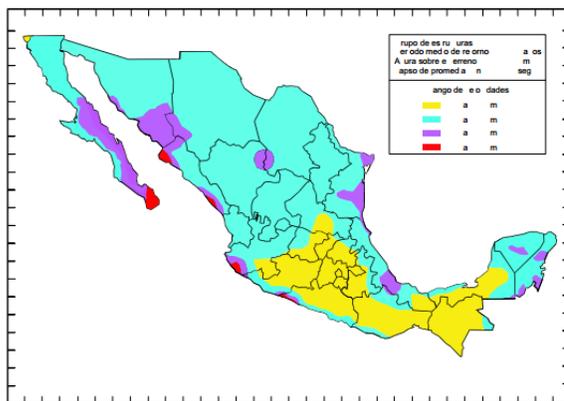


Figura 20. Zonificación de velocidades máximas en la República Mexicana (CFE, 2001)

Figura 72. Mapa de peligros por incidencia de ciclones

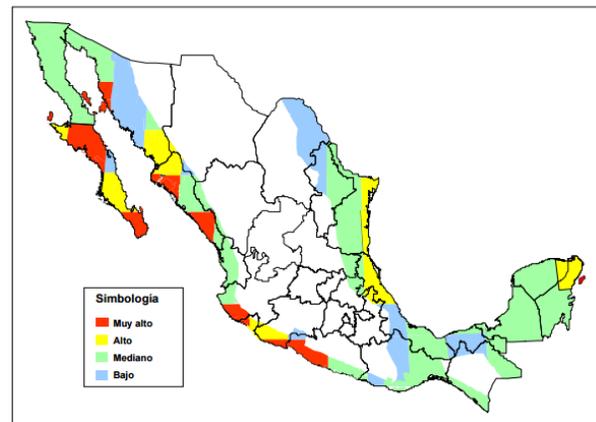


Figura 19. Mapa de peligro por incidencia del ciclones (CFE, 2001)

Se tiene como antecedente el conocimiento de que en una edificación de baja altura sometida a fuerzas de viento, la zona más vulnerable es la techumbre o cubierta construida con materiales delgados, las cuales son muy comunes en edificaciones con grandes claros ya sea construcciones industriales, comerciales o recreativas; esto es debido a que pueden ser desprendidas y levantadas de la estructura por efectos de succión que ocasiona el viento en ciertas geometrías, pero también pueden ser deformadas debido a fuerzas de compresión en las superficies. (CENAPRED, 2001), un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 21, donde se observa la variación de las presiones en la superficie de una nave industrial con cubierta a dos aguas, analizada con dinámica de fluidos computacional (CFD). Esta distribución de presiones en las superficies de la nave industrial se ilustra en contornos de presión, donde el color rojo representa a las presiones máximas sobre la estructura y en color azul fuerte las presiones negativas máximas o succiones, con esto se corrobora que existen ambas fuerzas actuando sobre la estructura. Más adelante en este capítulo se describirá la tipología de naves industriales, los efectos y los daños que se pueden presentar en cada una de ellas.

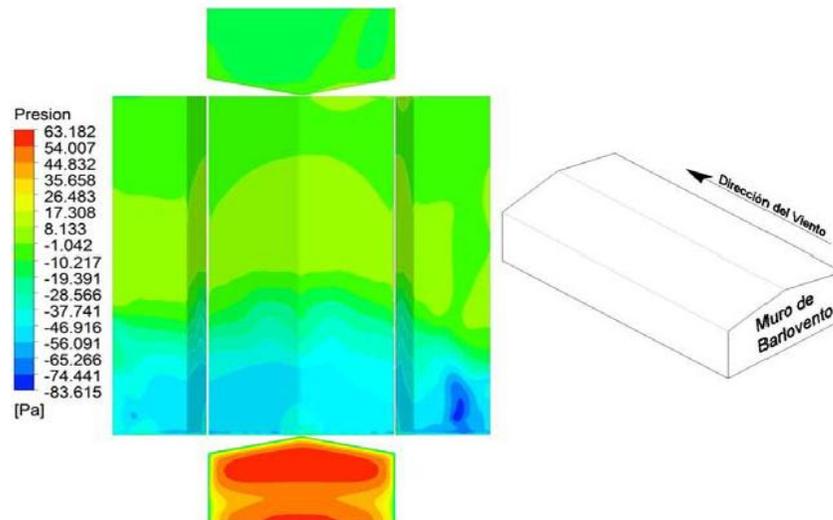


Figura 21. Distribución de presiones en nave industrial con cubierta a dos aguas con CFD (Amaya, 2015)

2.1. TIPOS DE NAVES INDUSTRIALES

En las décadas pasadas la necesidad de resguardar los productos de una fábrica, la materia prima, alojar equipos o maquinaria, así como resguardar al personal de trabajo se solucionó con la construcción de edificaciones grandes y amplias donde se pudiera maniobrar o tener un acomodo personalizado dentro de ellas, entonces se construyeron las naves industriales usando diferentes materiales en su construcción, con el fin de eficientar los costos que generaban. En la actualidad sigue siendo necesario construir naves industriales ante el crecimiento paulatino de las industrias y poco a poco los diseños han evolucionado y se han aplicado en diferentes ámbitos; es por ello que las naves industriales se pueden clasificar de acuerdo a los materiales de construcción en su estructura, pero también de acuerdo a su geometría.

De acuerdo a los materiales de construcción se pueden diferenciar entre naves de acero, naves de concreto y naves mixtas.

Naves Industriales con estructura de acero

Este tipo de naves industriales es la más común en México, utilizada cuando los claros son de 30 metros o más, ya que permite un proceso constructivo rápido en comparación con los otros tipos de material, también es posible diseñar naves altas y con grandes claros sin la necesidad de columnas intermedias (siempre considerando el gran peso propio de la estructura), con esto se obtiene otra ventaja en iluminación de manera natural al interior y de un amplio campo libre de obstáculos para maniobras u operación de equipos en su interior, otra ventaja es que al ser estructuras más ligeras que el concreto, la descarga en el terreno de desplante es menor, con lo cual se pueden esperar asentamientos diferenciales bajos para suelos con este tipo de problemas; por otro lado, el ambiente en el cual se encuentra debe de considerarse para evitar efectos adversos, por ejemplo, de óxido, corrosión y dilatación o contracción por temperatura. (Pena, 2016). Por lo mencionado anteriormente el uso de acero como materia prima para la fabricación de elementos estructurales de naves industriales, tiene una fuerte presencia gracias a las ventajas que ofrece el manejo de este material, como lo son la ductilidad, la rapidez de armado, adaptación a cambios de uso y cambios en el diseño de la nave industrial posteriores a su construcción.

Naves Industriales con estructura de concreto

Este tipo de naves industriales se puede realizar con elementos prefabricados de concreto, colados “in situ” o con la combinación de ambos; la construcción con este material es rápida cuando se realizan con elementos “prefabricados” porque se puede decir que es un ensamble de piezas, por el contrario, con elementos colados “in situ” el tiempo de construcción es mucho mayor, siendo la opción menos utilizada por esta razón a pesar de que sea la alternativa más económica de nave industrial. Por otra parte, las naves

industriales fabricadas con concreto tienen la desventaja de carecer de iluminación natural en el interior ya que no pueden ser muy altas (son utilizadas generalmente para claros menores a 30 metros); sin embargo, tienen como ventaja la posibilidad de construcción en forma de edificio, lo cual permite tener subestructuras dentro de la misma planta.

Naves Industriales con estructura de materiales mixtos

Este tipo de naves industriales construidas con acero y concreto son comunes gracias a la disminución en los costos de construcción, pero también a la posibilidad de realizar diseños de plantas especiales para sus diferentes usos con subestructuras.

Otra forma más general de clasificar a las naves industriales es de acuerdo a su geometría, por ello, a continuación se muestra la tipología usada comúnmente en México, enfatizando en la geometría propuesta motivo de realización de este trabajo.

Naves industriales con cubierta a dos aguas

La geometría de una nave industrial con cubierta a dos aguas es la más utilizada en México para las distintas actividades comerciales o industriales, se caracterizan por tener dos superficies en la techumbre, con pendiente opuestas y reflejadas con respecto a su eje de simetría longitudinal (Figura 22); estas pendientes son variables dependiendo del uso de la edificación, sin embargo, cuando se somete la estructura a fuerzas viento, se recomienda diseñar la cubierta con un ángulo de 15° a partir de una horizontal en el apoyo de la cubierta, esto para tener coeficientes de presión en la techumbre con valores más bajos en comparación con ángulos mayores y menores (Holmes, 2001)



Figura 22. Geometría de nave industrial con cubierta a dos aguas (Sitio web)

La tipología de nave industrial con cubierta a dos aguas tiene variantes con base en su estructuración, estas son: las naves industriales compuestas por sistema de marco biempotrado, marco biarticulado, marco con canto variable, marco triarticulado, columna – armadura, tipo marco, tipo marco rígido, por mencionar algunos ejemplos (Edmundo, 2015).

Naves industriales con cubierta tipo arco

Las naves industriales con cubierta tipo arco son una alternativa para cubrir espacios de gran tamaño con una buena eficiencia estructural, ya que para su construcción se emplean materiales ligeros, esta tipología es muy popular en campos industriales y zonas rurales a lo largo de todo el país, generalmente empleadas en el almacenamiento, techumbre de espacios deportivos, cubierta para talleres de construcción, entre otros usos. La principal característica de esta tipología de nave industrial es que describe una semi – circunferencia en la cubierta y gracias al desempeño geométrico y de los materiales de construcción, es posible cubrir claros grandes sin la necesidad de columnas intermedias, lo cual es una ventaja muy importante en comparación con otras geometrías.

Existen diferentes tipos de naves industriales tipo arco, a las que se les da un uso diferente de acuerdo a las actividades que se realizan dentro de ellas. Estos tipos son:

Naves industriales tipo arco con cerramientos

Se puede describir como una cubierta de arco soportada por muros de concreto o mampostería, que a su vez impiden el flujo del viento a través del perímetro que describe la cubierta en una vista de planta; es importante la característica de cerramientos, porque, las presiones totales conformadas por presiones interiores y exteriores, que se generen en una nave industrial de cualquier tipo dependerán del porcentaje del área de las aberturas que se tengan en los muros para diferentes ángulos de incidencia del viento en la estructura, como referencia de este porcentaje se tiene que, la normatividad empleada en diseño por viento en México, considera aberturas para naves industriales de arco en barlovento y sotavento, que abarcan del 15% al 25% del área total de la superficie donde se encuentra (MOC-DV, CFE 2008); estos parámetros representan una abertura relativamente pequeña, por lo tanto, puede considerarse como nave industrial cerrada. En general, los usos que se les da a este tipo de naves industriales son el almacenaje de materias primas o productos, techar espacios en un proceso de fabricación, resguardar personas, entre otros.

Naves industriales tipo arco – columna

Es una geometría conformada por una cubierta de estructura de acero con forma de semi – arco, la cual es soportada por columnas de concreto o acero. Su principal característica es que permite el flujo libre del viento a través de ella, ya que no cuenta con muros o recubrimientos en su perímetro; y en comparación con una nave industrial con cerramientos, la interacción de fuerzas internas y externas cambian los efectos del viento

sobre la estructura, por lo tanto las consideraciones para el diseño de sus elementos estructurales deben ser diferentes con respecto a otra tipología de nave industrial.

Como se mencionó, el paso o impedimento del flujo del viento a través de una nave industrial es una característica que debe tenerse en cuenta en el diseño de la misma, ya que la combinación de presiones internas y externas tendrán un gran impacto en el diseño de elementos de recubrimiento, elementos de sujeción para la cubierta y en la estructura principal; los cuales se mencionaran con más detalle en el capítulo siguiente de este trabajo.

En cuanto a sus aplicaciones, este tipo de nave industrial es usada comúnmente para techar espacios deportivos, para cubrir maquinaria, para talleres de construcción en obra, por mencionar algunos.

Naves industriales tipo arco – techo

Esta tipología es la más común en la industria del transporte, usada principalmente como instalaciones aeroportuarias, por ejemplo, hangares aéreos; es muy poco usada en México considerando sus limitadas aplicaciones y el gran número de naves industriales construidas con otros tipos de formas. La geometría de su cubierta se basa en un semi – arco, pero esta tipología tiene la peculiaridad de ser soportada directamente por estructuras a nivel del suelo, es decir, carece de columnas o muros de soporte y la descarga del peso es directamente al suelo.

La Figura 23 muestra imágenes de las naves industriales descritas.

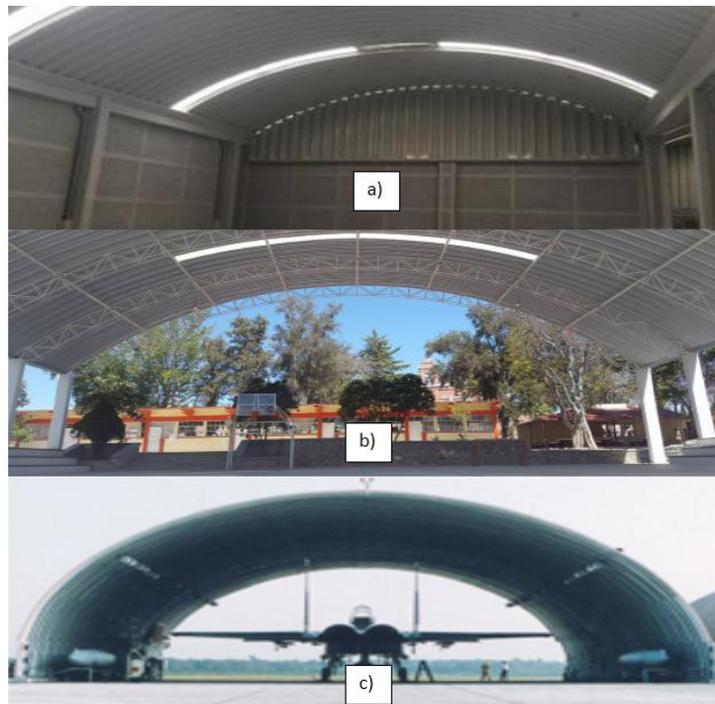


Figura 23. Nave industrial tipo a) Arco con cerramientos, b) Arco columna (sin cerramientos) y c) Arco - techo (Pagina web)

2.2. NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO Y EFECTOS DE VIENTO EN ÉSTAS

En el subtema anterior se definió de manera general la geometría y las aplicaciones de las naves industriales tipo arco, sin embargo, es importante tener en cuenta los elementos constructivos aplicables a esta tipología, así como los materiales más usados en México. Lo mencionado anteriormente conforma la primera parte de este subtema, para la segunda parte se exponen los efectos del viento en las naves industriales tipo arco con base en la literatura.

ELEMENTOS DE LAS NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO

En cuanto a los elementos que componen a una estructura se puede diferenciar entre dos tipos, que son elementos estructurales como columnas, cerchas, arrostamientos, etc., o elementos no estructurales, por ejemplo, recubrimientos, tornillería, remaches, entre otros. En general el recubrimiento de una nave industrial debe tener la característica de ser impermeable, durable, térmico, de larga duración y en lo posible ser ligero; en algunas ocasiones un solo material no cumple con los requerimientos del proyecto, por ello es posible utilizar más de uno para cumplir con las características, de esta manera satisfacer las características arquitectónicas, económicas y funcionales. A continuación se mencionan algunos elementos utilizados en la construcción de cubiertas de naves industriales arco – columna.

Recubrimientos en naves industriales tipo arco

Uno de los materiales que se utiliza es *lámina de acero ondulada galvanizada*, la cual se monta con tornillería galvanizada, de igual manera, dependiendo del calibre de la lámina varía el número de tornillos que se colocan sobre las estructuras que compone una cubierta, por otro lado, los empalmes longitudinales y transversales entre placas de lámina se realiza generalmente con remaches galvanizados en la cresta de la onda. Es importante enfatizar que el recubrimiento de una nave industrial arco – columna pueden ser soportado por elementos estructurales que generalmente se usan en otras tipologías (Figura 24), pero también pueden ser soportadas por el recubrimiento mismo, es decir, sin el uso de elementos adicionales más que la lámina.

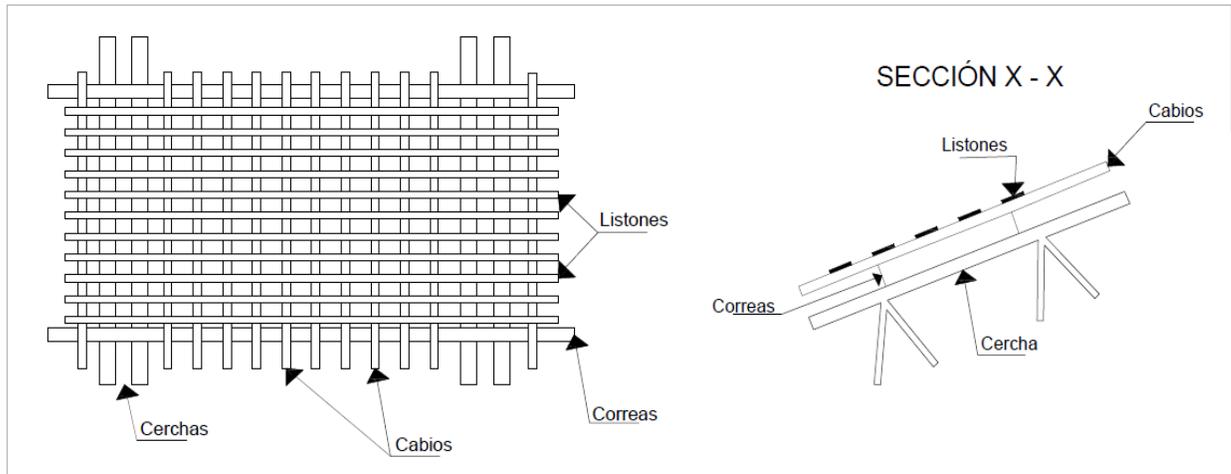


Figura 24. Elementos estructurales de cubierta de nave industrial

Otra alternativa es el recubrimiento mediante *lámina de aluminio* que ofrece mayor ligereza, resistencia y su durabilidad; estas pueden ser onduladas, trapezoidales o acanaladas dependiendo del diseño, esto con el objetivo de lograr una eficiencia estructural entre la geometría y su resistencia de cada material. El método de sujeción a otras estructuras es similar al de láminas de acero galvanizado, con la diferencia de que se usa un aislante comúnmente de nylon para evitar corrosión local en el contacto entre metales.

También se llegan a usar *láminas traslucidas* con el fin de iluminar el interior de las naves industriales según sus diseños; estas placas generalmente se usan en proporciones pequeñas ya que el recubrimiento principal es alguna de las otras opciones mencionadas anteriormente.

En adición a lo anterior se mencionan los materiales más usados en México para naves industriales arco – columna en la actualidad, cuya información se obtuvo de empresas actualmente activas en campo con proyectos en diferentes estados de la República Mexicana. En cuanto a los materiales del recubrimiento de la cubierta se usan generalmente dos calidades, que se eligen con base en aspectos climatológicos como la temperatura, la humedad y las velocidades regionales del viento; estos materiales son los recubrimientos “Zintro”, la cual es una lámina fabricada en caliente mediante un compuesto de zinc, aluminio y magnesio, recomendable para ambientes húmedos y reflejante al Sol, es comúnmente usada en el sureste de la República Mexicana; otra calidad es el recubrimiento “Pintro” que es una lámina galvanizada acanalada para techos, fabricada en caliente, comúnmente usada en la construcción de naves industriales ubicadas del centro al norte del país, esta opción de recubrimiento es 40% más costosa en comparación con la “Zintro”; por último se menciona una tercera opción en el mercado de recubrimientos para naves industriales, especial para zonas costeras denominada “Dura plus”, que es una lámina

sulfatada, por lo que resistente el intemperismo y la corrosión. Una de las principales consideraciones para construir un techo en arco es la pendiente que se requiere, ya que el proceso de fabricación de láminas permite una pendiente de 20% hasta 50% dependiendo también del calibre del material que se use, por ejemplo, para la pendiente más común en la zona centro del país que es de 20%, se usa un calibre 20 a 22. (Techos en Arco S.A. de C.V.)

Soporte de la cubierta

Otros elementos estructurales son los *canalones*, estructuras mediante las cuales se transmiten las cargas de la cubierta a las columnas (Figura 25), es decir, el peso propio de los materiales, de la lámina, de las estructuras de soporte, de los elementos de sujeción; así como de las sollicitaciones de fuerzas externas, como nieve y viento. Estas estructuras pueden ser de acero o de concreto.

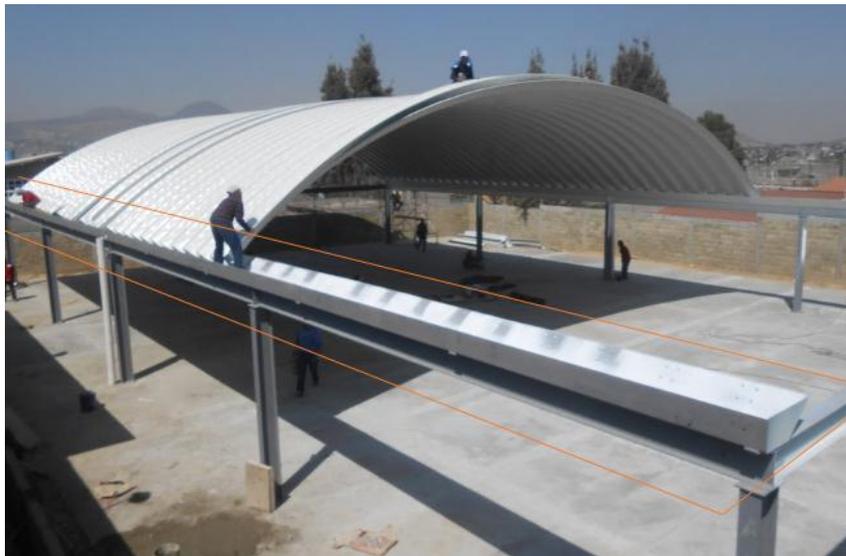


Figura 25. Canalón de una nave industrial tipo arco - columna (Sitio web)

Elementos de sujeción

Son elementos importantes para obtener una eficiencia estructural deseada en un diseño de nave industrial, es por ello que existen diferentes tipos que son aplicables para cada proyecto en particular, estos son los remaches, soldadura y tornillería.

Los *remaches* consisten en una barra que cuenta con una cabeza en uno de sus extremos, la cual se introduce a través de los elementos que se van a unir y posteriormente se deformará por presión o temperatura hasta lograr crear una nueva cabeza que fijará la unión. Los

remaches más usados son los “gota de cebo”, pero existen también los “semi embutidos” y “embutidos”. (Arguelles, 1983).

Los *tornillos* como elementos de sujeción son una gran alternativa para la edificación actual, gracias a la resistencia que tienen, a la facilidad de colocación y las aplicaciones en estructuras móviles.

El uso que se les da a cada uno de los elementos de sujeción es específico; sin embargo, en la actualidad se observa que para naves industriales y para estructuras metálicas fijas lo más común es usar soldadura o remaches, por el contrario para estructuras móviles o desmontables se emplea tornillería simple o de alta resistencia.

EFFECTOS DEL VIENTO EN LAS NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO

El principal interés del estudio de los efectos del viento en naves industriales es referido a las presiones que ejerce el viento sobre las cubiertas, ya que es común ver fallas en estas estructuras debidas al desprendimiento de los recubrimientos, particularmente en la tipología de arco – columna; para ello se debe conocer la separación del flujo de aire sobre la superficie de la cubierta y a su vez las presiones ejercidas sobre la misma. En general las fallas que se presentan en la cubierta de las naves industriales, tiene origen con las grandes cargas de viento solicitadas a los recubrimientos y porque a los diseños de las cubiertas no se les da la importancia que debería (Thomas, 1990)

Las naves industriales arco basan la geometría de su cubierta en una circunferencia, es por ello que se consideran como un cuerpo semi – aerodinámico, ya que la separación del flujo se presenta dependiendo de las características del flujo, es decir, de su perfil de velocidades y de la turbulencia; consecuentemente estas características variarán la ubicación del desprendimiento de la corriente sobre la superficie de la cubierta. Como comparativa se puede considerar a un cuerpo no aerodinámico, que presente aristas afiladas y bien definidas, por ejemplo, una nave industrial a dos aguas donde la separación del flujo en la cubierta siempre se presentara en la misma zona (la cumbre), sin importar los cambios en las características del flujo. Cabe resaltar que es de vital importancia para la ingeniería civil considerar cuerpos sensibles a los cambios en las características del flujo, ya que estructuras de gran importancia pueden verse afectadas por las fuerzas de viento actuando sobre su estructura, por ejemplo, pilas, chimeneas, torres de enfriamiento y particularmente las naves industriales con cubierta tipo arco (Höslcher y Niemann, 1990).

La separación del flujo sobre la superficie de una estructura curva, como se mencionó, es controlada por las características del flujo, es decir, por el comportamiento de la capa límite atmosférica en el entorno de la superficie y esto se puede parametrizar con base en el número de Reynolds (\mathbb{R}_e , ecuación 1), el cual relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas; tomando en cuenta el \mathbb{R}_e se han definido dos regímenes principales que son el subcrítico y el supercrítico, en los cuales se ha encontrado que los coeficientes de

arrastre (C_D , ecuación 2) pueden considerarse contantes, separados por un régimen transcrito, donde el C_D es afectado por la incidencia de la turbulencia, el número de Reynolds y por la rugosidad en la superficie de la estructura.

<u>Número de Reynolds</u>	$\mathbb{R}_e = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V D}{\mu}$	<i>ec. 1</i>
Donde:		
<i>D</i> : Longitud característica (diámetro de la directriz de la cubierta)		
<i>μ</i> : Viscosidad dinámica = $1.8 \times 10^{-5} \text{ [kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{]}$, para 20 °C (White, 2008)		
<i>V</i> : Velocidad promedio del viento		
<i>ρ</i> : densidad del aire = $1.225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$		

<u>Coefficiente de arrastre</u>	$C_D = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$	<i>ec. 2</i>
Donde:		
<i>ΔP</i> : Diferencial de presiones, inducida por el viento ($P_1 - P_\infty$)		
<i>V</i> : Velocidad promedio del viento		

Uno de los fenómenos más interesantes del comportamiento del viento sobre estructura cilíndricas circulares es la variación del coeficiente de arrastre en los diferentes regímenes, ya que en el régimen subcrítico con valores bajos del \mathbb{R}_e , el valor del C_D es alto aproximadamente de 1.2, por otro lado con valores altos del \mathbb{R}_e la magnitud del C_D puede ser muy bajo incluso menor a 0.5 dependiendo principalmente de la rugosidad en la superficie de contacto (Cook, 1990) (Figura 26.). Cabe resaltar que investigaciones realizadas sobre cuerpos cilíndricos, enfatizan que es complicado obtener una gran similitud en los resultados de Coeficientes de arrastre y de presión entre los experimentos realizados en modelo y en el prototipo, ya que estos cuerpos son extremadamente sensibles al número de Reynolds, en caso de que se requiera encontrar una buena aproximación en los resultados debe asegurarse que en el modelo como en el prototipo, el régimen del flujo sea el mismo.

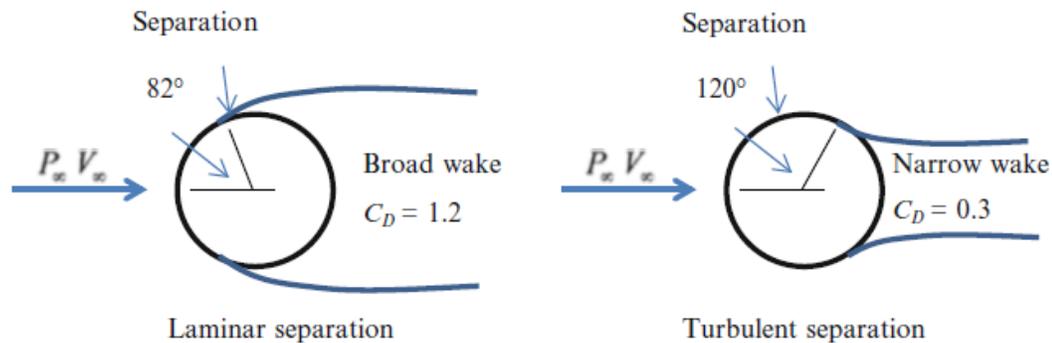


Figura 26. Separación laminar y turbulenta del flujo sobre un cilindro circular (Tamura, 2013)

Como ya se mencionó las estructuras curvas son sensibles al número de Reynolds particularmente a través del valor de número de Reynolds crítico ($Re_c \cong 2 \times 10^5$), una forma de evitar la cercanía a este valor y poder reproducir las condiciones reales que se presentan en las naves industriales, donde los valores son del orden de $Re \cong 2 \times 10^7$ (Niemann y Hölscher, 1990), es aumentando la rugosidad en la superficie de contacto, en otras palabras, si se genera turbulencia en el flujo se puede lograr una independencia del número de Reynolds en cuerpos con superficies curvas (J. Holmes, 2001) esto puede hacerse físicamente en los modelos a escala, aplicando una capa de arena u otro método similar, ya que, con esta rugosidad artificial se puede simular valores del número de Reynolds mayores, en el régimen transcrito (Cook, 1990).

La importancia de identificar el punto de separación del flujo sobre la cubierta de una nave industrial tipo arco - columna es poder predecir las fuerzas que ejerce el viento sobre la estructura y con base en esto determinar la presencia de presiones o succiones, que en un momento dado pueden originar la falla del sistema. Por otro lado, tal y como se reporta en la bibliográfica de investigaciones enfocadas en obtener los coeficientes de presión para otras geometrías de nave industrial, se debe tener en consideración el ingreso del flujo de aire al interior de las edificaciones, ya que es muy común que los materiales de revestimiento o vidrio se rompan por la poca resistencia ante fuerzas de viento; con esto el flujo ingresa a las naves industriales y origina un diferencial de presión que puede ser perjudicial para la resistencia del sistema estructural (Holmes, 2007). Por lo anterior, se debe enfatizar que estructuras donde el flujo de aire circule por el interior y exterior, como en una nave industrial arco - columna, es indispensable estudiar los efectos que pueden originarse en el flujo del viento y poder predecir el comportamiento estructural para realizar diseños de los sistemas estructurales adecuados para cada proyecto.

2.3.FALLAS COMUNES EN NAVES INDUSTRIALES DEBIDAS A VIENTO

Es posible decir que el viento es uno de los factores que más afectan a la estructura de una nave industrial, ya que son estructuras ligeras que comúnmente se encuentran en zonas abiertas, donde las velocidades del viento que se pueden presentar son grandes e impactan directamente en cada una de las caras y cubierta. Los efectos que causa el viento sobre cada una de las tipologías de nave industrial dependen principalmente de la forma que esta tenga, variando los tipos de daños que pueden existir, como pueden ser fallas locales o incluso falla total de la estructura; a continuación se exponen los principales mecanismos de fallas que se han presentado en naves industriales:

Fallas en la cubierta por diferencia de presiones

Los mecanismos de falla que se presentan en las cubiertas de las naves industriales tiene que ver con un gradiente de presión alto, que se presenta claramente en las esquinas de los alerones, tal y como lo reporta la bibliografía; estas diferencias de presiones ocasiona que los laminados usados como recubrimiento se desgarran o deformen generando con ello un cambio en la geometría que puede desencadenar una falla total de los recubrimientos, hasta daños en la estructura principal.

Fallas en los mecanismos de sujeción

Un mecanismo de falla muy común es la fatiga de laminado usado en el recubrimiento, esto en el entorno de los tornillos, remaches u otros elementos de sujeción, consecuentemente se presenta el desprendimiento del recubrimiento; este tipo de falla se debe principalmente a la variación en la intensidad del viento, de la velocidad y de la turbulencia en el momento en que se presentan las condiciones más severas durante la solicitación de cargas de viento.

Fallas por falta de mantenimiento

Las fallas de elementos estructurales de las naves industriales debidas a la falta de mantenimiento son muy comunes en México, estas se presentan cuando no existe un seguimiento en el tratamiento o aplicación de técnicas necesarias para que los materiales funcionen de forma adecuada, por ejemplo, la aplicación de sustancias químicas como recubrimiento en los perfiles metálicos para evitar daños por intemperismo; por esta razón se pueden presentar fallas parciales o totales en la estructura de una nave industrial.

Fallas por tiempo de servicio

Este tipo de fallas se atribuye generalmente a una falta de mantenimiento; sin embargo, los materiales constructivos tienen una vida útil determinada que con un buen mantenimiento se puede maximizar pero no impiden que las propiedades de los materiales se pierdan con el paso del tiempo, es por ello que se presentan fallas por tiempo de servicio en los elementos estructurales con solicitaciones de cargas de viento.

En general los efectos del viento en estructuras de baja altura como las naves industriales, pueden causar pérdidas económicas importantes o pueden poner en riesgo la integridad de las personas que se encuentren en la zona en caso de que algún mecanismo falle, ya que, sin importar que tan robustos o sólidos sean los elementos estructurales, las fachadas y otros objetos de la edificación pueden ser afectadas por las fuerzas del viento y de igual manera generan un mecanismo de falla en cadena.

2.4. DAÑOS OBSERVADOS EN NAVES INDUSTRIALES TIPO ARCO DEBIDOS A VIENTO

Las estructuras ligeras generalmente son sensibles a los efectos del viento y en especial aquellas que usan recubrimientos delgados en sus superficies o acabados, tal es el caso de hoteles, edificaciones aeroportuarias, naves industriales, naves comerciales y recreativas; las fallas de elementos en las edificaciones, por simples que estas parezcan, son capaces de generar problemas, desencadenar daños en la estructura principal y hasta causar daños irremediables, es por ello que no se debe subestimar la importancia de ningún componente concebido en el diseño de las construcciones.

Con el propósito de visualizar la magnitud de las problemáticas que se ha presentado en estructuras de naves industriales tipo arco (estructura de interés para este trabajo), se muestran algunos casos de daños reales que ocurrieron en el paso del huracán Odile, al sur de la península de Baja California el 14 de septiembre del 2014, así como un caso reciente en el estado de Oaxaca. La información y fotografías fueron obtenidas de una serie de investigación y desarrollo del Instituto de Ingeniería, UNAM, titulada “El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California”, y para el caso de Oaxaca se obtuvieron las imágenes de los periódicos locales.

Estructura tipo arco, para cubierta en gradas

En la imagen capturada en las instalaciones deportivas de la Universidad Autónoma de California Sur (UABCS), se observa que la estructura tipo arco se encuentra aislada en un terreno de categoría 2 (CFE, 2008) y los daños que se presentaron fueron deformaciones ascendentes en las cercanías a la cumbre o cresta de la cubierta como se observa en la Figura 27, estas deformaciones se pudieron haber generado por la diferencia de presiones (succiones y presiones) inducidas por el viento actuando sobre la estructura como se menciona en el “Manual de Obras civiles (MOC): Diseño por viento, CFE”.



Figura 27. Estructura tipo arco para cubierta de gradas, UABCS (iingen UNAM, 2015)

Si bien las deformaciones son menores, los esfuerzos inducidos a los mecanismos de sujeción de la cubierta pueden originar problemas de fatiga en la lámina usada, por ello se deberá revisar la estructura posterior al paso del huracán previniendo fallas en estos mecanismos que pudieran originar un desprendimiento de la cubierta y accidentes en el entorno con objetos o personas.

Nave industrial tipo arco – columna, para fines recreativos

Los diferentes diseños actuales basados en geometrías básicas como las naves industriales tipo arco-columna sugieren un comportamiento ante fuerzas de viento similar, sin embargo, estos deben ser estudiados ante las diferentes fuerzas actuantes para llegar a un diseño seguro y costeable. En el ejemplo que se muestra en la Figura 28 a), se observa un techo con geometría de arco soportada por columnas tipo IPR, con la particularidad de que la cercha se encuentra en la parte superior de la lámina utilizada, pero también presenta la sobre posición de dos techumbres con geometría de semi arco para formar un techo aparentemente monolítico.



Figura 28. Estructura arco - columna a) diseño original y b) estructura dañada por vientos del huracán Odile (iingen UNAM, 2015)

Con las características del diseño anteriormente expuestas y la presencia del huracán Odile con velocidades de viento sostenido de 205 [km/h] y ráfagas de 240 [km/h], los daños que causaron en la estructura fueron desplazamientos transversales en la nave, separando las dos estructuras sobrepuestas y deformaciones en la lámina de recubrimiento como se muestra en la Figura 28; todo esto fue probablemente generado por presiones diferenciales actuando en la cubierta de la nave industrial. Cabe enfatizar los problemas que se tienen por intemperismo del acero, ya que se observan elementos de la cercha oxidados localmente agudizados por la posición de la misma (Figura 29); de ahí la importancia de tener un mantenimiento adecuado en estructuras de acero, pero más en las sensibles a efectos del viento en zonas con alta probabilidad de incidencia de viento con velocidades altas.



Figura 29. Deformaciones en cubierta y oxido por intemperismo (iingen UNAM, 2015)

Techo con geometría de arco

Los efectos del viento en estructuras de dimensiones menores también son importantes y se consideran en los manuales y códigos mexicanos con coeficientes de presión para cubiertas o toldos planos (no para circulares) adyacentes a otras construcciones. Como se observa en la Figura 30, la estructura con geometría de arco que sirve para resguardar personas fue dañada por vientos generados en el huracan Odile, el principal daño es el desprendimiento de la superficie por el desgarramiento de la lámina en el perímetro de los elementos de sujeción, esto probablemente fue originado por la combinación de presiones internas (zona concava) y presiones externas (zona convexa); el desprendimiento de la lámina es suficiente para poner en riesgo a las personas en la zona, aunque la estructura principal no fuera afecta; sin embargo, el objetivo de considerar coeficientes de presión para el diseño de estructuras pequeñas se justifica por los daños que pueden originarse en estructuras aledañas debidos a objetos desprendidos, pero también a los efectos del viento que causa la presencia de estas construcciones, como el desprendimiento de vórtices.



Figura 30. Desprendimiento de cubierta en estructura tipo arco (iingen UNAM, 2015)

Para ejemplificar los daños en estructuras aledañas se presenta la cubierta en forma de arco de la Figura 31 a), que se ubica a lado de la terminal 1 del aeropuerto; la cual presentó desprendimientos de lámina mínimos como se observa en la Figura 31 b); sin embargo originó que el posible desprendimiento de vórtices del techo pequeño, impactaran a la fachada de la estructura mayor y consecuentemente se desprendieran los recubrimientos de los muros.



a)

b)

Figura 31. Cubierta en arco aledaña a terminal 1 de aeropuerto a) vista general y b) desprendimiento de cubierta (iingen UANM, 2015)

Estructuras de cubierta ondulada

Los diseños actuales de cubiertas para sus diferentes usos tiene formas más complejas para ser analizadas con la normatividad vigente, sin embargo, deben ser estudiadas para garantizar un buen comportamiento estructural en situaciones desfavorables; tal es el caso de una estructura ondulada o con fomas semicirculares, ubicada en la zona costera de Baja California Sur, donde se ve inmediatamente el desprendimiento de la cubierta, probablemente causado por fuerzas de succión en la parte posterior a la cresta de la semicircunferencia en dirección del viento (sotavento); por otro lado se observa un fenómeno de interferencia en los efectos del viento debido a construcciones aledañas, en este caso una techumbre que no sufrió daños (marcada con rojo en la Figura 32.) gracias a que tiene una menor altura que la construcción vecina y le proporciona “protección” o “barrera” ya que el viento incide primero en esta y hace que la fuerza del viento y su comportamiento cambien.



Figura 32. Cubiertas onduladas en zona costera de BCS (iingen UNAM, 2015)

Falla de naves industriales arco – columna, Oaxaca.

Un ejemplo más reciente es el que se presentó en el estado de Oaxaca el día 23 de mayo de 2017, en las naves industriales arco – columna que albergaban a la central de abastos del mismo estado, donde se presentó un colapso total de la estructura de la cubierta, la cual fue construida únicamente con laminado de acero, con sección transversal de canaleta; esta falla fue originada a partir de lluvias y velocidades de viento intensas, ocasionando una sobre carga en la cumbrera de la cubierta y posteriormente el colapso total de la estructura como se muestra en la Figura 33.

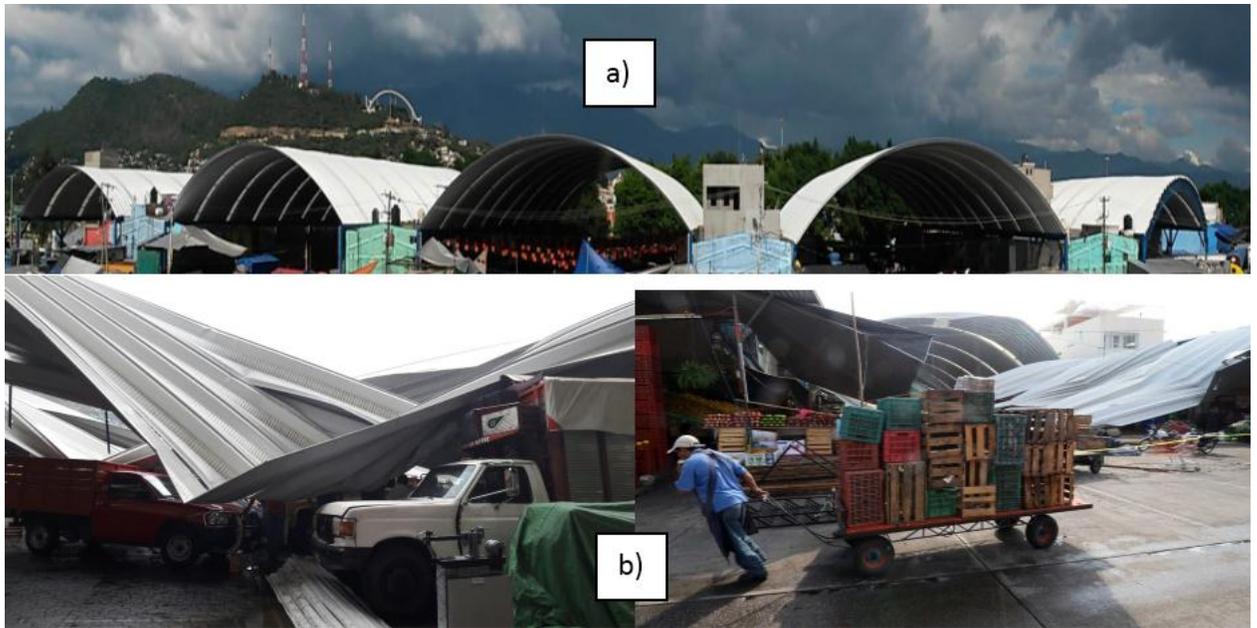


Figura 33. Central de abastos de Oaxaca, México a) antes y b) después del colapso (Sitio web)

Los ejemplos mencionados anteriormente sirven como referencia para realizar futuros diseños que se apeguen a la normatividad y en su caso realizar investigación que pueda aportar seguridad a las obras civiles. En general se destaca que las fallas más comunes en construcciones reales bajo la fuerza de viento son: desprendimiento de la cubierta o de elementos no estructurales que causan daños que no deben subestimarse; también es importante considerar el mantenimiento adecuado de las estructuras en los diseños, la categoría del terreno donde se desplanta la obra, así como las construcciones aledañas que como se describió, en algunos casos puede tener efectos favorables y en otros no.

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO DE UNA NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO

En este capítulo se presentan las consideraciones para realizar pruebas de túnel de viento justificando la realización de los ensayos para una nave industrial tipo arco-columna, desde el planteamiento de la geometría, las escalas de los modelos y de las pruebas, los materiales de fabricación, la caracterización del flujo en la sección de pruebas; todo ello para obtener los coeficientes de presión en los modelos con superficies lisa y rugosa, realizar los diagramas de presiones para cada una de las cubiertas y poder comparar los resultados obtenidos entre los dos modelos ensayados.

Como base para realizar estas pruebas en túnel de viento se tiene que la normativa de seguridad empleada en diseño por viento para obras civiles, actualmente no contempla la tipología de nave industrial arco – columna y se considera que es indispensable tener bases sólidas y confiables para el diseño y construcción de estas edificaciones ya que son usadas muy frecuentemente en todo México, ya sea en zonas costeras, cierras y planicies; se ha observado que el campo de aplicación de este tipo de naves industriales es cada vez mayor, teniendo como principal uso al techado de zonas recreativas, sociales o deportivas, siendo este último el más común.

Las pruebas en túnel de viento son la opción más confiable para determinar coeficientes de presión, ya que es posible reproducir las condiciones del flujo de aire y la geometría de la estructura presente en la realidad en un entorno controlado, y con los resultados poder diseñar edificaciones más seguras en las que actúan las fuerzas del viento de manera importante, sin embargo, es importante considerar que este tipo de pruebas tienen costos muy altos en comparación con otro tipo de alternativas; generalmente se hacen para proyectos específicos que puedan costearlas, pero es importante considerarlas para las estructuras más comunes que sean sensibles a los efectos del viento. Se puede resaltar que la normatividad actual, específicamente en las “Normas Técnicas Complementarias para diseño por viento” (NTC-DV) menciona a las pruebas de túnel de viento como la única alternativa para calcular los efectos del viento en una estructura; sin embargo, existe también la Mecánica de Fluidos Computacional (MFC) que se encarga de estudiar el movimiento que tienen los fluidos, a través de expresiones matemáticas y soluciones numéricas realizadas con computadora; también recomienda considerar coeficientes de presión ya conocidos de estructuras semejantes, lo cual es poco recomendable ya que, por ejemplo, el comportamiento del viento en una estructura a dos aguas inscrita en una semi-circunferencia es totalmente diferente a la de una cubierta en arco, porque presenta una

arista viva en la cual siempre existirá la separación del flujo en un mismo punto (en la arista viva) y es una geometría poco sensible al número de Reynolds, por el contrario, en una cubierta en arco el comportamiento del viento dependerá totalmente de la velocidad del flujo, por lo tanto del número de Reynolds y el flujo se separará en diferentes puntos de la semi-circunferencia dependiendo del valor del mismo, generando succiones y presiones de diferente magnitud y en diferentes zonas (Balbastro et al., 2004). En adición a las recomendaciones de la NTC, se puede decir que para el diseño de una nave industrial arco – columna es poco recomendable considerar los coeficientes de presión de una nave industrial con cerramientos, porque en el cálculo de los coeficientes de presión totales existirá una diferencia importante ya que la interacción de presiones internas y externas puede ser adversa.

Por lo mencionado anteriormente las pruebas en túnel de viento a realizar, servirán para complementar la información actual y con ello proponer coeficiente de presión en naves industriales arco – columna para la normatividad en diseño por viento de obras civiles del país, enfatizando su importancia en zonas costeras vulnerables a fenómenos naturales que originen velocidades de viento altas, mismas que se mencionan en el capítulo 3 de este trabajo.

3.1. DISEÑO DEL MODELO DE NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO

El diseño de los modelos que se prueban en los túneles de viento tiene una justificación considerando aspectos del modelo y del flujo de aire, que están relacionados entre sí, para poder reproducir las condiciones reales de los efectos del viento sobre una estructura determinada. En este subtema se muestran los aspectos que se consideraron para el diseño del modelo de la nave industrial propuesta.

Geometría del modelo

Se proponen dimensiones reales de una nave industrial arco – columna, empleada comúnmente para techar espacios deportivos como una cancha de Basquetbol, con magnitudes de vista en planta de 15 [m] x 30 [m], y una altura de las columnas de 5.25 [m] medida a partir del alerón de la cubierta a la base (Figura 34), haciendo especial énfasis en que la normativa de seguridad actual de obras civiles en diseño por viento (MOC-DV, 2008) considera hasta 3 [m] como altura máxima para la cubierta, cabe destacar que existen estudios que se realizaron en naves industriales arco – columna, para saber si existe un cambio significativo en los coeficientes de presión cuando se varía la altura de la cubierta; estos estudios concluyen en que el cambio en coeficientes de presión son mínimos para una altura mayor o menor, por el contrario, los cambios del coeficiente de arrastre son grandes, por lo que se debe poner mayor atención a la fuerza de arrastre (Nagesh et al., 2013).

CAPITULO 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO DE UNA NAVE INDUSTRIAL TIPO ARCO

Para determinar la longitud del arco se contempló una pendiente de 30% que se mide con base en una línea que intersecta al punto de máxima altura del arco y a la base del alerón de la cubierta, como se muestra en la Figura 34, con lo cual se obtiene la altura máxima del arco de 10 [m] medida desde la base. Cabe destacar que actualmente los fabricantes de laminados para naves industriales de este tipo pueden hacerlos con una pendiente máxima de 50%, ya que es lo máximo que permite el proceso de fabricación.

En la construcción de los modelos para las pruebas en túnel de viento se consideró una escala de 1:75, elegida principalmente para cumplir con las restricciones dadas por el efecto de bloqueo, el cual indica que la relación entre el área transversal mayor que se puede presentar en la experimentación de los modelos y el área transversal de la sección de pruebas no debe ser mayor al 5% y se recomienda que éste sea menor al 3% (Moonen, 2006), con lo que se obtiene una relación de bloqueo de $(0.0134 [m^2]) / (6.90 [m^2]) \times 100 = 0.19 \%$, la cual es válida para el tipo de prueba que se realizará.

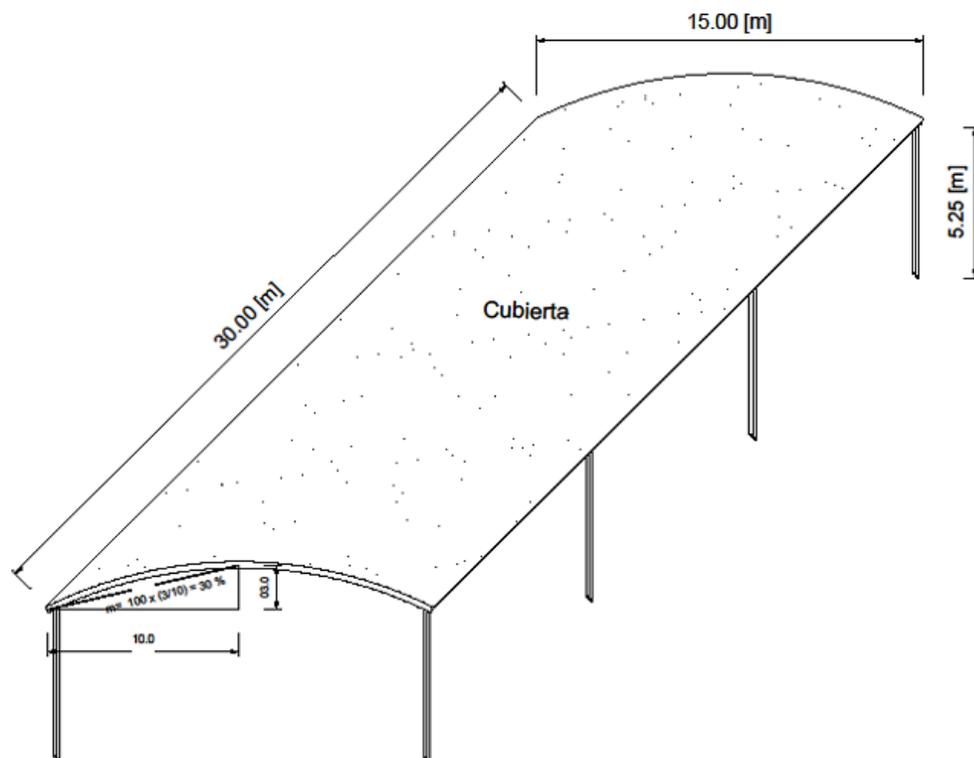


Figura 34. Dimensiones de los modelos para pruebas en túnel de viento

Esta geometría se utilizó para los modelos con superficies lisa y rugosa, obteniendo una altura de columnas de 7 [cm] de la base al alerón de la cubierta, dimensiones de vista en

planta de 20 [cm] por 40 [cm], una altura del alerón de 3 [cm] para obtener una pendiente del 30% en la cubierta y columnas de 0.5 [cm] de diámetro.

Fabricación de los modelos

Los modelos rígidos para pruebas en túnel de viento deben ser fabricados con la mayor exactitud posible para recrear las condiciones del comportamiento del viento en la realidad sobre la estructura, es por ello que los materiales de fabricación deben considerarse desde la planeación de las pruebas, ya que en ocasiones se presentan dificultades para obtenerlos y consecuentemente los costos de los modelos pueden elevarse. La fabricación de los modelos experimentales para este trabajo se realizaron con los materiales siguientes: un tubo de cartón rígido con diámetro nominal de 16 [plgs] para obtener las características requeridas en la cubierta; tubería de cobre de 5.0 [mm] de diámetro para las columnas, sonda de 1.7 [mm] de diámetro para los canal de registro de presiones, recubrimiento plástico liso para el modelo con cubierta lisa, papel lija con una tamaño promedio de grano de 0.538 [mm] que corresponde a un tamaño nominal de 36 y silicón líquido para fijar los modelos.

Instrumentación

Para la obtención de presiones en modelos rígidos de túnel de viento se debe instrumentar el modelo de interés, es decir, se colocan sondas que van de la estructura a los transductores de presión y mediante el sistema lector de presiones (mencionado en el capítulo 3 de este trabajo) se obtienen las lectura del modelo que ayudarán a obtener lo coeficientes de presión; la colocación de estas sondas se hace con base en la predicción del comportamiento del viento que tienen estructuras ya conocidas, así como en investigaciones afines, porque no existe alguna metodología para realizar este proceso, cabe mencionar que este proceso depende el número de canales disponibles ya que varía según la capacidad del sistema. Para realizar este trabajo se dispone de cuatro zoc's de 32 canales cada uno, por lo que se colocaron 110 canales en un cuadrante de la cubierta del modelo de nave industrial, como se observa en la Figura 35, esta configuración de los canales se realiza debido a que las presiones más importantes se presentan en el perímetro de la cubierta por lo que es de interés tener una densidad mayor de lecturas, especialmente en las esquinas como reporta la bibliografía de naves industriales con cubierta en arco y a dos aguas. Es posible obtener mayor precisión en los resultados proporcionalmente al número de datos obtenidos o canales instalados durante las prueba; sin embargo, no siempre es conveniente, por lo que deberá considerarse la perturbación del flujo y error de las lecturas, consecuencia del exceso de material propio de las pruebas que no son parte de la estructura en estudio.

Se debe tener en cuenta que en la instrumentación interna y externa, existe una diferencia de geometría entre el modelo y el prototipo, porque estrictamente el flujo es perturbado por las sondas; sin embargo, estudios realizados por Balbastro y Zonsogni muestran que a pesar de que existen diferencia entre una técnica de instrumentación y otra, los coeficientes de presión y su distribución son casi nulas en algunos casos, y muy notorias en otros; para el caso de presiones totales las diferencia en ambos métodos son notorias; sin embargo, esto no se debe exclusivamente a la técnica de instrumentación, también depende de la caracterización del flujo en cada prueba realizada (como la variación del número de Reynolds) y las dimensiones en cada modelo(Balbastro et al., 2005); es por ello que los resultados que se obtengan en este trabajo serán válidos si se considera que cada una de las pruebas realizadas para la misma tipología es independiente ya que las condiciones son diferentes para cada caso, lo cual concluye en que los resultados serán buenos si los efectos

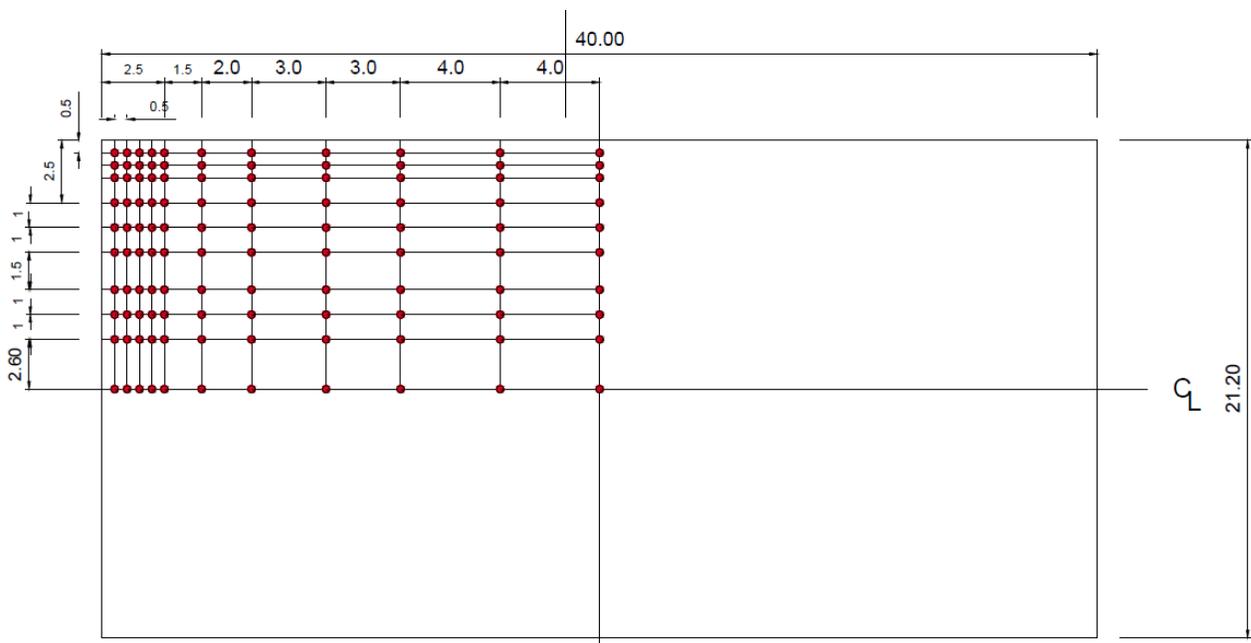


Figura 35. Localización de tomas de presión en un cuadrante de la cubierta del modelo

del viento son coherentes con las investigaciones realizadas, y no dependerán estrictamente de la proximidad en los resultados de los análisis. Por otro lado es posible comparar los resultados que se obtengan en este trabajo, con los expuestos por Natalini et al. (2002) para el modelo 2-II que presenta.

Con base en lo anterior se decidió instrumentar un solo cuadrante de la cubierta del modelo con el mayor número de sondas disponibles, ya que con la rotación en la mesa giratoria cada 10 grados en los 360 grados disponibles, se pueden obtener lecturas en toda la cubierta siguiendo la relación que se muestra a continuación, esquematizadas en las Figuras 36 y 37:

$0^\circ, 180^\circ$
$\pm 10^\circ, \pm 170$
$\pm 20^\circ, \pm 160$
$\pm 30^\circ, \pm 150$
$\pm 40^\circ, \pm 140$
$\pm 45^\circ, \pm 135$
$\pm 50^\circ, \pm 130$
$\pm 60^\circ, \pm 120$
$\pm 70^\circ, \pm 110$
$\pm 80^\circ, \pm 100$
$90^\circ, -90^\circ$

La configuración que se considera en este trabajo se hace con base en los resultados de los experimentos realizados por Balbastro et al. (2005), en las misma tipología de nave industrial, para la normativa de seguridad de edificaciones civiles en Argentina.

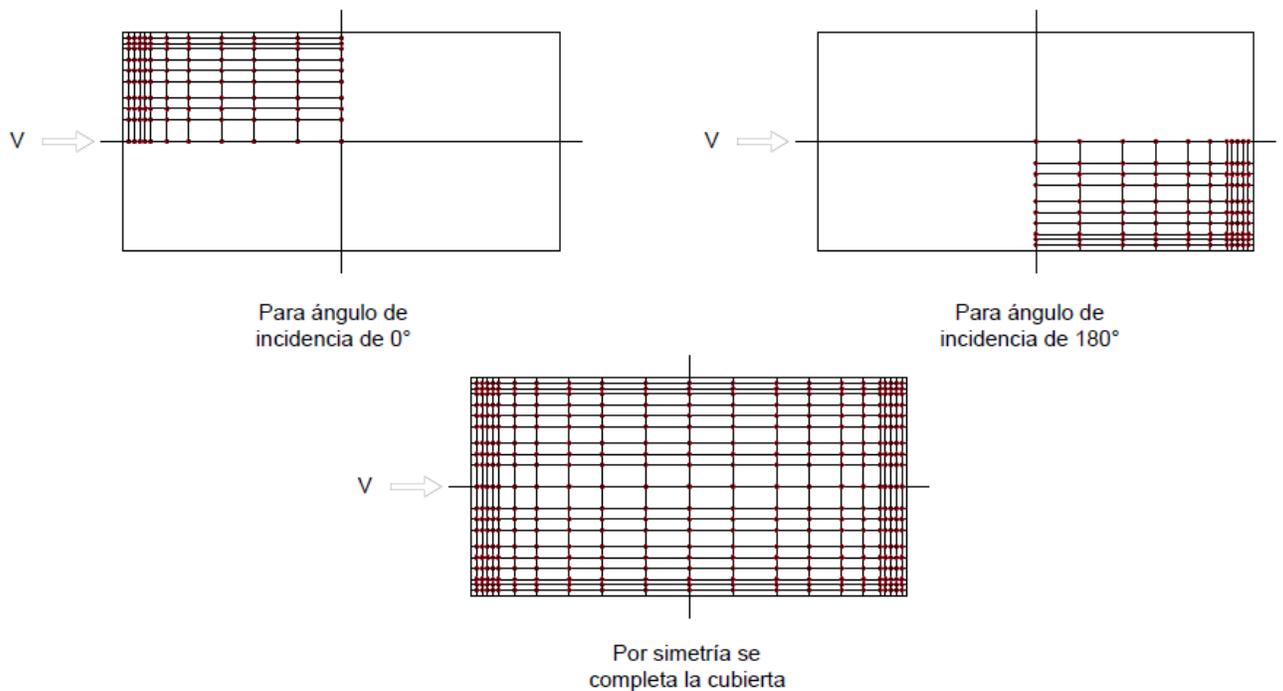


Figura 36. Obtención de presiones por simetría, en toda la cubierta del modelo

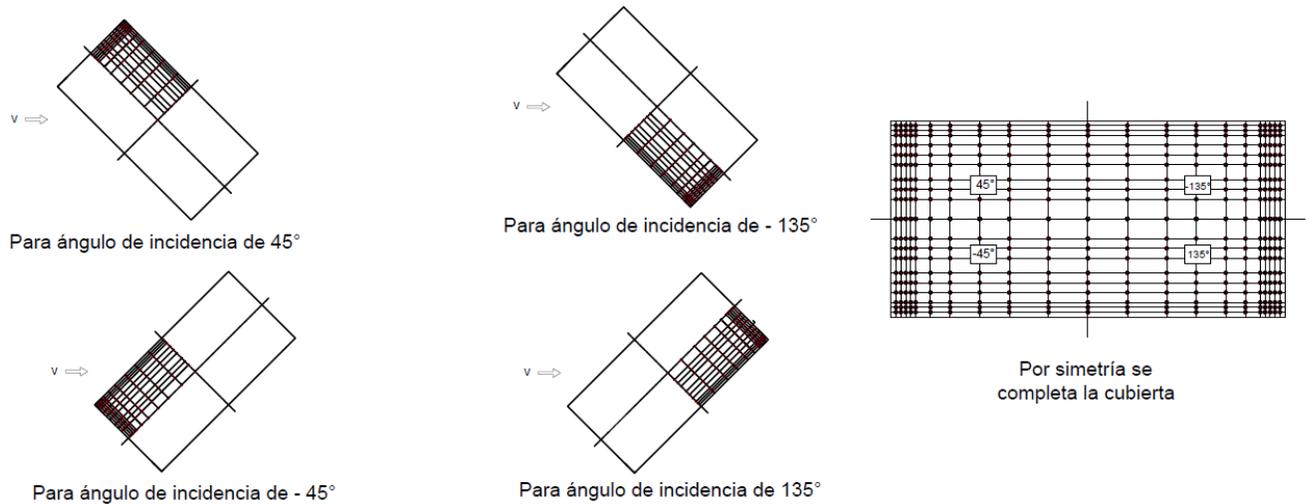


Figura 37. Obtención de presiones en toda la cubierta por rotación del modelo para ángulos complementarios

Escalas de pruebas en túnel de viento

Para poder escalar las condiciones de un modelo a un prototipo se consideraron las relaciones de geometría, de velocidad, de tiempo y de frecuencia de muestreo, todas estas relacionadas entre sí mediante la frecuencia reducida como se describen a continuación:

Escala geométrica

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{75}$$

Donde:

L_m : Longitud característica del modelo

L_p : Longitud característica del prototipo

Una segunda consideración fue una escala de velocidad conveniente, establecida por las velocidades de túnel de viento disponibles en comparación con las velocidades de viento naturales. Experimentalmente se recomienda que esta relación este en el intervalo de $\lambda_V = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{8}$, ya que se ha observado que se obtienen lecturas confiables.

Escala de velocidad

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p}$$

Donde:

V_m : *Velocidad del modelo*

V_p : *Velocidad del prototipo*

Escala de tiempo

$$\lambda_T = \frac{T_m}{T_p}$$

Donde:

T_m : *Tiempo de observación en el modelo*

T_p : *Tiempo de observación en el prototipo = 10 [min]*

Escala de frecuencia de muestreo

$$\lambda_f = \frac{f_m}{f_p}$$

Donde:

f_m : *frecuencia de muestreo en el modelo*

f_p : *frecuencia de muestreo en el prototipo*

Las escalas mencionadas anteriormente se relacionan entre sí mediante la ecuación de la frecuencia reducida, para poder determinar el tiempo de observación en las pruebas en túnel de viento. Es importante resaltar que algunas escalas se basan en resultados experimentales, ya que existen fundamentos matemáticos que se pueden tomar en cuenta como el número de Froude; sin embargo, estos pueden diferir dependiendo del enfoque del analista.

Frecuencia reducida

$$\left(\frac{f H}{V}\right)_m \approx \left(\frac{f H}{V}\right)_p$$

Esta expresión relaciona al modelo y al prototipo tomando en cuenta sus frecuencias (f_m, f_p), sus velocidades (V_m, V_p) y una distancia característica que para nuestro caso es la altura de la cubierta (H_m, H_p).

Sabemos que $\frac{1}{\lambda_L} = \frac{H_p}{H_m}$ y que $\lambda_V = \frac{V_m}{V_p}$, entonces la expresión anterior puede reescribirse como:

$$f_m = \frac{f_p H_p V_m}{H_m V_p}$$

$$f_m = f_p (\lambda_L)^{-1} \lambda_V$$

$$f_m = f_p \left(\frac{\lambda_V}{\lambda_L}\right)$$

Sustituyendo los valores conocidos se obtiene:

$$f_m = f_p \left(\frac{1}{75}\right)^{-1} \left(\frac{1}{6}\right) = 12.5 f_p$$

$$f_m = 12.5 f_p$$

$$\frac{f_m}{f_p} = \lambda_f = 12.5$$

Por otra parte sabemos que $f = \frac{1}{T}$, y en términos de escalas esto es equivalente a $\lambda_f = \frac{1}{\lambda_T}$

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} = \frac{1}{12.5} = 0.08$$

Los valores de T_m están en el intervalo de 10 [min] a 1 [h]; sustituyendo valores en la escala de tiempo $\lambda_T = \frac{T_m}{T_p} = \frac{T_m}{600 [s]} = 0.08$

Por lo tanto el tiempo de muestreo en el prototipo es el siguiente:

$$T_m = 600 [s] \times 0.08 = 48 [s]$$

Por lo tanto el tiempo de muestreo calculado fue de 48 segundos; sin embargo, debido a la experiencia en pruebas similares en el túnel de viento a usar, se decide considerar un tiempo de muestreo de 60 segundos.

Caracterización del flujo

Para caracterizar el flujo de aire en la sección de pruebas se consideró una densidad del aire de $\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3}$, una temperatura media de 20 °C y dos velocidades del viento, una con base en la velocidad regional de La Paz B.C.S. (obtenida del mapa de isotacas de MOCDV-CFE, 2008) y la otra considerando la velocidad de vientos sostenidos durante el huracán Odile en la misma ciudad. Las velocidades reales y calculadas para pruebas en el túnel de viento, así como las revoluciones por minuto (rpm) del ventilador, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de velocidades reales y en túnel de viento.

Velocidades		
Real [m/s]	Túnel de viento [m/s]	Revoluciones en el ventilador del túnel de viento [rpm]
46.6	7.6	201
56.94	9.49	247

También se asumió un perfil de velocidades logarítmico correspondiente a un flujo suave, este tipo de flujo se presenta en zonas con grandes áreas sin obstrucciones, y a pesar de que es un flujo que estrictamente no represente al que se existe en las zonas abiertas de La paz, B.C.S. se puede considerar como un flujo válido para simular condiciones de terreno abierto en el cálculo de Coeficientes de presión, como es este caso, ya que estudios realizados a perfiles de velocidades del viento, muestran que los coeficientes de presión son poco sensibles a cambios mínimos en el perfil del viento (Nagesh, 2013); fue necesario realizar las pruebas con este tipo de flujo ya que una limitante para realizar los ensayos fue

la aceptación de las rugosidades disponibles en túnel de viento, como ya se mencionó en las limitaciones de este trabajo.

3.1.1. DISEÑO DEL MODELO CON SUPERFICIE LISA

La construcción del modelo de nave industrial con superficie lisa se realizó cortando un segmento del tubo de cartón con una longitud de arco de 21.20 [cm] por 40 [cm] de largo, esto para lograr la proyección en planta requerida, también se fresaron los bordes de los cortes para evitar tener imperfecciones; se adhirió la capa plástica en las partes exterior e interior de la cubierta para garantizar una superficie en la cubierta totalmente lisa. Por otra parte se cortaron 16 segmentos de tubo de cobre de 5 [mm] de diámetro con longitud de 7 [cm] cada uno, se detallaron con lima para evitar imperfecciones en los cortes, posteriormente se unieron 2 segmentos de tubo con cinta adherible para formar una columna y en total se fabricaron las 8 columnas que soportaron a la cubierta.

La instrumentación se llevó a cabo con sondas de nylon de 1.7 [mm] de diámetro y 1.8 [m] de longitud, las cuales se fijaron al modelo mediante perforaciones en la cubierta de acuerdo a la configuración de puntos mostrada en la Figura 35, también se consideró el cambio de posición de las sondas dependiendo de las presiones a analizar, ya sean presiones interiores o exteriores. Es importante mencionar que para las mediciones de presiones exteriores las sondas se unificaron en una sola línea en el interior del modelo que se dirigía a los transductores de presión, por el contrario, para medir presiones interiores los conductos se guiaron a los transductores de presión por las 8 columnas del modelo, realizando este proceso lo más preciso posible para modificar la geometría del modelo lo menos posible. Lo mencionado anteriormente se puede observar en la Figura 38.



Figura 38. Instrumentación de modelo de nave industrial arco - columna para a) presiones exteriores y b) presiones interiores

Para terminar la construcción del modelo, se unieron de manera detallada los elementos cubierta – columnas con silicón frío y caliente, con este procedimiento se garantizó que la estructura fuera rígida para el análisis.

Las principales dificultades en la construcción de este modelo fueron: obtener el tubo con el cual se fabricó la cubierta de la nave industrial con pendiente de 30% de tal manera que no se deformara a través del tiempo, también se presentaron dificultades para el montaje del modelo en la sección de pruebas debido al tamaño del modelo escalado, ya que se necesitó tener precaución al maniobrar las herramientas utilizadas.

JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE NAVE INDUSTRIAL CON SUPERFICIE LISA

El modelo de nave industrial arco – columna con superficie lisa, se propone principalmente para comparar los efectos del viento que se presenten contra el mismo estudio en la misma estructura con una superficie rugosa; así como analizar los coeficiente de presión que se generan en la estructura propuesta.

Para poder comprender el comportamiento del viento sobre las estructuras poco estudiadas, es común basarse en las pruebas realizadas en modelos que describen la misma geometría, que para este caso son los trabajos sobre flujo del viento alrededor de cilindros o cuerpos circulares realizados por Niemann y Hölscher (1990), Natalini et al. (2001 y 2005), C. Norberg(1994), G Buresti (1981), entre otros; es por esto que para cuerpos que describen una geometría circular, la bibliografía muestra que existe una amplia variación del comportamiento del flujo que depende del número de Reynolds, como se menciona en el subtema 3.2 de este trabajo; sin embargo, un análisis más profundo es el realizar experimentos con estos modelos variando la rugosidad de la superficie de donde se ha concluido que el régimen crítico del flujo varía notoriamente con el cambio de número de Reynolds como se observa en la Figura 39.

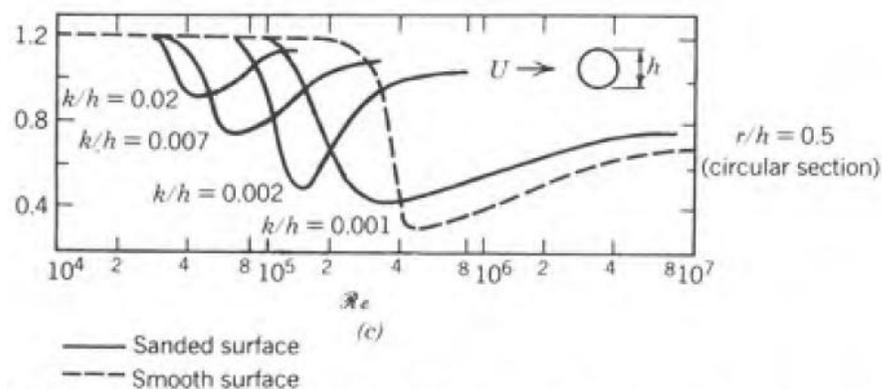


Figura 39. Influencia del número de Reynolds en el coeficiente de arrastre (Simiu y Scanlan, 1996)

En cuanto a naves industriales con cubierta en arco se refiere, las condiciones del flujo en la realidad se encuentran en el régimen transcrito como se mencionó anteriormente, es por ello que al realizar pruebas en túnel de viento con modelos a escala, los resultados de los coeficientes de presión con una superficie lisa estarán idealizando condiciones de un flujo y serán resultados no válidos para considerar un comportamiento de coeficientes de presión en la realidad; sin embargo, es importante hacer estas pruebas para realizar una comparativa de los efectos del viento y de los resultados en los coeficientes de presión que se obtengan con otras superficies rugosas.

3.1.2. DISEÑO DEL MODELO CON SUPERFICIE RUGOSA

Tomando en cuenta que los efectos del viento se ven afectados por el número de Reynolds que a su vez depende de la rugosidad en la superficie de la cubierta del modelo, se planteó realizar pruebas para una misma tipología de nave industrial variando la rugosidad, que en un caso es una superficie lisa y en otro es una capa granular como se menciona en el subtema 4.1.2; todo esto con el objetivo de comparar los efectos con ambas propuestas de rugosidad.

El principal fundamento para poner rugosidad en la superficie del modelo de nave industrial es poder igualar las condiciones del flujo de la realidad a las de las pruebas en el túnel de viento, esto se logra conociendo el comportamiento del flujo en cuerpos semi-circulares con rugosidad y su relación con la rugosidad relativa (k/d). Por lo tanto lo complejo del diseño de este modelo es poder generar condiciones similares del flujo en el túnel de viento, debido a que las velocidades no pueden ser tan grandes y se requiere generar un flujo en el régimen transcrito, tal y como sucede en la realidad; para ello se crea una rugosidad artificial en el modelo, adhiriendo papel lija comercial (Figura 40), el cual tiene una calibre nominal P36 con un tamaño promedio de grano de 0.538 [mm] con lo cual se logra una rugosidad relativa de $k/d = 0.00134$, por lo tanto se alcanza el régimen del flujo deseado en las pruebas de túnel de viento, como se muestra en el desarrollo de la ecuación siguiente, propuesta por Achembach y Heinecke (1982) sobre el comportamiento del flujo en cuerpos curvos. (Niemann y Hölscher, 1990)

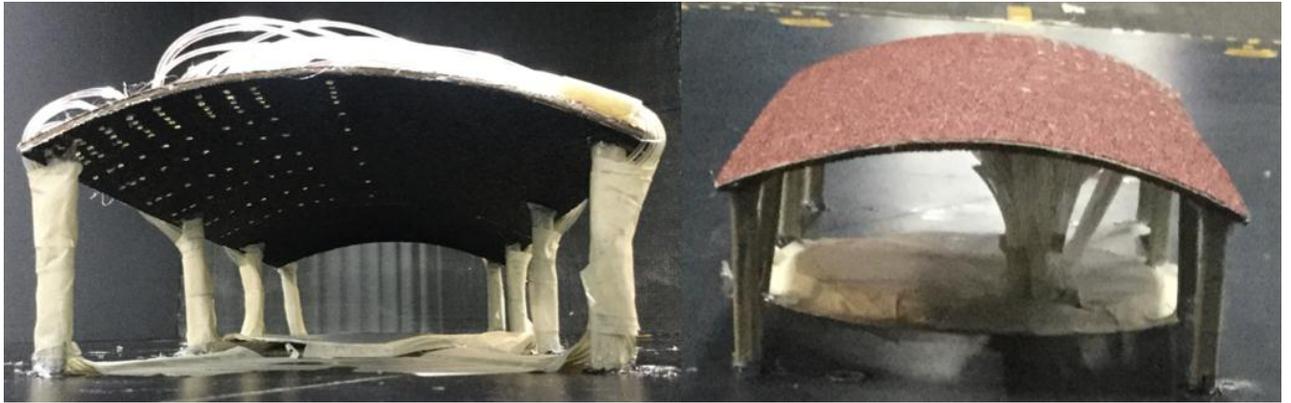


Figura 40. Instrumentación de modelo con rugosidad para a) presiones exteriores y b) presiones interiores

La ecuación que obtuvieron para obtener el número de Reynolds crítico basada en experimentos sobre superficies curvas fue:

$$\mathbb{R}_{e\text{crit}} = \frac{6000}{(K_s/D)^{1/2}} \quad \text{ec. 8}$$

Donde:

k_s : tamaño promedio de grano en la capa rugosa

D : diámetro de la directriz de la cubierta

Sustituyendo valores en esta relación obtenemos un numero de Reynolds en el rango crítico de 1.6×10^5 .

$$\mathbb{R}_{e\text{crit}} = \frac{6000}{(0.538 \text{ [mm]}/400 \text{ [mm]})^{1/2}} \cong 1.6 \times 10^5$$

Es decir que el número de Reynolds crítico tiene un valor de aproximadamente 1.6×10^5 y con base en ello es posible hacer una comparativa contra el cálculo del régimen del flujo que se presenta en la prueba, obteniendo el número de Reynolds de la siguiente manera

$$\mathbb{R}_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1.23 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] \times 7.6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right] \times 0.40 \text{ [m]}}{15 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right]} = 2.5 \times 10^5 \quad \text{[adm]}$$

De lo anterior se puede afirmar que las pruebas en túnel de viento que se realizan para el diseño del modelo rugoso, si representan las condiciones del flujo real, porque se presenta un número de Reynolds de 2.5×10^5 , que según los aportes de Natalini et al. (2001), con base en la escala del modelo, la prueba se encuentra en régimen transcrito, por otra parte, se puede decir que considerando los estudios en cuerpos curvos también es válida la prueba con el número de Reynolds que se obtuvo, ya que $\mathbb{R}_{e_{crit}} = 1.6 \times 10^5 < \mathbb{R}_{e_{(prueba)}} = 2.5 \times 10^5$, por lo tanto es válido considerar los resultados de coeficientes de presión que se obtengan, para diseñar naves industriales arco – columna, ya que desde el punto de vista del régimen del flujo, las pruebas serán una correcta aproximación de los efectos del viento en las estructuras reales.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO

Las pruebas en túnel de viento actualmente son la principal alternativa para estudiar los efectos del viento en las obras civiles. En particular en este trabajo se realizaron pruebas naves industriales tipo arco – columna, para ello se siguió el procedimiento que a continuación se menciona, realizándolo en cada uno de los cuatro modelos probados.

Los modelos que se probaron fueron cuatro en total, dos para el modelo liso (extradós e intradós) y dos para el modelo rugoso (extradós e intradós) debido al procedimiento constructivo, ya que era imposible tomar presiones interiores y exteriores en una misma prueba. El ensayo de cada uno de los modelos consistió en montar el modelo en el centro de la mesa giratoria, durante este proceso se conectaron las 110 sondas que registraron las presiones sobre la cubierta, a los Zoc's que se encuentran por debajo del pasaje del túnel de viento; por otro parte se instalaron los instrumentos que permitieron registrar la presión estática y dinámica, que para este caso fueron, un tubo de Pitot (Figura 42 a) y un canal que registró la presión total mediante un transductor de presión (Figura 42 b). Una vez que se montó el modelo fue posible empezar la calibración del sistema transductor de presiones del túnel de viento, para lo cual fue necesario poner en funcionamiento el intercambiador térmico, el sistema regulador de presión de los transductores de presión, la mesa giratoria, así como cerrar en su totalidad la cámara de pruebas; la calibración se realiza con ayuda del software FLOPAC (Figura 41) instalado en el equipo de cómputo y esto consistió en configurar el software con la frecuencia de muestreo y el tipo de unidades que se utilizaron (Pascuales [Pa]) para poder realizar un giro periódico a la mesa giratoria e ir inyectando presión en las sondas para obtener lecturas con la menor variación posible. El mismo software se utilizó para realizar las mediciones de las presiones en la etapa de pruebas, donde se encendió el ventilador a las revoluciones determinadas para generar las velocidades del viento propuestas, se controlaban los tiempos de muestreo con un temporizador y se variaba el ángulo de incidencia del viento sobre la estructura desde el panel de control de mesas.

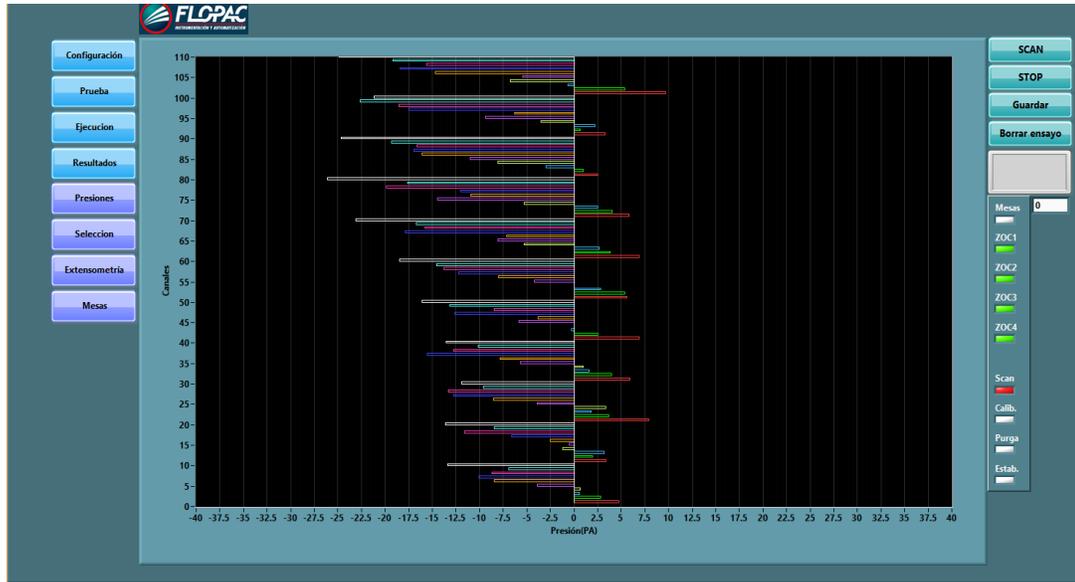


Figura 41. Software FLOPAC, Instrumentación y automatización

La operación de un túnel de viento es sencilla, sin embargo, es muy recomendable tener precaución en cada uno de los procesos que se llevan a cabo en él, porque pueden presentarse problemáticas que si no se detectan a tiempo, se reflejarán en mediciones erróneas y con ello se retrasará la prueba.

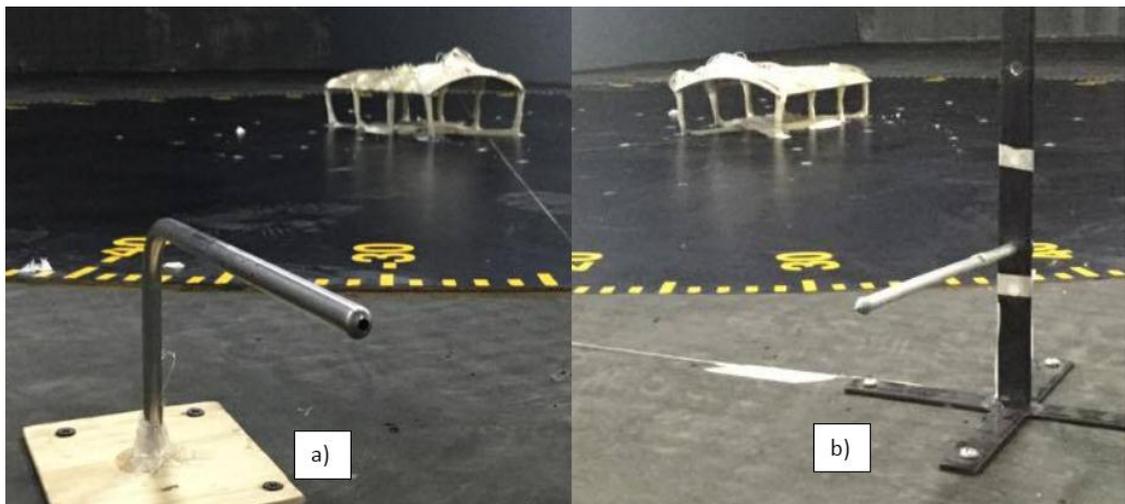


Figura 42. Medición de presión de referencia con a) Tubo Pitot y b) con toma de presión convencional

Para la obtención de los resultados se realizaron los siguientes procesos, como primer paso debe hacerse la corrección de la presión dinámica, la cual nos indica el porcentaje de amplificación o deamplificación que se debe considerar en la obtención de coeficientes de presión, para corregir las mediciones por el efecto de bloqueo y escalamiento en las pruebas de túnel de viento, esta corrección es importante ya que en la obtención de los coeficientes de presión $C_{p(e,i)}$, la presión dinámica es el divisor del diferencial de presiones, es por ello que debe tenerse precaución en aproximar lo mejor posible a un valor aceptable con base en las investigaciones realizadas. Esto se hace con la expresión propuesta por la teoría de Maskell 1963, que se muestra a continuación: (Hee – Chang et al., 2014)

$$\frac{q_c}{q} = \left[1 + \frac{5}{2} C_D \left(\frac{S}{C} \right) \right]$$

Donde:

q_c : Presión dinámica corregida

q : Presión dinámica no corregida

S : Sección transversal máxima del modelo

C : Sección transversal del túnel de viento

C_D : Coeficiente de arrastre no corregido $\cong 1$

Para nuestro caso

$$\frac{q_c}{q} = \left[1 + \frac{5}{2} (1) \left(\frac{0.0134 [m^2]}{7.8 [m^2]} \right) \right] = 1.0043$$

El fundamento para presentar los resultados con base en coeficientes de presión total (C_{pt}) es que en la geometría de la nave industrial tipo arco – columna, existe una interacción de presiones del viento en la cara cóncava y en la cara convexa de la cubierta y se relacionan entre sí con la obtención de coeficientes de presión totales (Holmes, 2007), los cuales se calculan de la siguiente manera:

$$C_{pt}(x, y, z, t) = C_{pe}(x, y, z, t) - C_{pi}(x, y, z, t)$$

Donde:

C_{pt} : *Coficiente de presión total a lo largo de la cubierta*

C_{pe} : *Coficiente de presión externa*

C_{pi} : *Coficiente de presión interna*

Esta ecuación generalmente presenta independencia de la dirección espacial del viento (x, y, z) en los coeficientes de presión internos (C_{pi}) debido a que la mayoría de estructuras similares, presentan aberturas en alguno de los muros lo cual origina una presión interna casi constante; sin embargo, para una nave industrial arco – columna este fenómeno cambia, ya que el viento origina diferenciales de presión a lo largo de toda la cubierta, es por ello que debe considerarse la variación de la dirección del viento en las presiones internas al igual que las externas para el diseño de estas estructuras.

4.COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentaran los resultados de coeficientes de presión totales (C_{pt}) obtenidos a partir de las pruebas experimentales en túnel de viento, estos se presentan en gráficas de contornos de presión realizadas con el software SURFER 13, con el objetivo de interpretar los resultados en su totalidad y de manera sencilla. Los contornos de presión se hicieron para los 11 ángulos de incidencia del viento mencionados en el subtema 4.1. de este trabajo, realizándolos para las dos velocidades del viento propuestas y a su vez para el modelo liso y rugoso, obteniendo en total 44 contornos de presión; sin embargo, se analizan minuciosamente los ángulos de incidencia 0° , 45° y 90° para cada modelo y para las dos velocidades propuestas; los análisis para estos tres ángulo de incidencia del viento se hacen, ya que son los que generalmente se presentan en la normativa de seguridad y el resto de los resultados se presentaran en un apéndice.

4.1.COMPARACIÓN DEL MODELO CON SUPERFICIE LISA Y RUGOSA

En este subtema se presentan los resultados de las pruebas de túnel de viento realizadas para las velocidades de 201 rpm y 247 rpm, a su vez para el modelo liso [M1] y rugoso [M2], obteniendo los coeficientes de presión total (C_{pt}) y realizando los contornos de presión para cada uno de los ángulos de interés.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO PARA 7.6 [m/s]

Incidencia del viento 0°

En la comparación de resultados para los modelos liso y rugoso en velocidad de 7.6 [m/s] se observa un comportamiento diferente en los coeficientes de presión en sotavento y hasta la parte media del eje longitudinal de la cubierta, ya que existen succiones que abarcan una mayor área para el modelo rugoso esto se verifica cuando la isobara con un coeficiente de presión igual a cero se recorre, que para el modelo liso se presenta en el primer octavo de la cubierta (Figura 43), y para el modelo rugoso se presenta hasta los cinco octavos (Figura 44), esto indica que la adherencia del flujo en el modelo liso se da casi inmediatamente por

el contrario en el modelo rugoso, la adherencia del flujo se presenta casi al final de la cubierta y en una pequeña longitud para finalmente separarse y una vez más adherirse en sotavento. También se puede decir que ambas cubiertas presentan un área considerable que está expuesta a succiones y que presentan un comportamiento del viento similar para ambas superficies, variando la localización y longitudes del desprendimiento de la corriente, así como de los valores de los coeficientes de presión con máximos de $C_{pt} \approx 0.13$ y coeficientes de presión totales mínimos, que se presentan en las esquinas con valores aproximadamente de $C_{pt} \approx -1.0$.

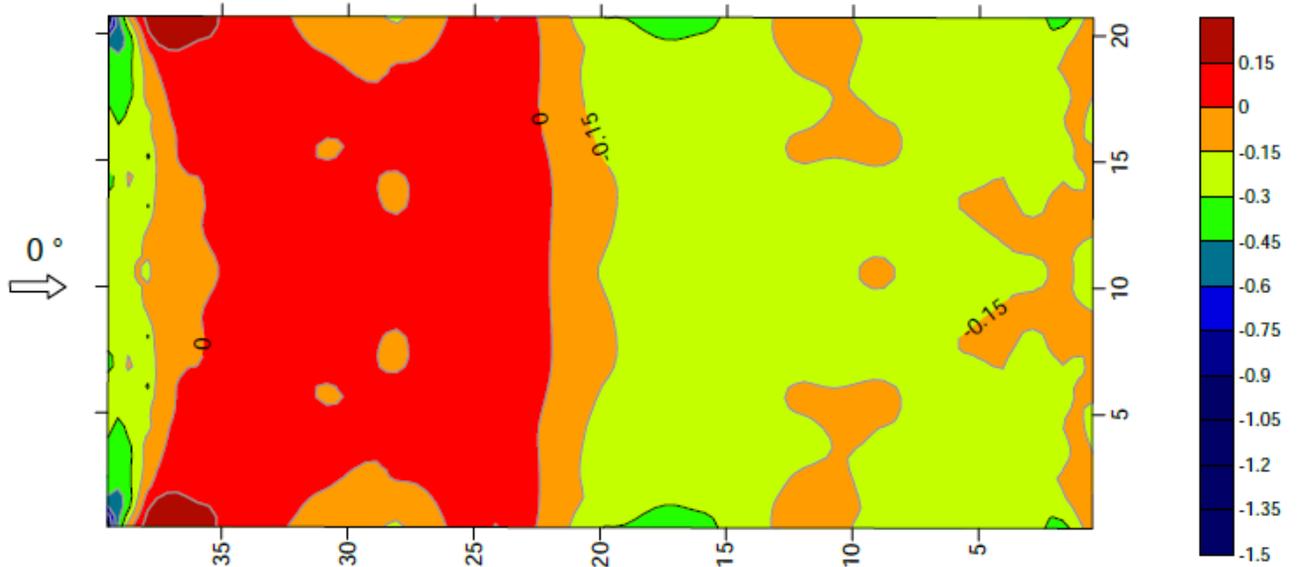


Figura 43. Modelo Liso, 7.6 [m/s], C_p total, incidencia 0 grados

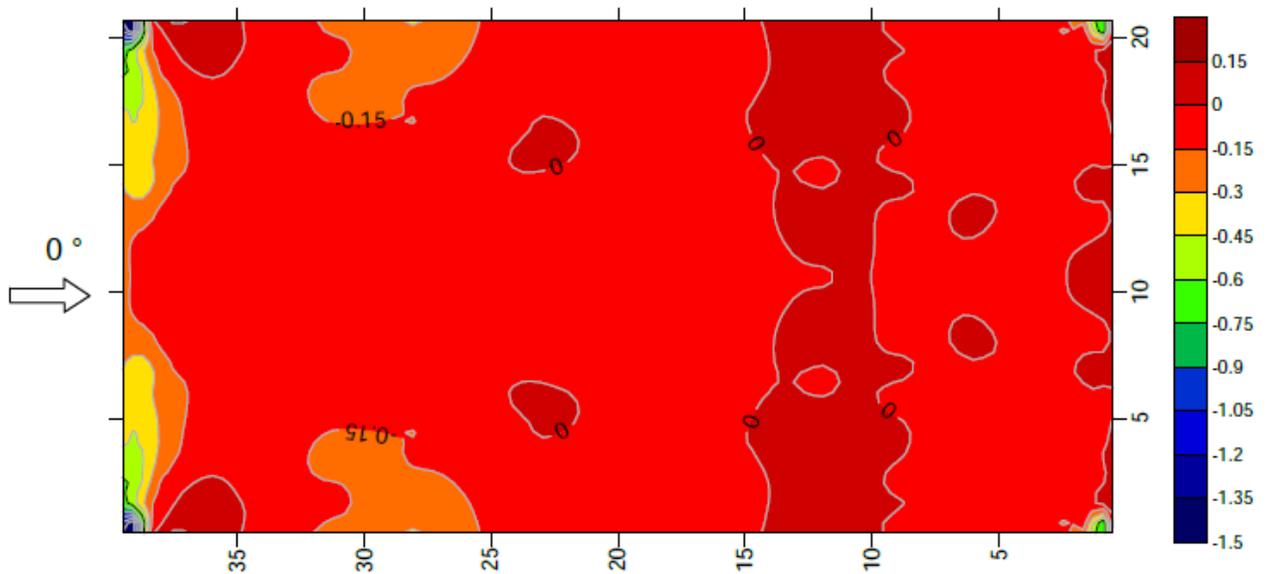


Figura 44. Modelo Rugoso, 7.6 [m/s], C_p total, incidencia 0 grados

Incidencia del viento 45°

Para el ángulo de incidencia de 45°, el comportamiento de los coeficientes de presión totales son similares en ambos casos en barlovento, ya que existen presiones en las dos situaciones, sin embargo, estas son mayores para el modelo liso; por otro lado, existe una diferencia muy notoria de las succiones en sotavento las cuales son mayores en el modelo rugoso (Figura 46) y menores en el modelo liso (Figura 45), este comportamiento sugiere que la turbulencia en la cercanía a la superficie de la cubierta rugosa es mucho mayor a la del modelo liso, lo cual tiene un comportamiento lógico, porque los granos de la rugosidad artificial hacen que se separe el flujo, consecuentemente existan succiones y una posible condición de flujo inverso lo cual evita que se adhiera la corriente a la superficie y que con el caos de las partículas las succiones sean grandes.

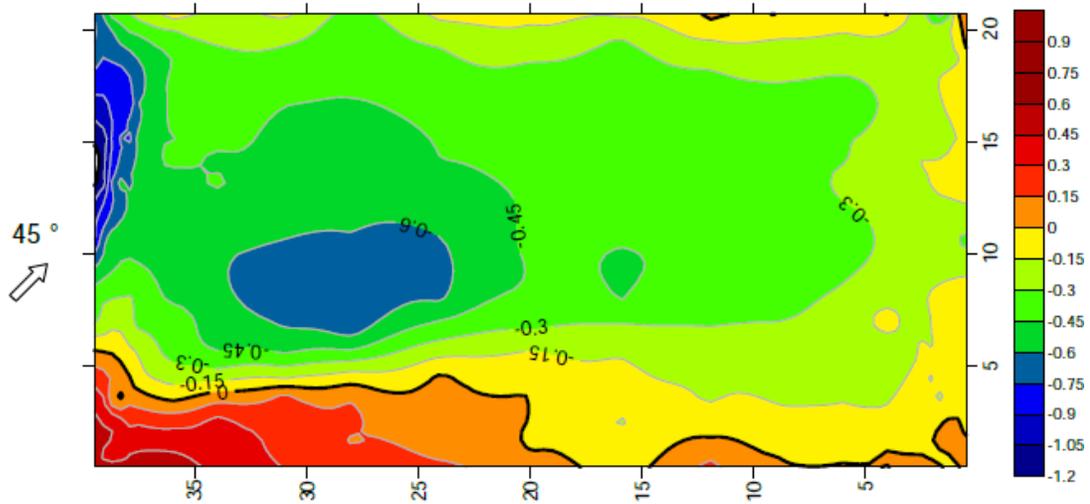


Figura 45. Modelo Liso, 7.6 [m/s], Cp total, incidencia 45 grados

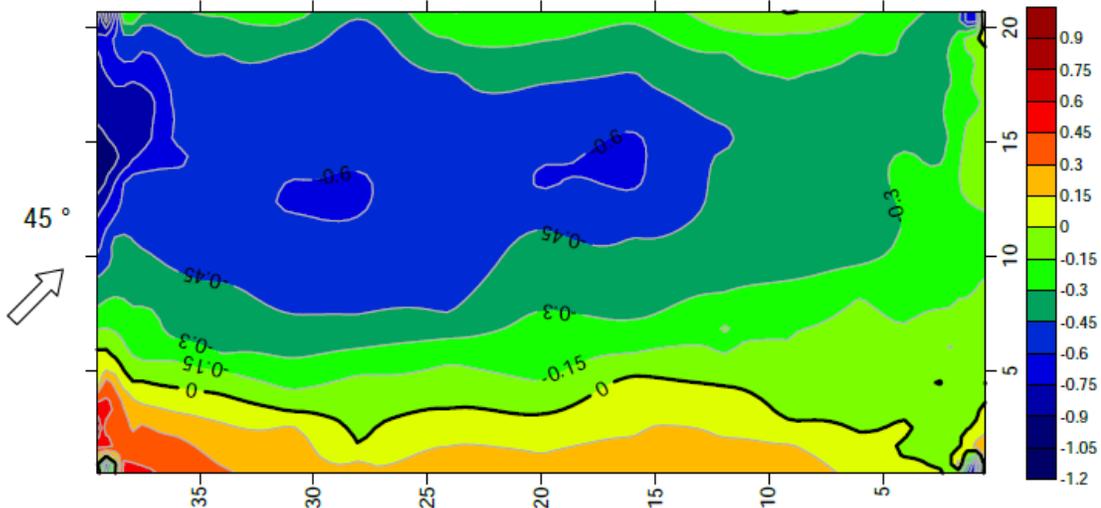


Figura 46. Modelo Rugoso, 7.6 [m/s], Cp total, incidencia 45 grados

Incidencia del viento 90°

Para el ángulo de incidencia del viento 90°, se observa que el desprendimiento del flujo sucede casi inmediatamente en barlovento en ambos casos, con gradientes en los coeficientes de presión altos, que van de 0.5 hasta -0.5 en apenas un tercio de la sección transversal de la nave industrial, esto es muy importante en los fenómenos físicos que se presentan en la realidad, ya que pueden llegar a generar severos daños en la cubierta localizada en barlovento; cabe resaltar que el comportamiento de los coeficientes de presión en sotavento a pesar de que son todos negativos (succiones) para ambas rugosidades, presentan variaciones en la forma de los lóbulos, los cuales muestran succiones más fuertes y en una mayor área para el modelo liso, es posible que esto se deba a la interacción de las presiones internas y externas.

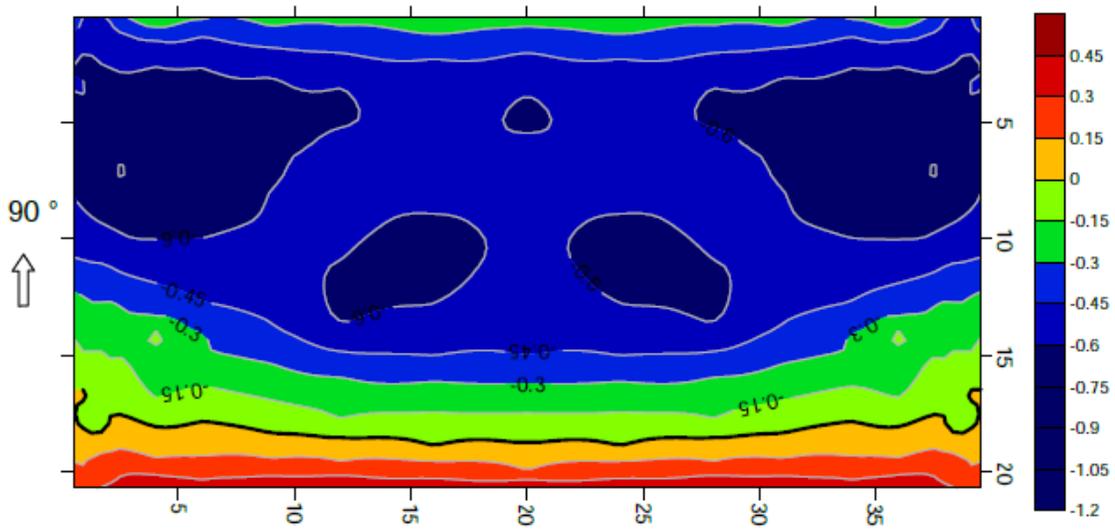


Figura 47. Modelo Liso, 7.6 [m/s], C_p total, incidencia 90 grados

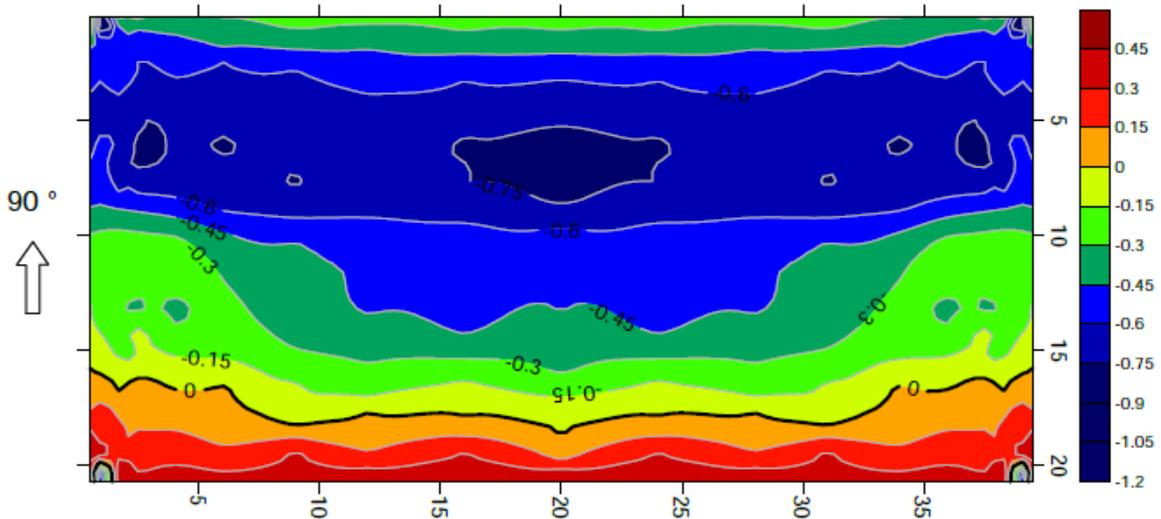


Figura 48. Modelo Rugoso, 7.6 [m/s], C_p total, incidencia 90 grados

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO PARA 9.49 [m/s]

Incidencia del viento 0°

Para una velocidad de 9.49 [m/s] en las pruebas de túnel de viento se observa que para el ángulo de incidencia del viento de 0° existen variaciones bajas en los coeficientes de presión para el modelo liso, y altas para el modelo rugoso, apreciándose en el cambio de forma y magnitud de los lóbulos del contorno de presión, lo cual se asocia con un mayor caos en las partículas de aire en la periferia de la superficie del modelo rugoso. Para ambos casos se presenta un desprendimiento de la corriente en barlovento, con los coeficientes de presión máximos ubicados en las esquinas de la cubierta; sin embargo en el modelo liso se observan coeficientes de presión positivos en casi toda la cubierta, destacando los valores máximos en un par de lóbulos que se observan en el primer octavo de la cubierta (Figura 49), los cuales se justifican por acción de presiones internas y externas actuando en las columnas en barlovento; por el contrario el comportamiento de las presiones para las columnas ubicadas en la zona media y sotavento de la estructura resultan en valores negativos de los coeficientes de presión. Este comportamiento en el perímetro de las columnas es similar para el modelo rugoso, pero en cuanto al desprendimiento del flujo, éste cambia, porque a diferencia del modelo liso se presenta un desprendimiento de la corriente y una adherencia en la zona media como se observa en la Figura 50, y en barlovento se vuelve a desprender la corriente generando succiones en la zona.

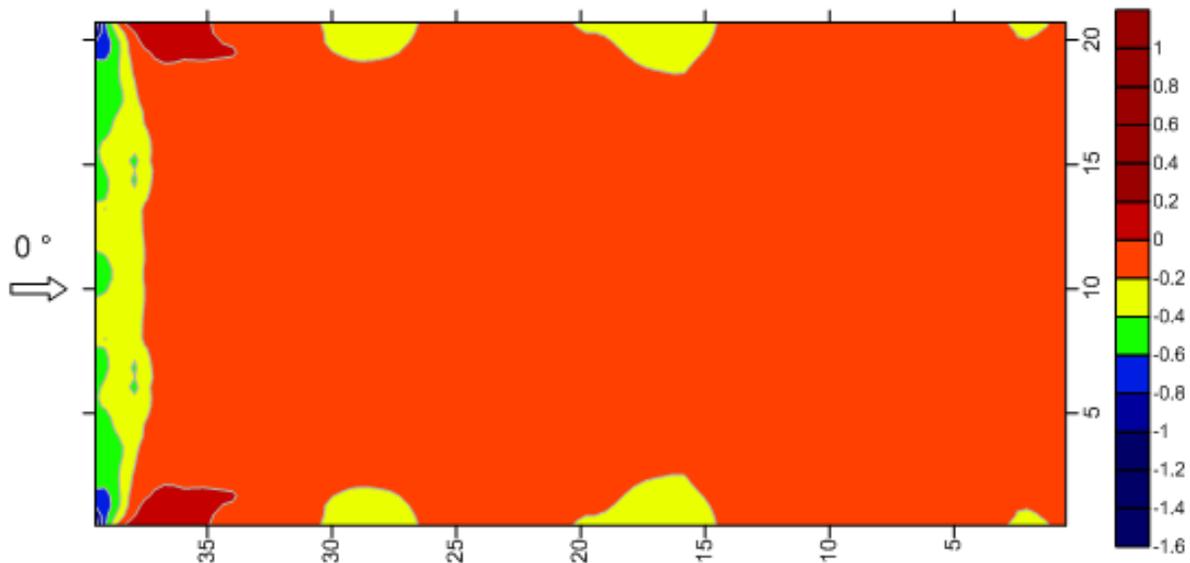


Figura 49. . Modelo Liso, 9.49 [m/s], Cp total, incidencia 0 grados

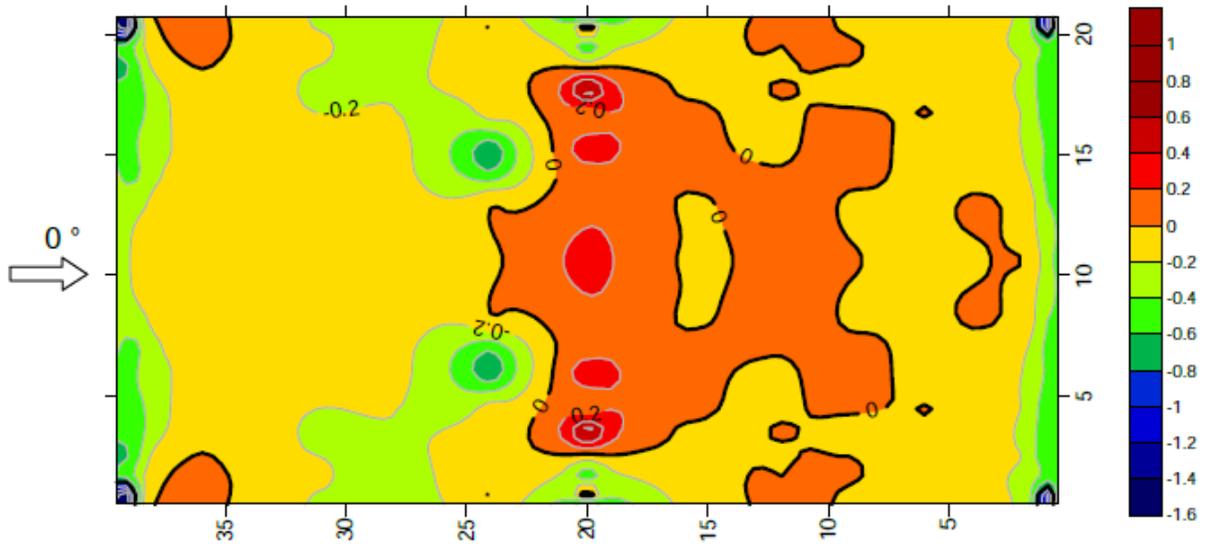


Figura 50. Modelo Rugoso, 9.49 [m/s], C_p total, incidencia 0 grados

Incidencia del viento 45°

Es importante mencionar que para el ángulo de incidencia del viento de 45°, siempre se presenta una zona con coeficientes de presión negativos (succiones) en sotavento, con valores máximos de hasta $C_{pt} \cong -1.5$ para ambos modelos, siendo mayor para el modelo rugoso, debido a estas fuerzas de succión podrían originarse severos problemas en la cubierta; por otra parte, se debe de considerar que la asimetría en los coeficientes de presión a lo largo de toda la cubierta, yendo de presiones hasta succiones máximas en la misma sección transversal de la cubierta, puede generar momentos torsionante muy grandes en la estructura o en el mismo laminado de la nave industrial.

Los C_{pt} son diferentes en magnitud para este ángulo de incidencia en ambos modelos, ya que para el modelo liso las presiones son muy grandes en barlovento y las succiones son más pequeñas en sotavento, en comparación con el modelo rugoso donde las presiones son mucho menores en barlovento y las succiones son mayores en sotavento; por otra parte, a pesar de que en el modelo rugoso se esperarían C_{pt} con magnitudes mayores, una razón por la cual estos coeficientes son menores, se debe a la interacción de fuerzas internas y externas, sin embargo, es pertinente mencionar que el viento puede llegar a tener un comportamiento más complejo, ya que en cercanías a la rugosidad de la superficie se crea una zona muy perturbada de las partículas de aire con remolinos y flujos inversos, lo cual proporciona una especie de “escudo” disminuyendo el impacto de las fuerzas del viento sobre la estructura.

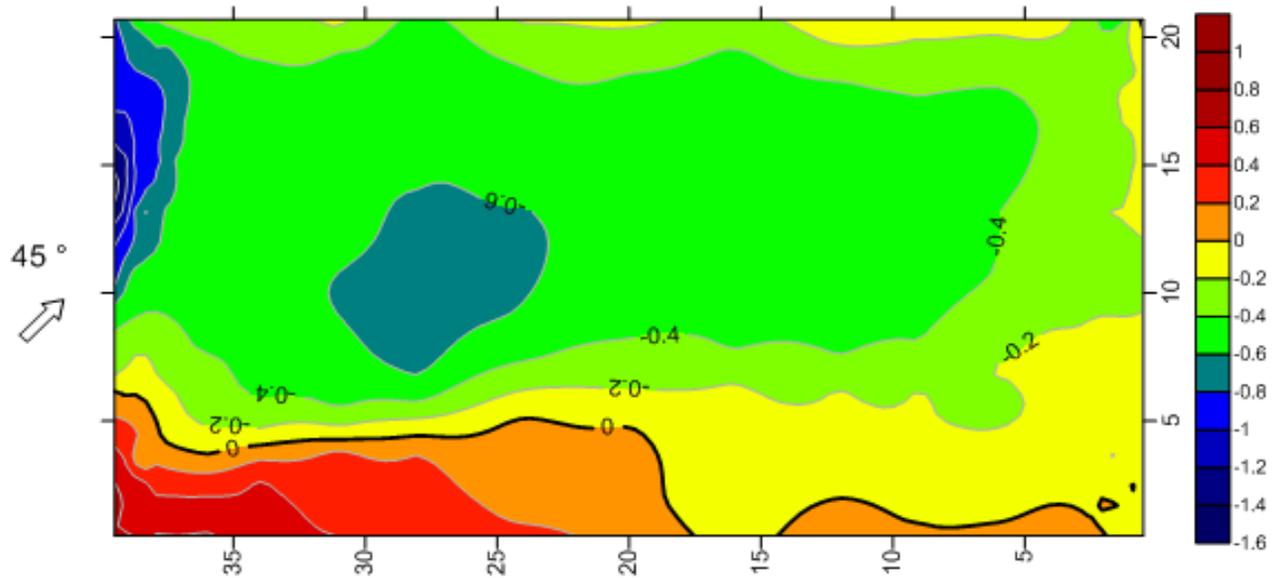


Figura 51. Modelo Liso, 9.49 [m/s], C_p total, 45 grados

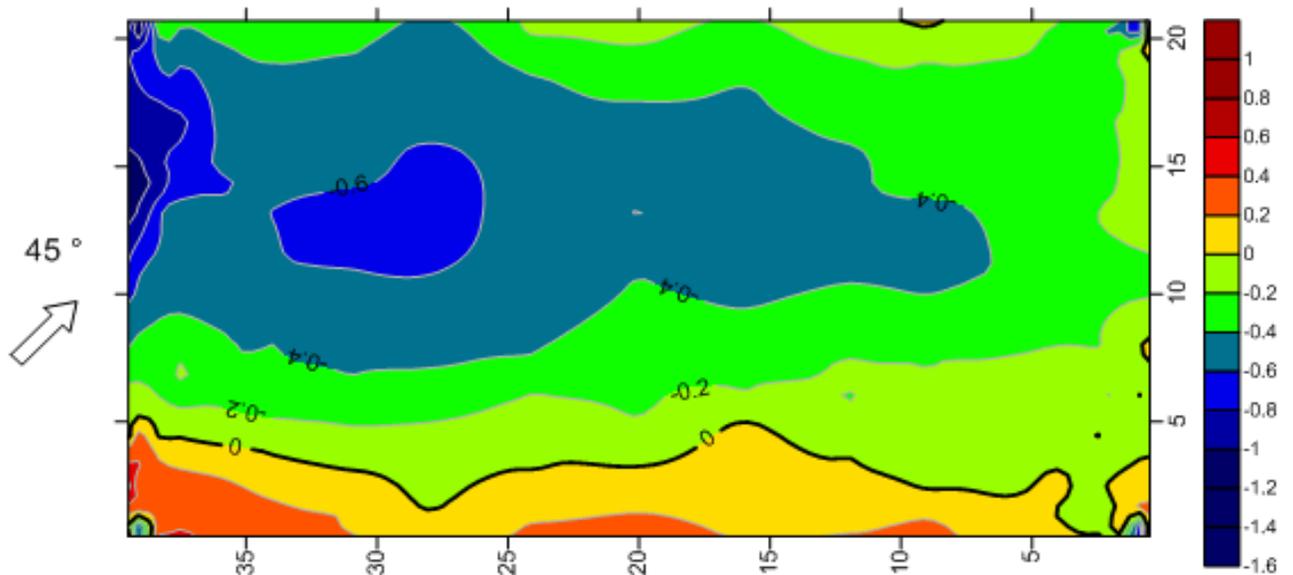


Figura 52. Modelo Rugoso, 9.49 [m/s], C_p total, incidencia 45 grados

Incidencia del viento 90°

Los efectos del viento sobre ambos modelos es similar para el ángulo de incidencia de 90°, se destaca una zona de C_{Pt} positivos en barlovento y un cambio paulatino de los coeficientes hacia succiones en sotavento, en ambos casos se distinguen los mismo valores en los coeficientes de presión totales que va de $C_{Pt} = 0.45$ a -0.6 en la cumbre de la cubierta; también se distingue un comportamiento más irregular de la forma de los lóbulos de las gráficas en el modelo rugoso, lo cual se debe a un comportamiento más caótico del

viento. De igual manera se presentan las succiones más grandes en sotavento y en todas las esquinas de la cubierta.

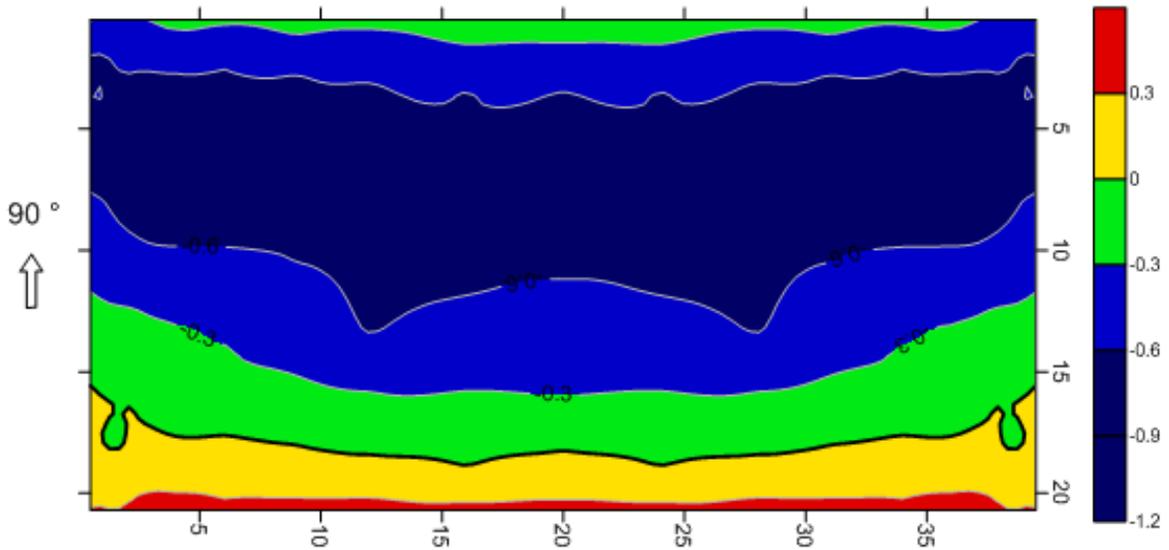


Figura 53. Modelo Liso, 9.49 [m/s], C_p total, incidencia 90 grados

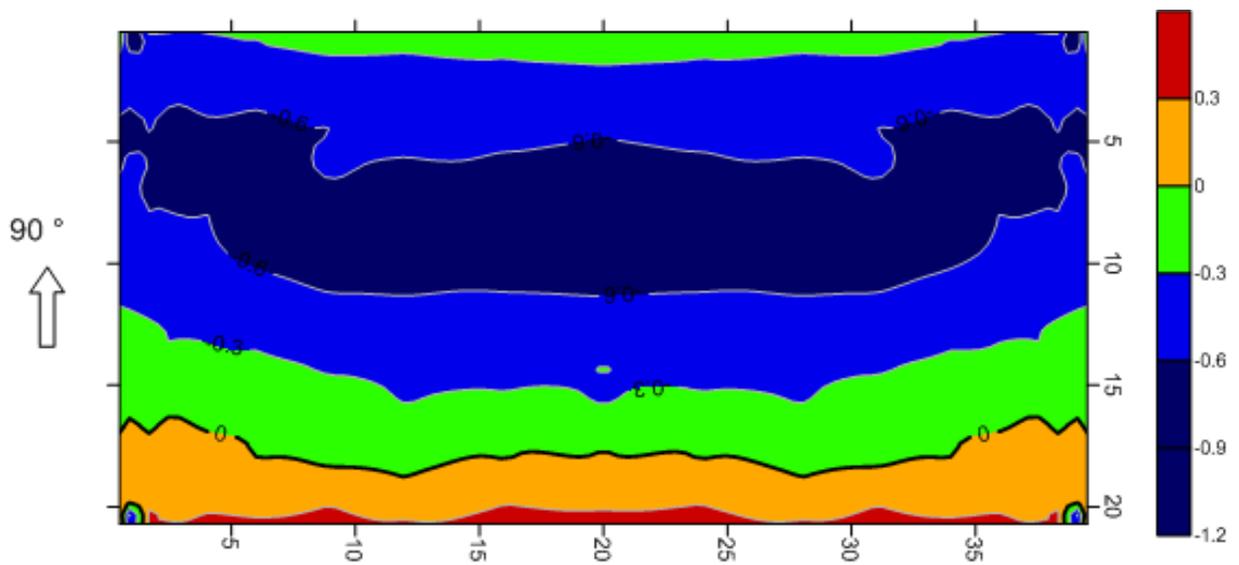


Figura 54. Modelo Rugoso, 9.49 [m/s], C_p total, 90 grados

Como una observación particular se tiene que la distribución de presiones en la parte interior de la nave industrial sigue el mismo comportamiento para todos los ángulos de incidencia del viento, esto es, concentración de presiones mayores en la zona de la cresta del arco; yendo de menor magnitud de las presiones en la cresta para el ángulo de incidencia 0°, hasta una magnitud máxima de presiones en la misma zona para el ángulo de incidencia 90°.

COMPARACIÓN DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO DEL MODELO RUGOSO PARA 7.6 [m/s] Y 9.49 [m/s] PARA UN ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO DE 90°

Esta comparación es importante para verificar el comportamiento del viento sobre las naves industriales tipo arco – columna, primero es apreciable que para el modelo rugoso con el mismo ángulo de incidencia del viento (90 grados) variando la velocidad de prueba; se tienen C_{pt} más grandes y en mayor área para la velocidad de 7.6 [m/s], por el contrario estos coeficientes son de la misma magnitud pero en una área muy pequeña en barlovento para la velocidad de 9.49 [m/s], lo cual es congruente con los resultados que reporta la bibliografía correspondiente a la aerodinámica en cuerpos circulares, que hace énfasis en que conforme aumenta la velocidad del flujo (aumento del Reynolds), los coeficientes de presión sobre un cuerpo semi – circular disminuyen, al igual que el coeficiente de arrastre (Holmes, 2007).

Para los resultados que se muestran, la diferencia entre las zonas con coeficientes de presión positivos máximos es notoria, sin embargo, con una mayor cambio en las velocidades de pruebas se apreciaría mejor el fenómeno mencionado anteriormente.

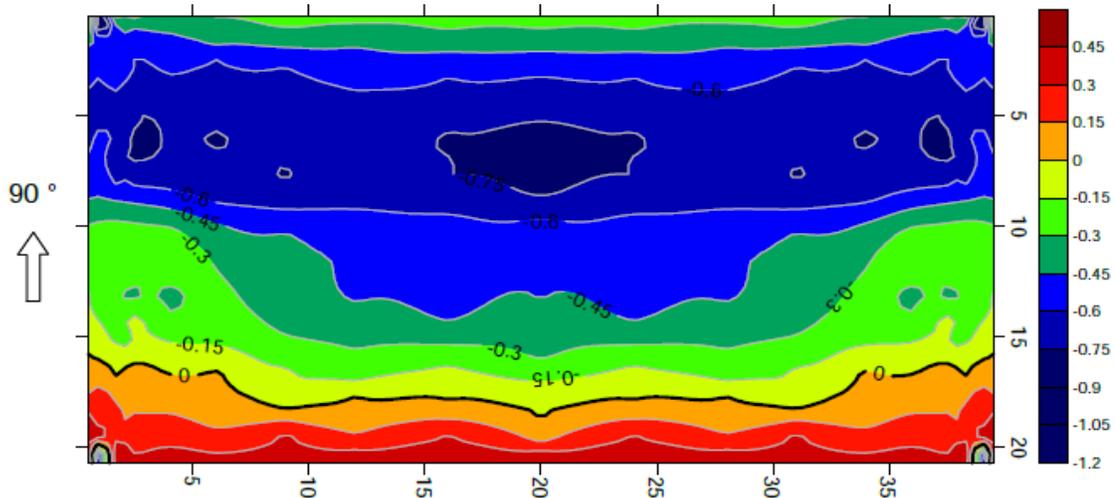


Figura 55. Modelo Rugoso, 7.6 [m/s], C_p total, 90 grados

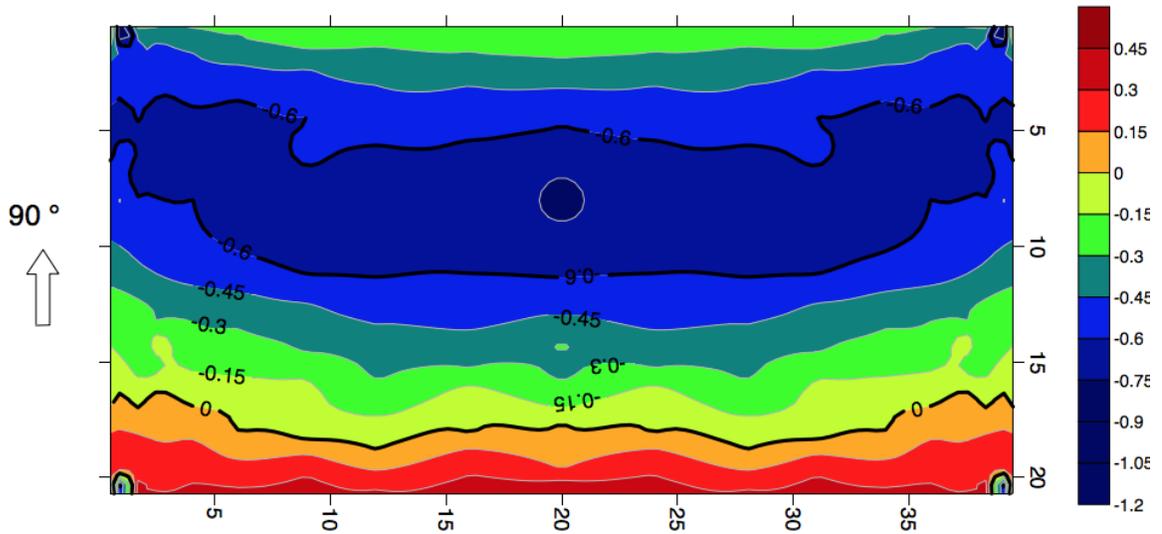


Figura 56. Modelo Rugoso, 9.49 [m/s], C_p total, 90 grados

Es importante mencionar que la separación del flujo cambia su posición para ambas pruebas realizadas en el modelo rugoso cambiando la velocidad, lo cual varía directamente el número de Reynolds de la prueba, este fenómeno se observa de manera más clara y precisa en un contorno de presión que presente únicamente los coeficientes de presión externos, como se muestra en la Figura 57, en la cual la separación del flujo se da más rápidamente en el modelo Rugoso, aproximadamente a 1.8 [cm] medidos a partir del alerón y en dirección del viento; y más lento en el modelo Liso, aproximadamente a los 2.5 [cm].

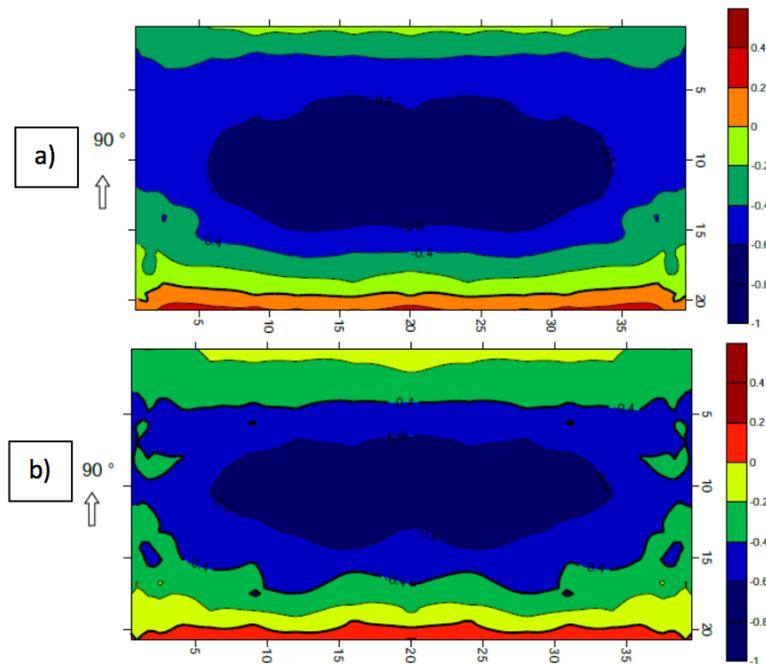


Figura 57. Desprendimiento de la corriente en los modelos a) Liso y b) Rugoso para una velocidad de 9.49 [m/s]

Una forma más clara de apreciar la separación del flujo es en el gráfico de la Figura 58, donde se grafican los coeficientes de presión externos a lo largo del arco central de la cubierta, variando el número de Reynolds. Es posible observar que la separación del flujo sobre la cubierta se da primero con el número de Reynolds mayor, que para este caso se dio en el tap número 3 aproximadamente, y para el número de Reynolds más bajo se dio hasta el tap 5 aproximadamente, lo cual se puede interpretar directamente en el valor de los coeficientes de presión, esto es, que a números de Re bajos los gradientes de presión serán más grandes, por el contrario con números de Re grandes la curva de los gradientes de presión es más suave por lo tanto los gradientes de presión serán menores. También se puede observar que la tendencia de los resultados para ambos números de Reynolds es similar, en cuanto a forma, con la particularidad de que en barlovento existen cambios en la magnitud de los coeficientes de presión, y en sotavento son muy parecidos los valores de los coeficientes. Con lo anterior es posible corroborar el comportamiento del viento, en cuanto a los coeficientes de presión externos, tal y como lo reporta en la literatura

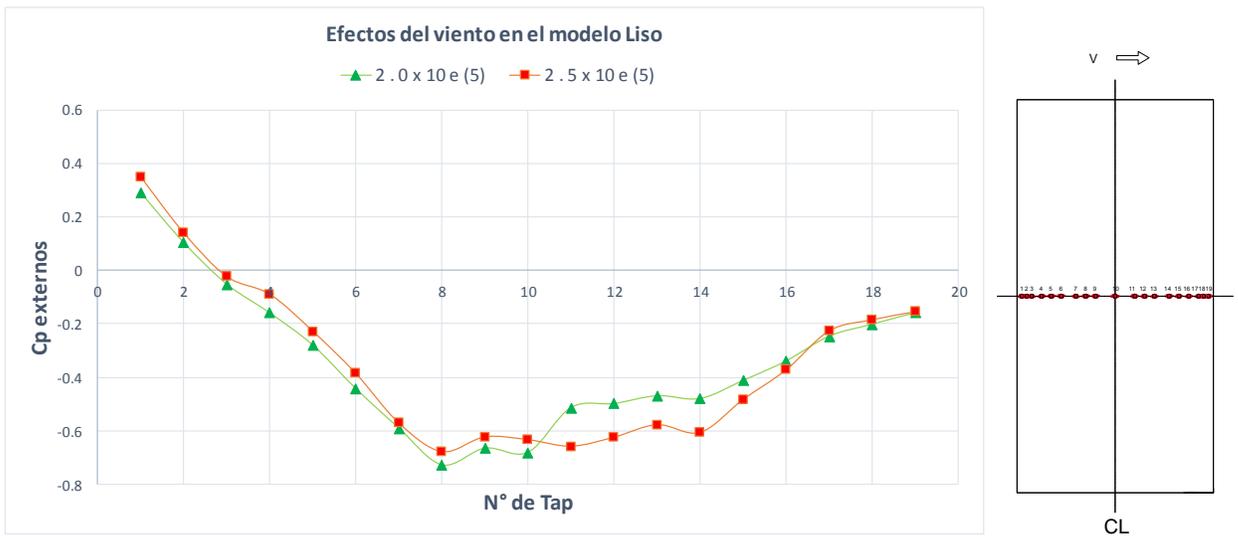


Figura 58. Efectos del viento en el modelo Rugoso

De manera análoga, un análisis a los coeficientes de presión en el arco central con incidencia del viento a 90 grados para el modelo liso (Figura 59) muestra a simple vista la similitud de los coeficientes de presión externos para ambos números de Reynolds, habiendo un pequeño cambio en la magnitud de los mismos en barlovento y sotavento; sin embargo, para la zona de la cresta existe una variación mayor del orden de $Cp_e=0.1$. Es importante notar que en el modelo liso la separación del flujo ocurre casi en la misma zona, sin importar la variación del número de Reynolds.

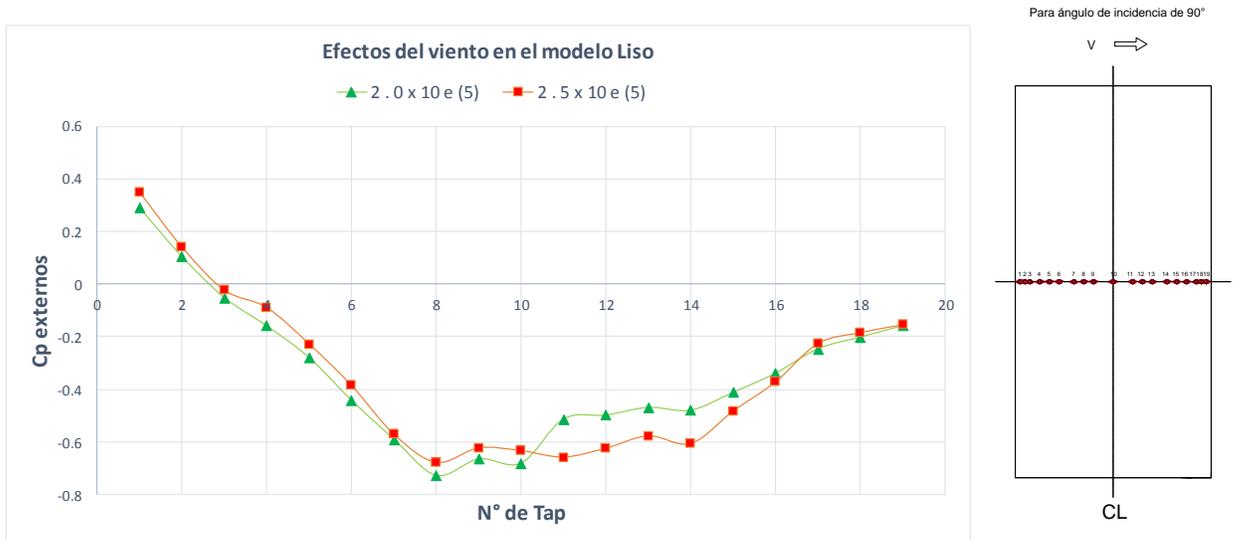


Figura 59. Efectos del viento en el modelo liso

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE TÚNEL DE VIENTO Y LOS PRESENTADOS POR BALBASTRO ET AL. (2005), EN ARGENTINA, PARA LA MISMA TIPOLOGÍA DE NAVE INDUSTRIAL.

Esta comparación de coeficientes de presión totales se hace para el modelo rugoso en la velocidad 9.49 [m/s], con un ángulo de incidencia del viento de 90°; contra los resultados en túnel de viento presentados por Balbastro et al. (2005), en Argentina, donde se realiza el mismo estudio sobre la misma estructura [12]. En ambos casos los coeficientes de presión total (Cp_t) a comparar, son considerados a lo largo del arco central de los modelos.

Como se observa en la Figura 60 los resultados obtenidos en las pruebas de túnel de viento para el modelo Rugoso siguen el mismo comportamiento que los presentados por Balbastro et al. (2005), habiendo presiones en barlovento hasta el Tap 4 aproximadamente, y un desprendimiento de la corriente entre el Tap 4 y 5, también se presentan succiones partir del Tap 5 al 19 en ambos casos, y a pesar de que la magnitud de los Cp_t son diferentes, se observa una succión mayor en la misma zona para ambas pruebas (Tap 11), de igual manera en sotavento el comportamiento de los Cp_t son similares, por lo cual podemos validar los resultados obtenidos para el modelo rugoso.

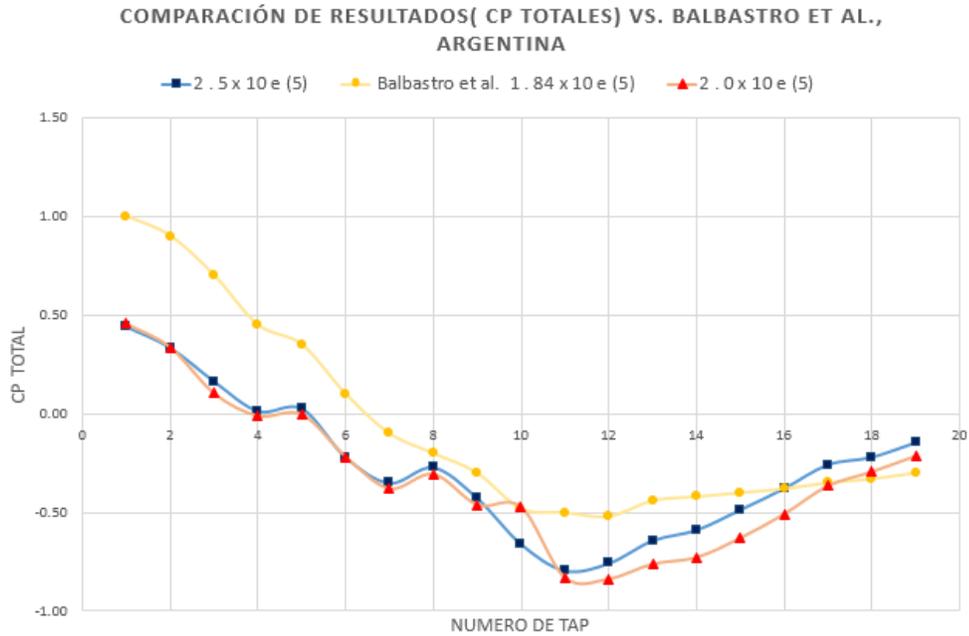


Figura 60. Cp. Totales en modelo rugoso Vs. Balbastro et al. (2005)

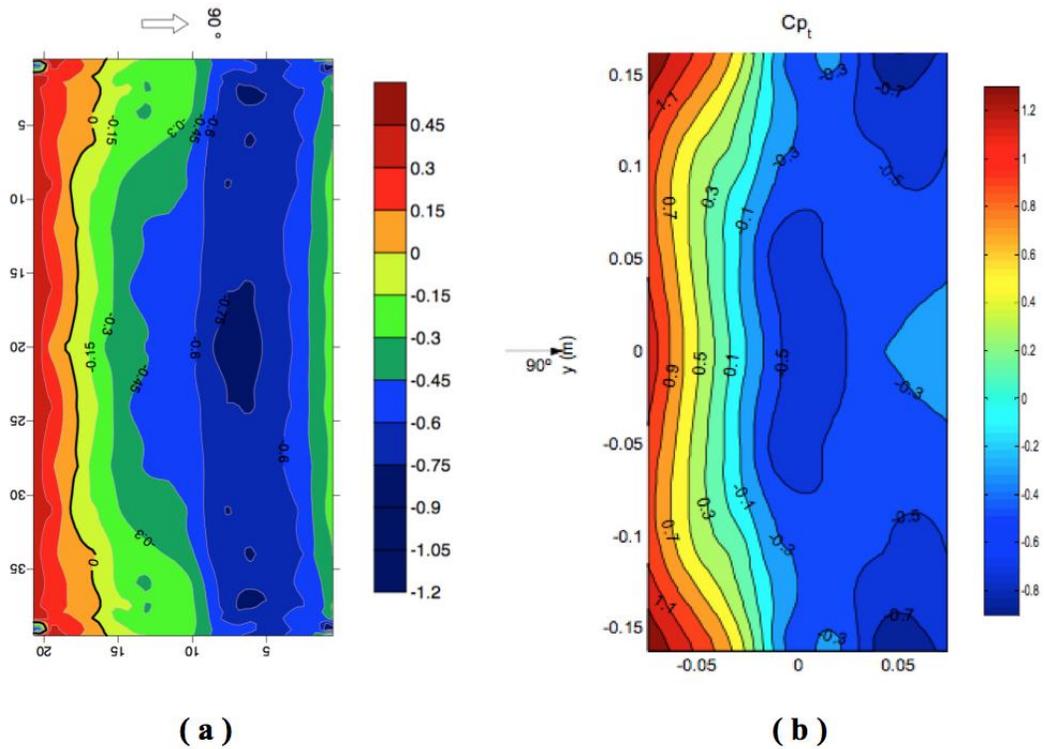


Figura 61. Contornos de presión para Cp. total en a) Modelo Rugoso y b) Balbastro et al. (2005)

CAPITULO 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con base en resultados cuantitativos se realiza una comparativa con los resultados obtenidos por Balbastro et al. (2005), para lo cual es necesario zonificar a la cubierta de la estructura como se muestra en la Figura 62. De donde se obtiene el C_p total más crítico para cada una de la zonas, mismos que se muestran en la tabla siguiente:

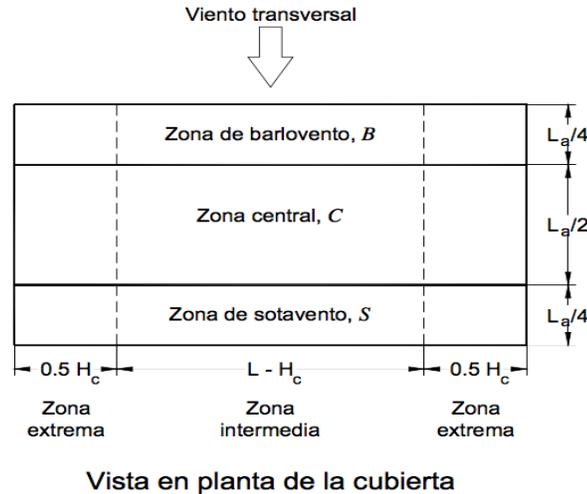


Figura 62. Zonificación para la presentación de C_p en naves industriales con cubierta de arco circular (CFE, 2008)

COMPARACIÓN DE C_p TOTALES EN ANEVS INDUSTRIALES CON CUBIERTA DE ARCO CIRCULAR, PARA UN ÁNGULO DE INCIDENCIA DEL VIENTO DE 90 GRADOS				
ZONA		MODELO		
		PRUEBAS EXPERIMENTALES*	BALBASTRO ET AL. (2005)	% ERROR= $1 - (PE/BALBASTRO) \times 100$
Zona extrema	Balovento	-0.83	-1.20	30.83
	Central	-0.66	-0.50	32.00
	Sotavento	-1.10	-0.80	37.50
Zona Intermedia	Balovento	0.44	-1.00	56.00
	Central	-0.80	-0.70	14.29
	Sotavento	-0.70	-0.40	75.00

* La velocidad de prueba para estos C_p totales fue de 9.49 [m/s] en el modelo rugoso

De esta comparación es posible observar que las diferencias en los resultados son grandes en casi toda la cubierta ya que los porcentajes de error mínimos son de 14 % y 30 %; sin embargo, es importante enfatizar en que los resultados son válidos, ya que no son mayores a 100% a pesar de que las condiciones de prueba son diferentes, principalmente la geometría, ya que contempla una pendiente mayor; también el número de Reynolds, el tamaño de grano de arena para generar la rugosidad artificialmente, así como el perfil de velocidades del viento.

INFLUENCIA DEL NÚMERO DE REYNOLDS EN LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN TOTAL

Es importante hacer un análisis relacionado con el número de Reynolds, ya que como se explicó anteriormente, es un factor importante en las pruebas de modelos con geometría curva, y para ello se presentan las Figuras 63 y 64, que son gráficas para un ángulo de incidencia del viento a 90 grados, en los modelos liso y rugoso, variando el número de Reynolds de la prueba; en ellas se puede observar que el comportamiento de los datos siguen una tendencia muy similar para ambos casos de comparación en los coeficientes de presión total, entonces se puede concluir que estos coeficientes son muy poco sensibles ante bajos cambios al número de Reynolds, lo cual es coherente con lo que se reporta en la bibliografía (Cook, 1990), ya que en ella se menciona que en el régimen transcrito los coeficientes de presión tienen un comportamiento estable, que por el contrario en el régimen crítico, los coeficientes de presión presentan variaciones grandes y consecuentemente en resultados de las pruebas en túnel de viento poco confiables, por esto, es posible validar la obtención de resultados de las pruebas realizadas en este trabajo, a partir de un análisis de sensibilidad de los resultados al número de Reynolds.

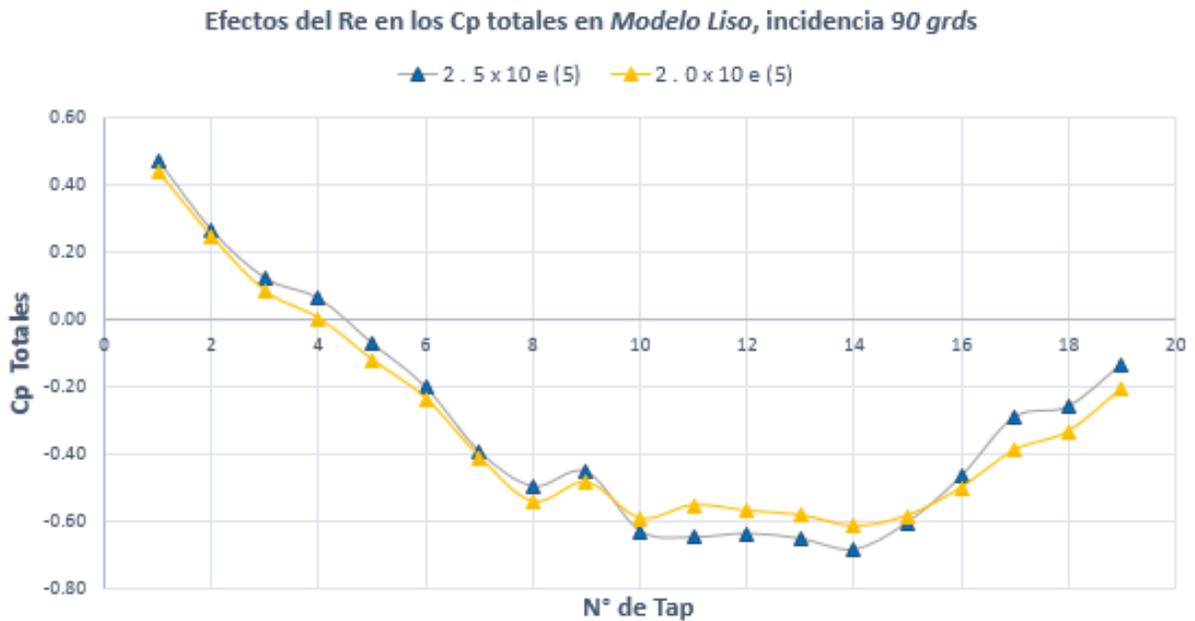


Figura 63. Efectos del número de Reynolds en el Modelo Liso a 90 grados

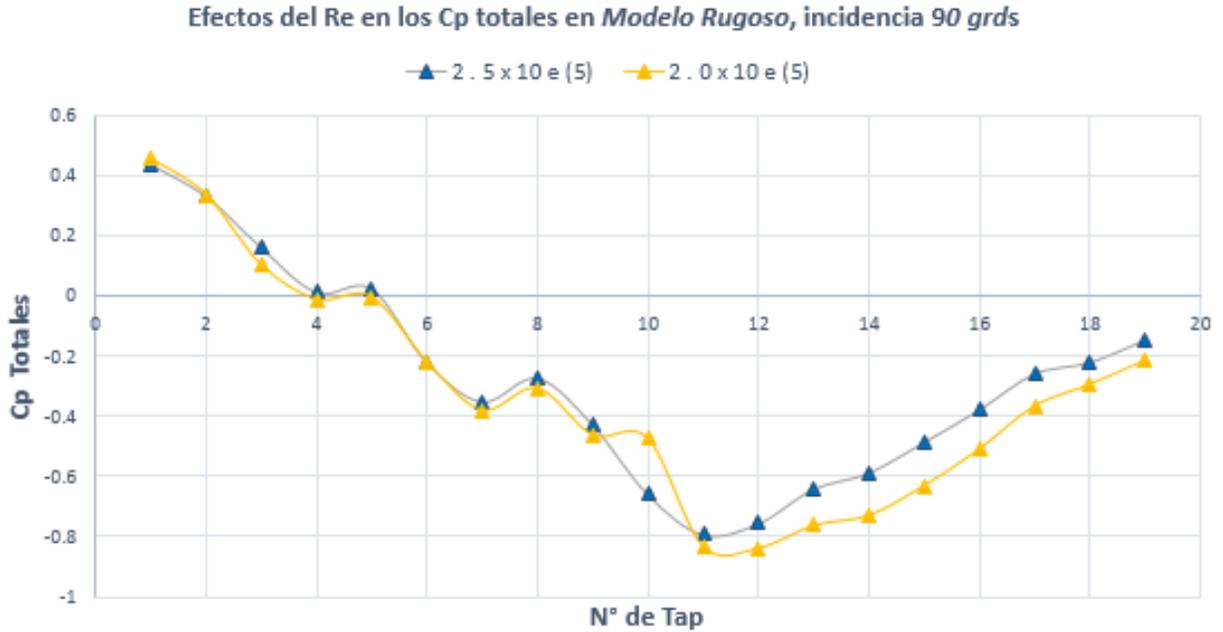


Figura 64. Efectos del número de Reynolds en el Modelo Rugoso a 90 grados

4.2.COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA NORMATIVIDAD EMPLEADA EN DISEÑO POR VIENTO EN MÉXICO

En este subtema se realiza una comparativa de los coeficientes de presión total obtenidos sobre la cubierta de una nave industrial tipo arco – columna, contra los que se consideran en la normatividad actual empleada en diseño por viento en México que es el “Manual de Obras Civiles para Diseño por Viento, CFE en 2008” y las “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento, GODF en 2004”, es importante enfatizar que ambas normativas, consideran únicamente las estructuras con techos en arco con paredes perimetrales; sin embargo, es de gran interés observar las diferencias que existen en los coeficientes de presión utilizados para el diseño de las naves industriales arco – columna en la actualidad, ya que es muy común que en la práctica de la ingeniería civil, ante la ausencia de coeficientes de presión para el diseño de estas estructuras en las normatividad de seguridad estructural, se utilicen coeficientes con magnitudes diferentes a las correspondientes, con lo cual se pueden sobrestimar o subestimar los coeficientes de presión, resultando en estructuras muy costosas, ineficientes e inseguras.

Por otra parte, la base de este análisis comparativo se realizó para el ángulo de incidencia del viento de 90 grados (normal a la generatriz), el cual se presenta en el MOC – DV (CFE, 2008) y las NTC – DV (GODF, 2004), también, para comparar los datos se consideró la

zonificación empleada en el MOC – DV correspondiente a la Figura 62 de este escrito, ya que esta distribución de zonas concuerda con lo que reporta la bibliografía en cuanto a los diferenciales de presión máximos, que ocurren en el perímetro de la cubierta y con mayor magnitud en las esquinas.

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de presión totales que se consideran para la comparación; en primer lugar se encuentran los obtenidos mediante las pruebas experimentales motivo de este trabajo, considerando al ángulo de incidencia del viento a 90 grados con los coeficientes de presión más desfavorables, el cual ocurrió a la velocidad de 9.49 [m/s]; en segundo lugar los coeficientes que propone el MOC–DV para las estructuras con cubierta en arco circular con paredes perimetrales con base en su relación $\lambda_c = H_c/b$, y por último se encuentra las consideraciones de las NTC–DV con base en su relación $r = a/d$. Con el fin de observar de manera gráfica estos datos se presentan los diagramas de las Figuras 65 y 66, cuyas diferencias se discuten más adelante.

Coeficientes de presión para construcciones con cubierta en arco circular, viento normal a las generatrices				
	Zona	Barlovento	Central	Sotavento
Resultados Experimentales	extrema	-0.86	-0.70	-1.10
	intermedia	-0.22	-0.84	-0.75
MOC - DV 2008 (sin aberturas)	extrema	0.33	-0.67	-0.42
	intermedia	0.33	-0.38	-0.31
NTC - DV 2004 (sin aberturas)	extrema	-0.90	-0.55	-0.50
	intermedia	-0.90	-0.55	-0.50

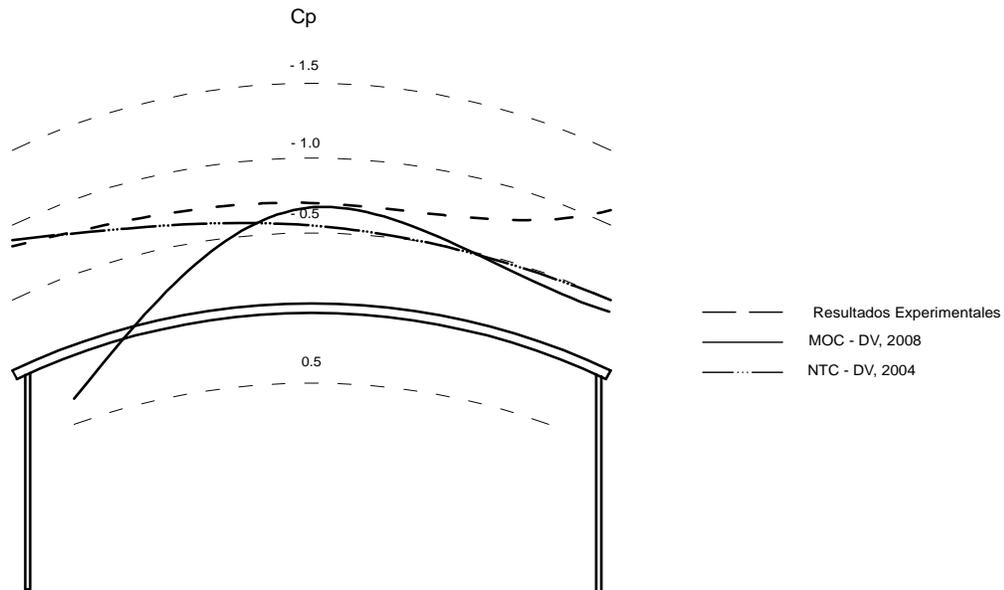


Figura 65. Coeficientes de presión total en zonas extremas de la cubierta, incidencia del viento a 90 grados

En esta comparativa se realiza en una sección transversal en las zonas extremas de la cubierta (Figura 62), y como se puede observar la mayor semejanza en el comportamiento de los coeficientes de presión ocurre entre los resultados experimentales y las NTC – DV, donde los coeficientes son comparables en barlovento, teniendo una mayor presión en los resultados experimentales, posteriormente en la zona central ocurre un cambio paulatino con succiones mayores en los resultados experimentales y presiones mayores en las NTC – DV, para finalizar con una diferencia en coeficiente de presión de 0.6; el comportamiento anterior es lógico, ya que en el caso de los resultados experimentales, se basan en una geometría sin paredes perimetrales con lo cual la interacción de presiones internas y externas originan esa gran diferencia en los coeficientes de sotavento. Por otra parte es evidente que la propuesta de coeficientes de presión del MOC – DV para el mismo corte transversal, el comportamiento del viento es muy diferente en barlovento y zona central, con diferencias de hasta 1.2 en los coeficientes de presión para barlovento y con semejanza en las NTC para sotavento.

En general para esta comparación puede corroborarse que en la zona central y en sotavento los coeficientes de presión son comparables para los tres casos; sin embargo, para barlovento hay una gran diferencia entre los resultados experimentales y las NTC – DV contra el MOC – DV, lo cual podría ser motivo de un análisis más complejo.

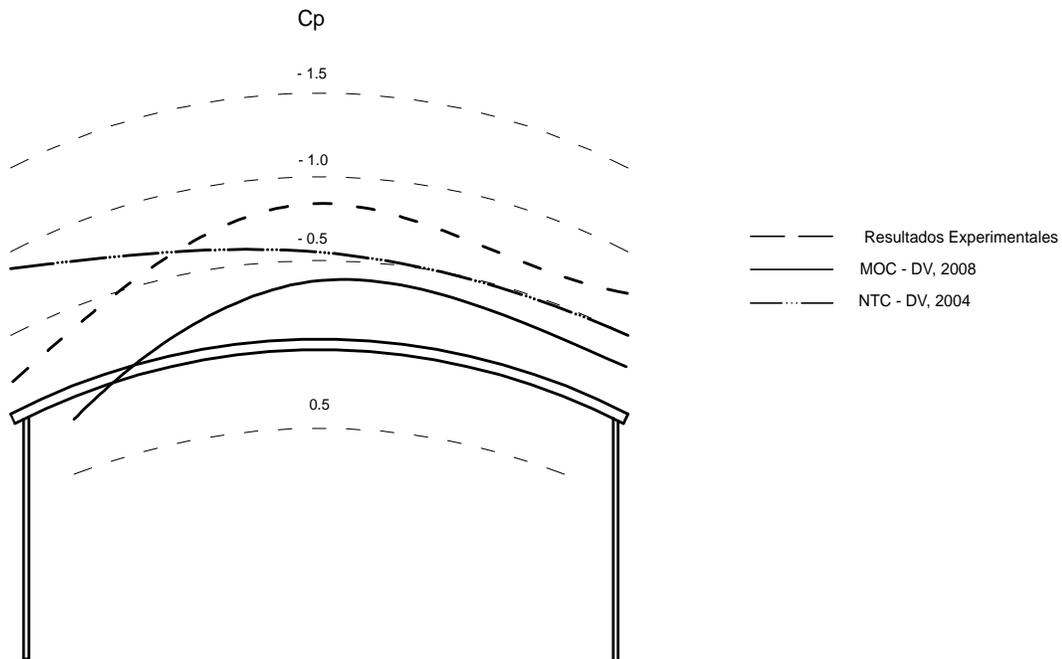


Figura 66. Coeficientes de presión total en zona intermedia de la cubierta, incidencia del viento a 90 grados

En el corte transversal en la sección central de la cubierta de la nave industrial, se tiene el diagrama presentado en la Figura 66, donde se puede observar un comportamiento de los coeficientes de presión comparable en forma pero no en magnitud entre los resultados experimentales y los que se proponen en el MOC – DV; como se observa en barlovento ambas líneas tienden a ser presiones y en el caso del MOC – DV, sí llegan a considerarse presiones en la zona del alerón de barlovento, esta pequeña diferencia en la magnitud de los coeficientes de presión se debe a la interacción de presiones internas y externas. También en la zona central se nota una semejanza ya que ambas líneas siguen un comportamiento parabólico, y paralelo, hasta la zona de sotavento donde existe una mayor succión para pruebas experimentales. Como conclusión de la comparativa entre las tres propuestas de coeficientes de presión se puede decir que hay una gran semejanza en el comportamiento de los coeficientes de presión, entre los resultados experimentales y los presentados por el MOC – DV, por el contrario existe una gran diferencia de hasta 0.6 par barlovento entre los resultados experimentales y las NTC – DV.

En cuanto al análisis comparativo se puede decir que los resultados obtenidos en este trabajo son válidos, ya que los coeficientes de presión tienen un comportamiento coherente con lo que se presenta en la normatividad actual; sin embargo, en cuanto al aspecto cuantitativo no es posible obtener los mismos resultados en los coeficientes de presión, ya que estos pueden variar en cada una de las pruebas debido a la sensibilidad del desprendimiento del flujo en cubiertas curvas originado por el régimen en el que se realice la prueba de túnel de viento.

Con base en las comparaciones anteriores es posible confirmar la importancia que tiene la interacción de presiones internas con las externas en una cubierta curva sin paredes perimetrales, ya que como se observa en los resultados la magnitud de los coeficientes de presión son más adversos para una nave industrial arco – columna, con ello es posible justificar la realización de mayor investigación, para poder obtener coeficientes de presión confiables y aplicables en los diseño de este tipo de estructuras.

4.3. PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN DE UNA NAVE INDUSTRIAL ARCO - COLUMNA

En este subtema se presentan las propuestas de coeficientes de presión total, obtenidos mediante pruebas de túnel de viento en una nave industrial tipo arco – columna, para los ángulo de incidencia de 0 y 90 grados, tal y como los presenta la normatividad de seguridad en díaño por viento vigente en México para estructuras similares. Destacando que el ángulo de incidencia de 0 grados fue el ángulo con los coeficientes de presión total más severos del total de pruebas realizadas sobre el modelo rugoso, por lo cual, se consideran los valores

obtenidos en sete ángulo de incidencia como base para presentar la propuesta. Cabe mencionar que se determinó el coeficiente de presión total en cada zona, con base en la magnitud más desfavorable, que en general fueron succiones. De igual manera para la propuesta de coeficientes de presión del ángulo de incidencia de 90 grados se presentarán los coeficientes más adversos de las pruebas en el modelo rugoso.

PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN TOTAL PARA LA INCIDENCIA DEL VIENTO PERPENDICULAR A LA GENERATRIZ

Los valores de los coeficientes de presión total que se muestran en la tabla siguiente son los obtenidos mediante las pruebas de túnel de viento realizadas en este trabajo, para una incidencia del viento perpendicular a las generatrices de la cubierta, estos pueden considerarse como referencia para futuras investigaciones y como base para que el ingeniero civil en la práctica pueda fundamentar un criterio propio. Estos datos se presentan en el diagrama de la Figura 67, en el cual es posible observar que los coeficientes de presión más severos se localizan en las esquinas de la cubierta y en la zona intermedia de la cumbre de la nave industrial. Cabe resaltar que esta dirección de incidencia del viento no es la más severa del total de pruebas realizadas.

Cp total, incidencia del viento perpendicular a la generatriz de la cubierta					
Zona	Cp total	Zona	Cp total	Zona	Cp total
EB	-0.86	IB	-0.22	EB	-0.86
EC	-0.68	IC	-0.84	EC	-0.68
ES	-1.20	IS	-0.75	ES	-1.20
EB : Zona Extrema en Barlovento					
EC : Zona Extrema Central					
ES : Zona Extrema en Sotavento					
IB : Zona Intermedia en Barlovento					
IC : Zona Intermedia Central					
IS : Zona Intermedia en Sotavento					

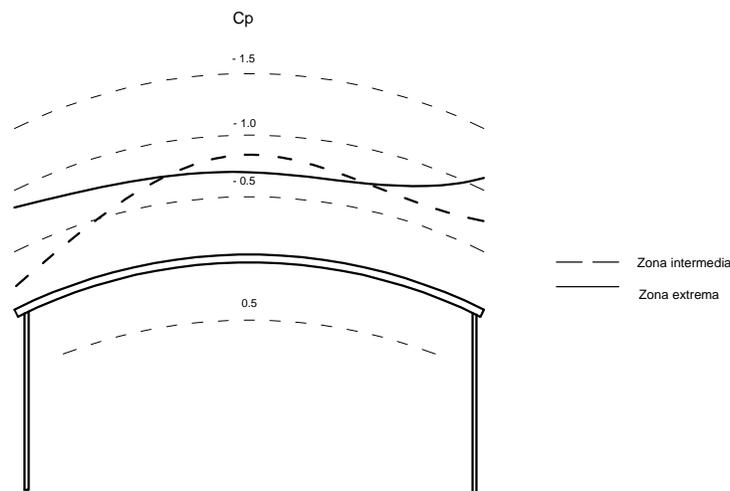


Figura 67. Coeficientes de presión propuestos para la dirección del viento perpendicular a las generatrices de la cubierta en arco

PROPUESTA DE COEFICIENTES DE PRESIÓN TOTAL PARA LA INCIDENCIA DEL VIENTO PARALELO A LA GENERATRIZ DEL VIENTO PARALELO A LA GENERATRIZ

De igual manera, se presentan los coeficientes de presión total para la incidencia del viento paralelo a las generatrices de la cubierta, resaltando que estos fueron los más desfavorables del total de pruebas realizadas, por esto, en la tabla siguiente se muestran los valores de los coeficientes de presión total que corresponden a cada una de las zonas consideradas, así como un diagrama en la Figura 68, para visualizar de manera general el comportamiento del flujo para esta incidencia del viento, en un corte transversal en las dos zonas indicadas.

Cp total, incidencia del viento paralelo a la generatriz de la cubierta					
Zona	Cp total	Zona	Cp total	Zona	Cp total
EB	-1.55	IB	-0.99	EB	-1.42
EC	-0.53	IC	-0.82	EC	-0.56
ES	-1.55	IS	-0.99	ES	-1.42
EB : Zona Extrema en Barlovento					
EC : Zona Extrema Central					
ES : Zona Extrema en Sotavento					
IB : Zona Intermedia en Barlovento					
IC : Zona Intermedia Central					
IS : Zona Intermedia en Sotavento					

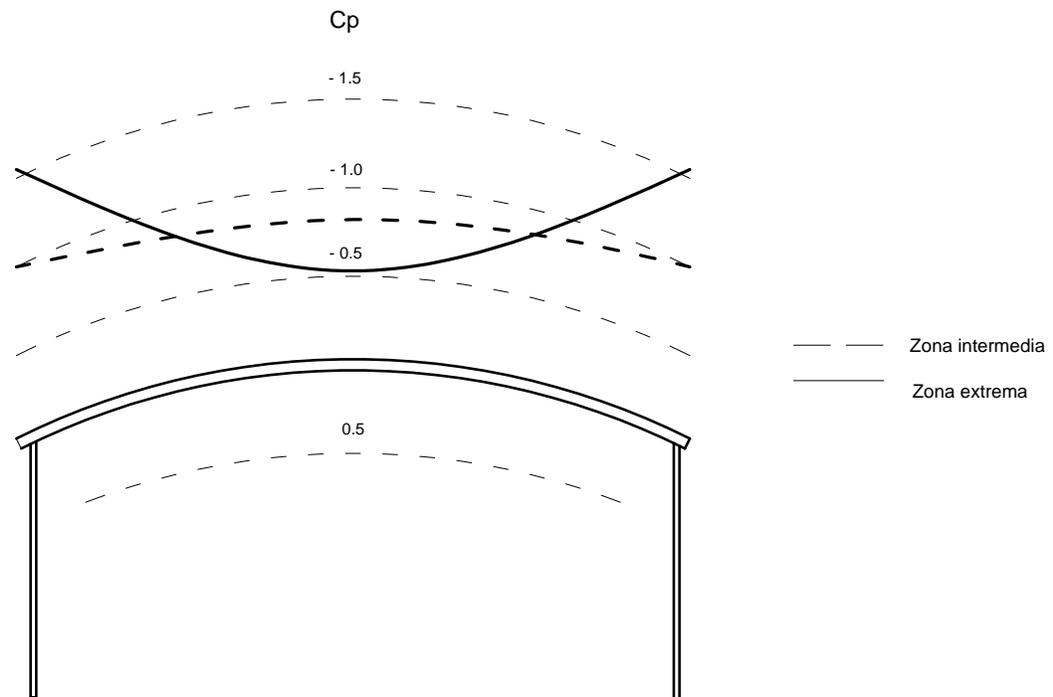


Figura 68. Coeficientes de presión propuestos para la dirección del viento paralelo a las generatrices de la cubierta en arco

RESULTADOS EXPERIMENTALES MÁS DESFAVORABLES PARA UNA NAVE INDUSTRIAL ARCO – COLUMNA

Adicionalmente a la información para las dos incidencias del viento mencionadas anteriormente, se determinaron los tres ángulos de incidencia del viento más desfavorables del total de pruebas sobre el modelo rugoso, cuyo ensayo representa con mayor semejanza el régimen del flujo en condiciones reales. Estos tres ángulos de incidencia del viento fueron 0, 30 y 50 grados con respecto al eje longitudinal de la cubierta de la nave industrial, para los que se presentan los coeficientes de presión total en la tabla siguiente.

Resultados de las pruebas de túnel de viento con los coeficientes de presión total más desfavorables					
<i>Incidencia del viento paralelo a las generatrices de la cubierta, 9.49 [m/s]</i>					
Zona	Cp total	Zona	Cp total	Zona	Cp total
EB	-1.55	IB	-0.99	EB	-1.42
EC	-0.53	IC	-0.82	EC	-0.56
ES	-1.55	IS	-0.99	ES	-1.42
<i>Incidencia del viento a 30 grados del eje longitudinal de la cubierta,, 9.49 [m/s]</i>					
EB	-1.93	IB	-0.87	EB	-1.12
EC	-1.10	IC	-0.97	EC	-0.42
ES	-1.07	IS	-0.37	ES	-1.26
<i>Incidencia del viento a 50 grados del eje longitudinal de la cubierta,, 7.60 [m/s]</i>					
EB	-1.19	IB	-0.88	EB	-0.97
EC	-1.14	IC	-0.82	EC	-0.30
ES	-0.67	IS	-1.09	ES	-0.96
EB : Zona Extrema en Barlovento					
EC : Zona Extrema Central					
ES : Zona Extrema en Sotavento					
IB : Zona Intermedia en Barlovento					
IC : Zona Intermedia Central					
IS : Zona Intermedia en Sotavento					

Estos datos pueden considerarse como base para futuras investigaciones, pero es importante destacar que son resultado de pruebas en túnel de viento basadas en características específicas, mismas que se detallan en los capítulos anteriores; es por ello que pueden diferir de otras investigaciones similares; sin embargo, la mayoría de ensayos deben ser comparables en el comportamiento del viento, como sucedió en la comparación contra los resultados obtenidos por Balbastro et al. (2005), y Natalini et al. (2001), así como la información que se presenta en las NTC – DV, GODF y en el MOC – DV, CFE.

5. CONCLUSIONES GENERALES

En general, al término de este trabajo se cumplen los objetivos generales y específicos al llevar a cabo pruebas en el túnel de viento para dos modelos de nave industrial tipo arco - columna con diferentes rugosidades en las superficies de las cubiertas, se analizaron los datos obtenidos para observar el comportamiento del viento en estas estructuras, mediante la obtención de los coeficientes de presión totales. Se realizó una comparativa de los resultados obtenidos contra la normatividad empleada en diseño por viento en México, también con investigaciones similares sobre la misma tipología de nave industrial realizadas en Argentina; de los análisis realizados se llega a la conclusión de que los resultados obtenidos son una buena representación del comportamiento del viento sobre este tipo de estructuras, así como de los resultados cuantitativos que a pesar de las diferencias que se tienen, son resultados confiables para las condiciones del flujo en las que se llevan a cabo los ensayos. Por último se propusieron los coeficientes de presión totales para las naves industriales tipo arco – columna que servirán como bases para futuras investigaciones afines, así como un criterio para el ingeniero, para cumplir con la seguridad en el diseño de estas estructuras.

A continuación se presentan las conclusiones particulares:

- Las pruebas en túnel de viento son la opción más confiable para la obtención de coeficientes de presión sobre las estructuras, sin embargo, deben considerarse todos los parámetros que engloba los ensayos, como lo es el efecto de bloqueo, el escalamiento de las pruebas y la correcta elaboración de los modelos, esto con la intención de obtener resultados confiables aplicables a la realidad.
- Se concluye que las pruebas en túnel de viento tienen costos económicos y de tiempo comparables con otras alternativas que existen actualmente aplicadas con la misma finalidad, como es la Mecánica de Fluidos Computacional.
- En la comparativa que se realiza con la normativa de seguridad para diseño por viento vigente en México (NTC – DV y MOC – DV), se aprecia que los cambios en la magnitud de los coeficientes de presión son grandes en comparación con los propuestos para naves industriales con paredes perimetrales, por ello se justifica realizar mayor investigación en este tema.
- Se llega a la conclusión de que los coeficientes de presión son más adversos con fuerzas de mayor succión, al considerar la interacción de fuerzas internas y externas actuando sobre una cubierta curva.
- Se corrobora el comportamiento del viento sobre estas estructuras, que reporta la bibliografía con base en observaciones de los daños ante vientos de grandes velocidades, donde los diferenciales de presión máxima se encuentran en las esquinas de la cubierta y en

zonas perimetrales, así como un cambio en el desprendimiento de la corriente con base en el número de Reynolds.

- Los resultados obtenidos pueden considerarse válidos, ya que son lógicos con el comportamiento que se reporta en investigaciones sobre la misma tipología de naves industriales realizada por Natalini et al. (2001), y Balbastro et al. (2005), sin embargo, es un tema para el cual puede desarrollarse mayor investigación, con el objetivo de presentar coeficientes de presión para el diseño por viento de estas estructuras en particular en las normas de seguridad estructural en México.

- La propuesta de los coeficientes de presión son un ejemplo representativo del comportamiento del viento sobre una nave industrial arco – columna con geometría determinada y en condiciones específicas, los cuales sirven como base para realizar futura investigaciones, así como para referenciar el efecto que tienen la combinación de presiones internas y externas en la cubierta de las estructuras de este tipo, y que el ingeniero civil en la práctica tenga más argumentos para fundamentar su criterio.

5.1.OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Al ser un estudio experimental es posible hacer numerosas observación y recomendaciones, es por ello que a continuación se mencionaran detalladamente algunas de las más importantes. Con respecto a los conocimientos previos necesarios para entender el comportamiento del viento sobre las estructuras civiles debe profundizarse, ya que es un tema del cual existe mucha información realizada en diferentes países, en los cuales las variables que intervienen en el estudios son diferentes, así que conociendo la teoría y las investigaciones recientes es posible avanzar en el conocimiento y con ello obtener resultados más confiables aplicables a la realidad en el país; en particular en México es posible decir que es un tema relativamente nuevo, donde aún existe un largo camino por recorrer en las investigaciones afines a efectos del viento sobre las estructuras, sin embargo, con el interés de los estudiantes e investigadores algún día se podrá tener un amplio conocimiento en este tema, comparable con el de otros países desarrollados. Se enfatiza en conocer las variables que intervienen en el estudio, ya que al momento de realizar una prueba en túnel de viento debe conocerse cada aspecto que interviene, desde el funcionamiento del túnel de viento y los elementos que lo componen; los instrumentos que se emplean, tales como la rugosidad en el túnel de viento y los instrumentos para generar turbulencia; así como las escalas de las pruebas y el efecto de bloqueo entre otras cosas. Por otro lado es importante enfatizar en que para realizar este trabajo se requirió de habilidades extras por parte del analista, para construir los modelos de las naves industriales, en cuanto a la metodología de instrumentación, la aplicación de materiales disponibles como papel lija y cartón comprimido para la cubierta; en otro aspecto, se recomienda ser precavidos en la elaboración de los modelos, ya que la mala colocación o fijación de las sondas, así como el ingreso de partículas al interior de las mismas pueden originar malas lecturas. En

conclusión se recomienda ser muy precavidos en la fabricación e instrumentación de los modelos.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos mediante pruebas de túnel de viento se recomienda revisar las lecturas de manera general durante la realización de la prueba, también, al final de cada una de ellas, ya que es muy común obtener lecturas erróneas motivo de un posible error en la calibración del software usado para la lectura de datos en el transductor de presión. Por otra parte, se recomienda ampliamente conocer alguna herramienta de cómputo con la cual puedan tratarse los datos de manera más eficiente, ya que la conversión de extensiones en los diferentes archivos generados por el software en túnel de viento, las extensiones necesarias para realizar la revisión de lecturas, así como para realizar los contornos de presión, pueden llevar a errores humanos que afectan directamente en la interpretación de los resultados.

En general se recomienda realizar mayor investigación de los efectos del viento sobre las naves industriales arco – columna, para poder determinar coeficientes de presión totales que sirvan como referencia para el ingeniero civil en la práctica, y con ello cumplir con los objetivos de la ingeniería civil en una estructura, tal y como se hace actualmente con los coeficientes de presión propuestos para diferentes geometrías de naves industriales en el MOC – DV, CFE y en las NTC – DV, GODF.

REFERENCIAS

- [1] Pope A. and Kenneth L., 1965, *High-Speed Wind Tunnel Testing*, New México, John Wiley & Soons, Inc.
- [2] Justin D. Pereira, 2011, *Wind tunnels, Aerodynamics, Models and Experiments*, New York, Nova Science Publishers, Inc.
- [3] Pope A. and Harper J., 1965, *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, New México, John Wiley & Soons, Inc.
- [4] Ali Rotondo, Amanda Sayed, *Wind Tunnels*, 2003.
- [5] S. Brusca, R. Lanzafame and M. Messina*, 2011, *Low-speed Wind tunnel: Design and Build*, Catania – Italy, Nova Science Publishers, Inc.
- [6] Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2001, *Diagnostico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*, México, CENAPRED.
- [7] Alfredo Arnedo Pena, 2016, *Naves industriales con Acero*, Montevideo, SENER (www.sener.es).
- [8] Edmundo Amaya Gallardo, 2015, *Tesis de Maestría en Ingeniería: Estudio de los efectos del viento en naves industriales con cubierta de dos aguas con mecánica de fluidos computacional*, México D.F., UNAM.
- [9] John D. Holmes, 2007, *Wind Loading Structures -Second Edition*, New York U.S.A., Taylor & Francis e-library.
- [10] Scanivalve, 20016, *Scanivalve Application Note 8: Wind Engineering and Bluff Body Pressure Measuring Solutions*, Madson St. Liberty Lake.
- [11] N J Cook, 1990, *The designer´s guide to wind loading of building structures*, London.
- [12] Gustavo C. Balbastro y Victorio Sonzogni, 2005 , *Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas*, Santa Fe Argentina.
- [13] N. HÖslcher y J. Niemann, 1990, *A review of recent experiments on the flow past circular cylinders*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 33 (1990) 197–209.

- [14] Gustavo C. Balbastro, Victorio E. Sonzogni, Gerardo Franck, Mario Storti, 2004, *Acción del viento obre cubierta abovedadas aisladas: Simulación numérica*, Bariloche, Argentina.
- [15] Peter Moonen, Bert Blockena, Staf Roelsa, Jan Carmeliet, 2006, *Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 (2006) 699–723.
- [16] Ramón Argüelles Álvarez, 1983, *La estructura metálica de hoy*, Madrid España.
- [17] A. Pozos E., G. Martínez R y Lima I. F., *Temas selectos de Estructuras: Ingeniería de viento, Apuntes del semestre 2017 – 2*, IINGEN UNAM.
- [18] Thomas L. Smith y James R. McDonald, 1990, *Roof wind damage mitigation: Lessons from Hugo*, American Society of Civil Engineers. The fórum., Charleston S.C.
- [19] Natalini M. et al., 2001, *Wind tunnel modelling of mean preassures on curved canopy roofs*, American Conference on wind Engineering, Clemson.
- [20] A. Pozos Estrada et al., 2015, *El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California*, Series de investigación del IINGEN, UNAM.
- [21] Hee-Chang Lim, Kenji Tsukamoto, Masaaki Ohba, y Kunio Mizutani, 2014, *Study on the surface pressure distribution of cubes in cross - wind arrays*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 133(2014)18–26.
- [22] Roofing Industry Committee on Weather Issues, Inc., *Hurricane Katrina Investigation Report*, Georgia, 2007.
- [23] Y. Tamura y Y. Kareem, 2013, *Advanced Structural Wind Engineering*, Ed. Springer, Japón.
- [24] E. Simiu y H. Scanlan, 1996, *Wind effects on Structures*, Tercera Edición, John Wiley & Sons, Inc, Canada.
- [25] A. Abraham, Nagesh R. Iyer, et al., 2013, *Wind loads on curved roofs: Efect of side walls*, Chennai, India.
- [26] Frank White, 2008, *Mecánica de Fluidos*, Sexta Edición, S.A. McGraw-Hill/ Interamericana de España, España.
- [27] Gaceta Oficial del Distrito Federal, Octubre de 2004, *Normas Tecnicas Complementarias para Diseño por Viento*, Distrito Federal, México.
- [28] Comisión Federal de Electricidad, CFE, 2008, *Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Viento (MOC – DV)*, México.

[29] Norberg, C., 1994, *An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio*, Journal of Fluid Mechanics 258, 287–316.

[30] Ryan Merrick y Girma Bitsuamlak, *Control of flow around a circular cylinder by the use of surface roughness: A computational and experimental approach*, Miami Florida, Estados Unidos.

[31] Guido Buresti, 1981, *The efecto of surface rpughness on the flow regime around circular cylinders*, Institute of Aeronautics, Univerity of Pisa, Italy.

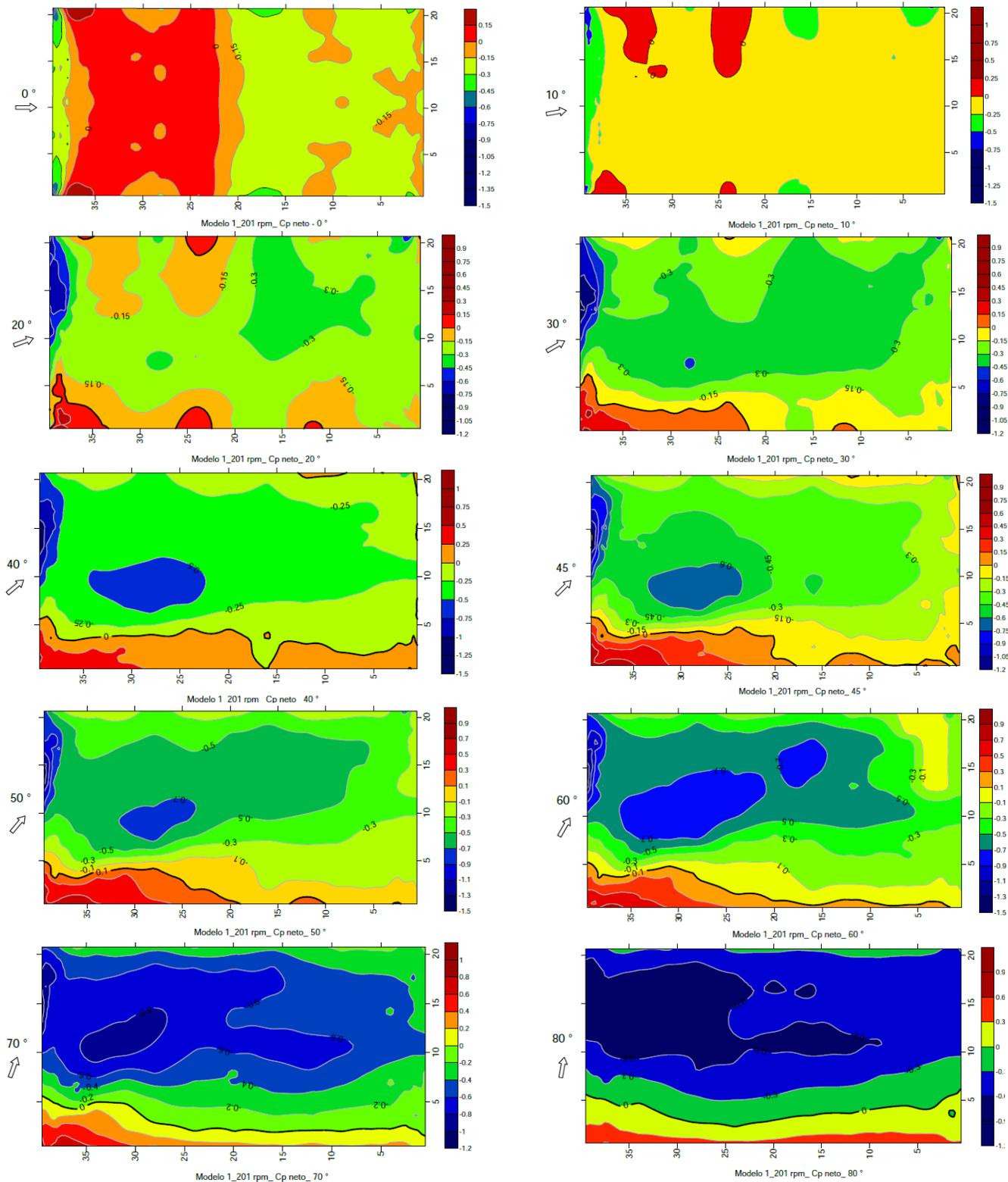
SITIOS WEB

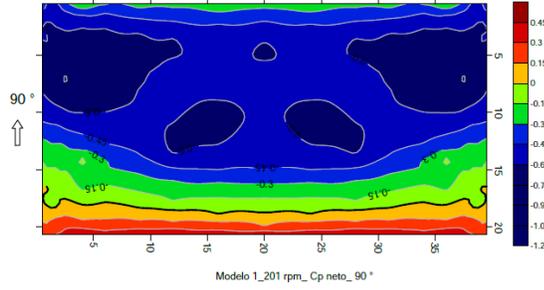
<http://scanivalve.com/applications/wind-tunnel-test/>

<http://scanivalve.com/products/pressure-measurement/miniature-analog-pressure-scanners/zoc22b-miniature-pressure-scanner/>

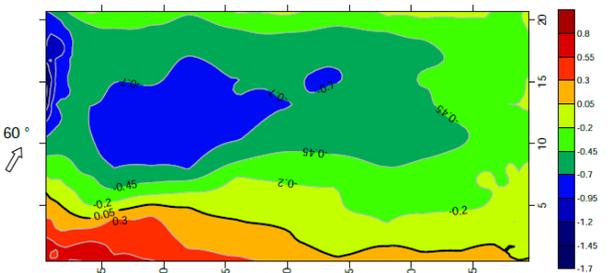
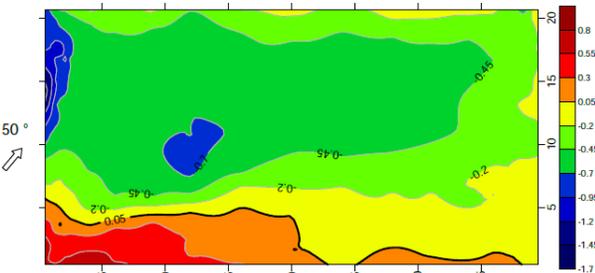
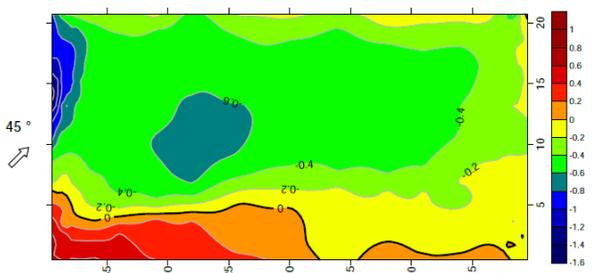
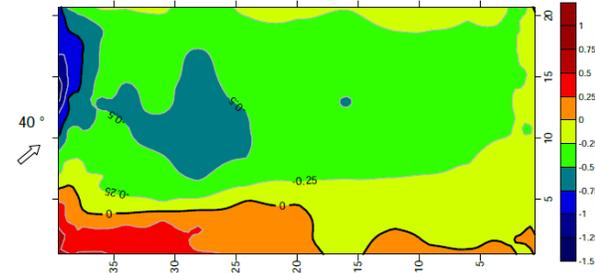
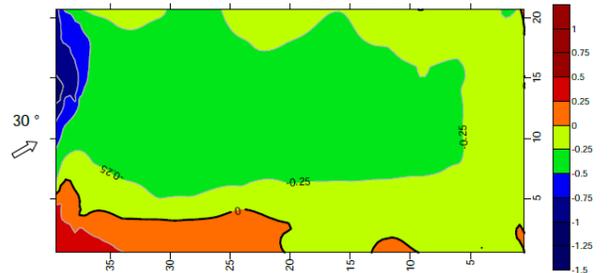
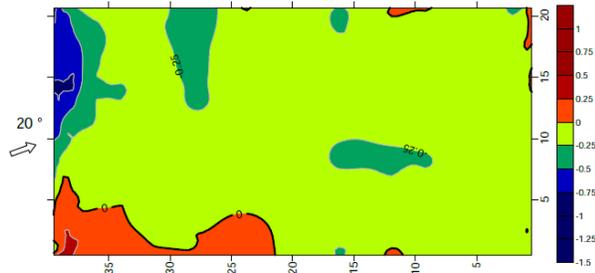
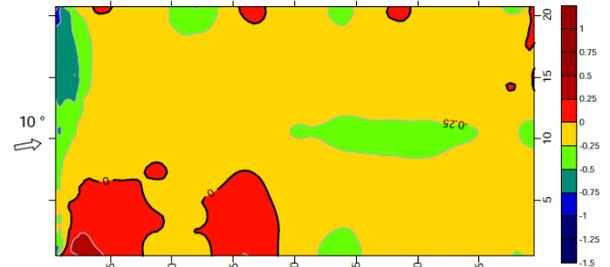
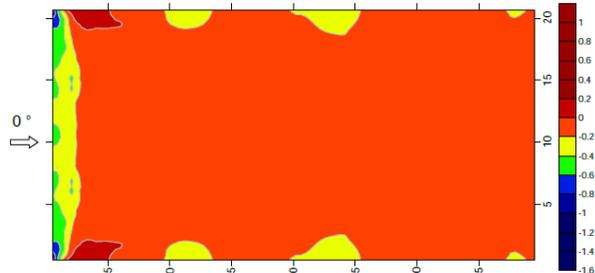
<https://www.aa.washington.edu/AERL/KWT/techguide/pressure>

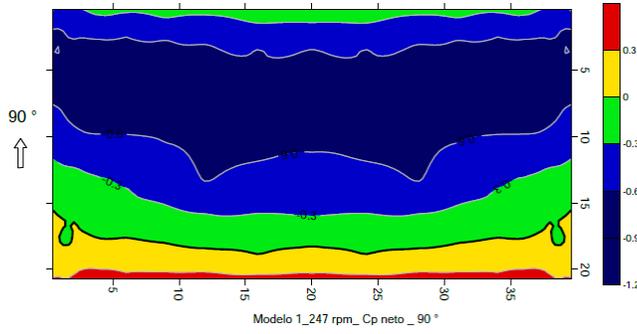
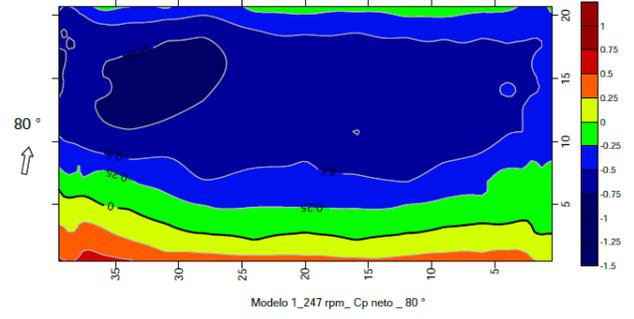
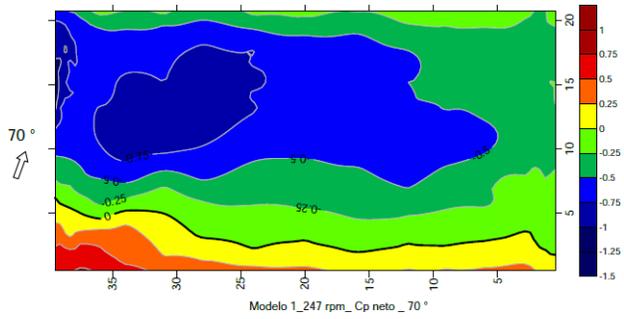
Modelo liso a 7.6 [m/s]



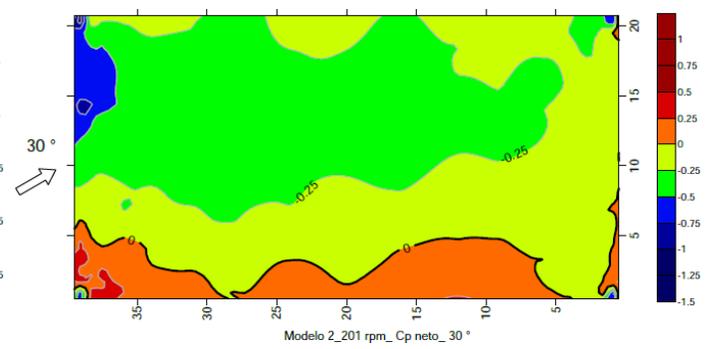
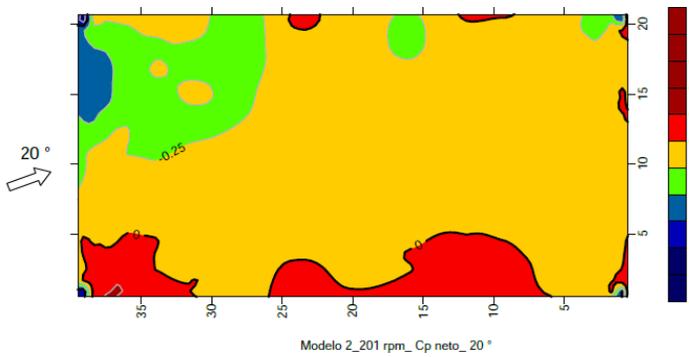
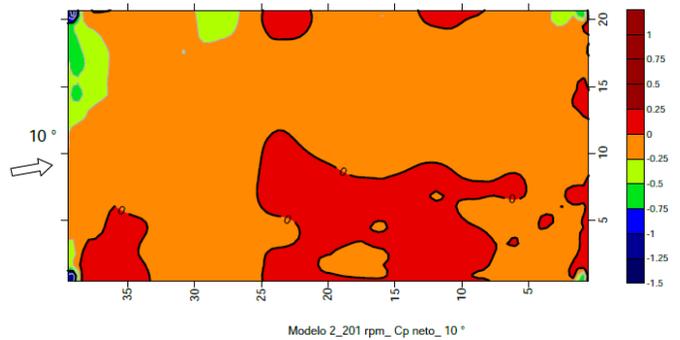
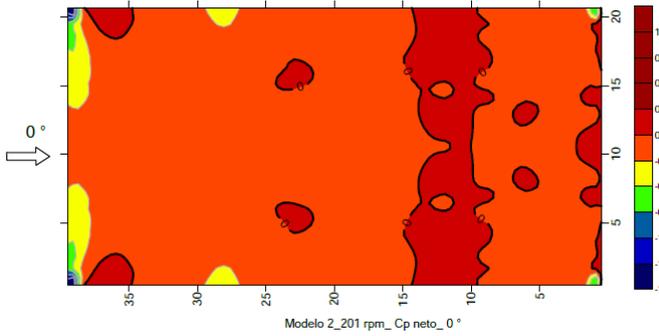


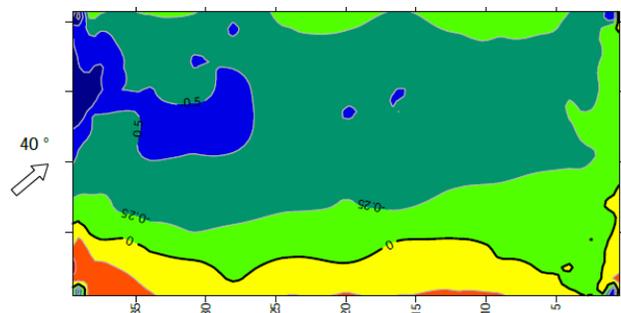
Modelo liso a 9.49 [m/s]



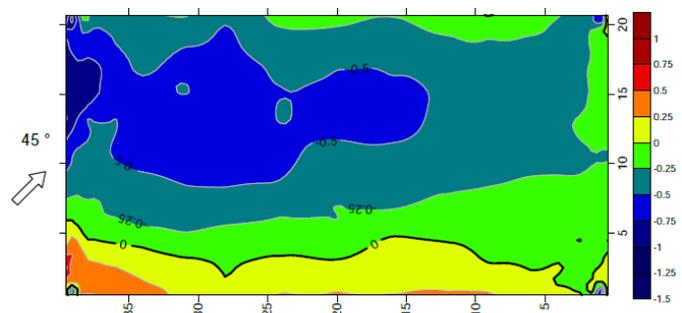


Modelo rugoso a 7.6 [m/s]

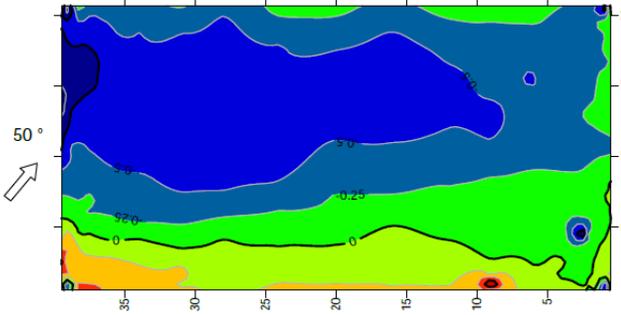




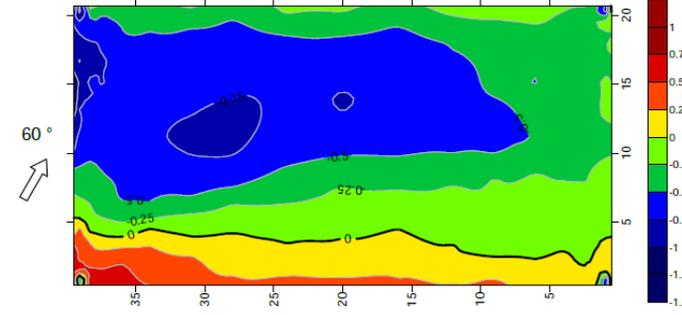
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_40 °



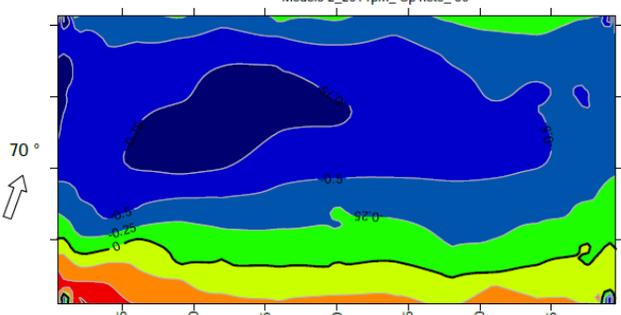
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_45 °



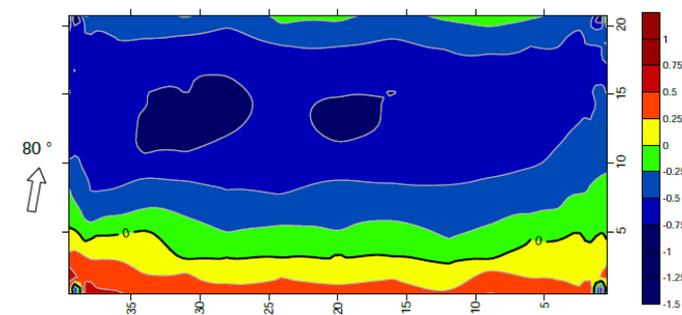
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_50 °



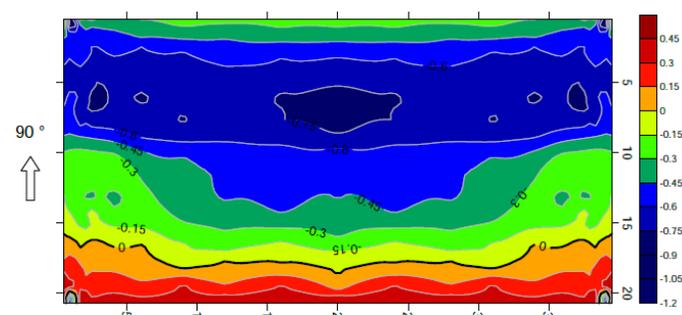
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_60 °



Modelo 2_201 rpm_Cp neto_70 °

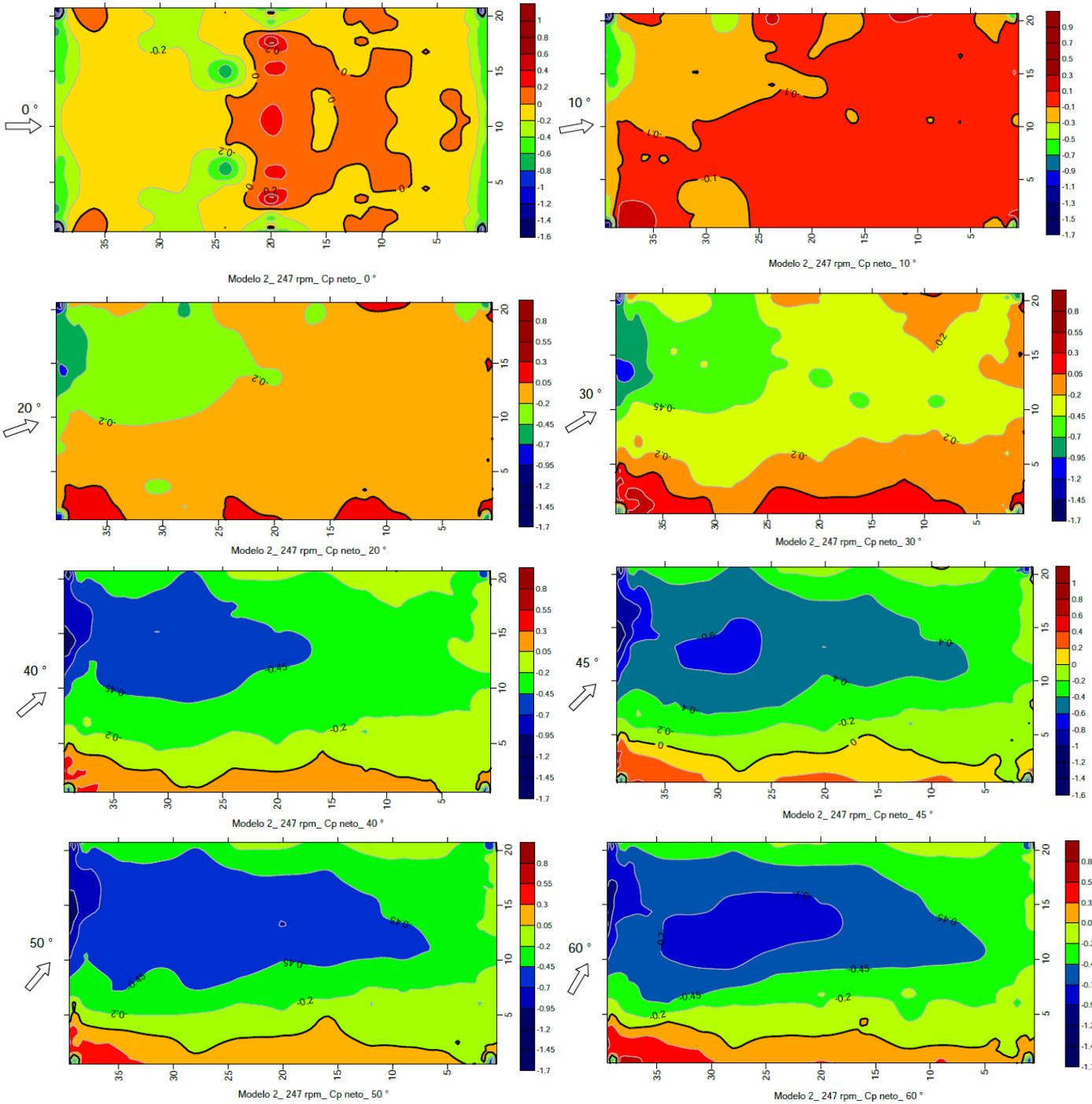


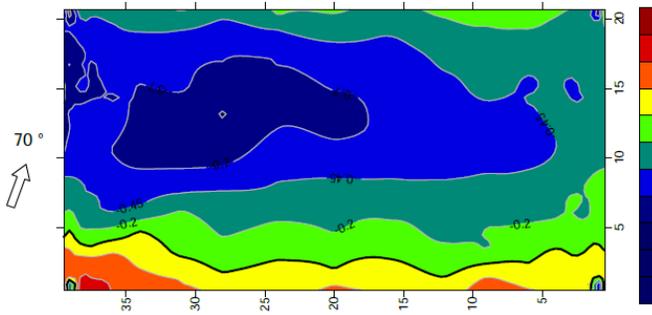
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_80 °



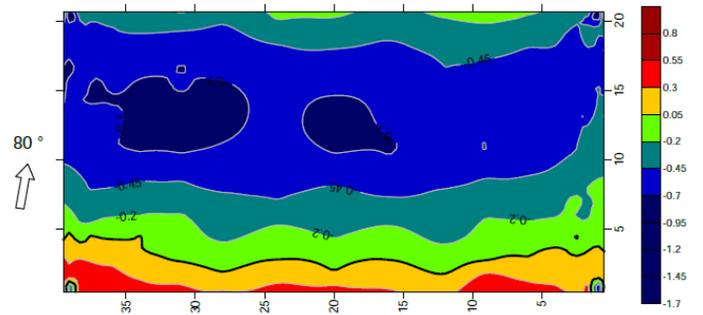
Modelo 2_201 rpm_Cp neto_90 °

Modelo rugoso a 9.49 [m/s]

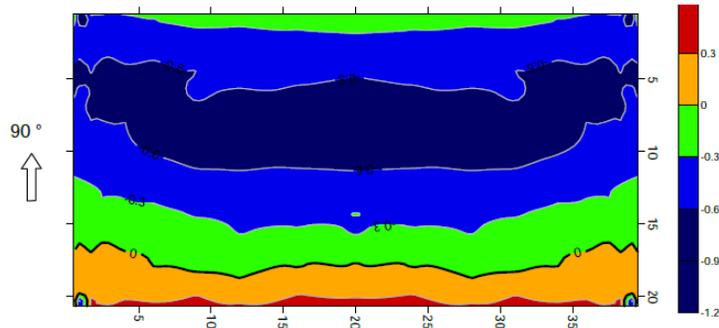




Modelo 2_247 rpm_Cp neto_70 °



Modelo 2_247 rpm_Cp neto_80 °



Modelo 2_247 rpm_Cp neto_90 °