



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio de los efectos del viento en edificio  
irregular de gran altura con pruebas  
experimentales en túnel de viento**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Sergio Rafael Ortiz Blancarte

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Roberto Gómez Martínez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/053/18

Señor  
SERGIO RAFAEL ORTIZ BLANCARTE  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL VIENTO EN EDIFICIO IRREGULAR DE GRAN ALTURA CON PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS
- IV. METODOLOGÍA
- V. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 6 de junio del 2018.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

## DEDICATORIA

El presenta trabajo lo dedico a mis papás: María del Socorro Blancarte Pacheco y Rafael Ortiz Aguilar, ellos me han brindado todo su apoyo y amor a lo largo de mi vida, y me han impulsado a mejorar en todos los ámbitos. Por ustedes pude desarrollar este trabajo. Muchas gracias por todo.

## AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por siempre impulsarme a mejorar y darme siempre todo su cariño y apoyo.

A mi hermana, por siempre estar a mi lado y apoyarme cuando lo he necesitado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que me ha brindado para mi desarrollo personal y académico desde que entré a la ENP 2.

A la Facultad de Ingeniería y a los profesores que la integran, por todo el conocimiento que me han aportado en estos años.

Al Instituto de Ingeniería, por todas las oportunidades que me ha brindado para participar en proyectos de investigación y complementar mi formación académica.

Al Dr. Roberto Gómez, por sus enseñanzas, tiempo y apoyo dedicado para la realización de esta investigación.

A mis sinodales por sus valiosos comentarios y aportaciones que contribuyeron para el desarrollo del presente trabajo.

Al Maestro Isaac Lima y al equipo del túnel de viento por su ayuda durante la realización de las pruebas y sus comentarios para el enriquecimiento de este trabajo.

A mis amigos, quienes siempre me han apoyado y han sido compañeros invaluable en diferentes etapas de mi vida. Mención especial para Gerardo, Fabiola, Karen, Alejandro y Janett.

# ÍNDICE

---

<b>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>NOTACIÓN .....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
1.1.    VIENTO.....	5
1.2.    EFECTOS DEL VIENTO EN EDIFICIOS ALTOS .....	6
1.2.1. <i>HURACÁN ODILE</i> .....	6
1.2.2. <i>HURACÁN KATRINA</i> .....	8
1.2.3. <i>HURACÁN WILMA</i> .....	10
1.3.    OBJETIVOS.....	11
1.3.1. <i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	11
1.3.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	11
1.4.    JUSTIFICACIÓN .....	12
1.5.    ALCANCES DE LA TESIS.....	12
1.6.    CONCLUSIONES.....	13
1.7.    DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 1 .....	13
1.8.    DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 2 .....	13
1.9.    DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 3 .....	14
1.10.    DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 4 .....	14
1.11.    DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 5 .....	14
1.12.    FORMATO DE TESIS .....	14
1.13.    REFERENCIAS.....	15
<b>CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS .....</b>	<b>17</b>
2.1.    NORMATIVIDAD EN MATERIA DE VIENTO APLICABLE A EDIFICIOS ALTOS .....	17
2.1.1. <i>MANUAL DE OBRAS CIVILES: DISEÑO POR VIENTO</i> .....	17
2.1.2. <i>ASCE: SECCIÓN 6.0 CARGAS POR VIENTO</i> .....	20
2.2.    TÚNEL DE VIENTO.....	21
2.2.1. <i>TIPOS DE TÚNEL DE VIENTO</i> .....	21
2.3.    PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO.....	23
2.3.1. <i>EDIFICIO CON FORMA EN “L”</i> .....	23

2.3.2.	<i>EDIFICIO CUADRADO CON ESQUINAS BISELADAS</i> .....	25
2.4.	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	27
2.5.	CONCLUSIONES.....	27
2.6.	REFERENCIAS.....	28
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</b>		<b>30</b>
3.1.	TÚNEL DE CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA DE LA UNAM .....	30
3.1.1.	<i>VENTILADOR</i> .....	30
3.1.2.	<i>DIFUSOR</i> .....	30
3.1.3.	<i>ALABES GUÍA</i> .....	31
3.1.4.	<i>CÁMARA DE ESTABILIZACIÓN DEL FLUJO</i> .....	31
3.1.5.	<i>CONO DE CONTRACCIÓN</i> .....	31
3.1.6.	<i>SECCIÓN DE PRUEBAS</i> .....	32
3.2.	MODELO RÍGIDO .....	33
3.2.1.	<i>DESCRIPCIÓN DEL MODELO</i> .....	33
3.2.2.	<i>CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN</i> .....	33
3.3.	PARÁMETROS DE LA PRUEBA .....	35
3.3.1.	<i>VELOCIDAD DE DISEÑO</i> .....	35
3.3.2.	<i>TIEMPO DE MUESTREO</i> .....	36
3.3.3.	<i>ÁNGULOS DE ANÁLISIS</i> .....	36
3.3.4.	<i>RUGOSIDADES</i> .....	37
3.4.	ESCALAS DE SIMILITUD .....	37
3.4.1.	<i>SIMILITUD DINÁMICA</i> .....	37
3.4.2.	<i>SIMILITUD CINÉTICA</i> .....	39
3.4.3.	<i>SIMILITUD GEOMÉTRICA</i> .....	39
3.5.	PROCEDIMIENTO REALIZADO EN PRUEBA EXPERIMENTAL .....	40
3.5.1.	<i>TUBO PITOT</i> .....	40
3.5.2.	<i>INSTRUMENTACIÓN DE PRUEBA</i> .....	40
3.5.3.	<i>REGISTRO DE DATOS</i> .....	41
3.5.4.	<i>PROCESO DE DATOS</i> .....	42
3.5.5.	<i>CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PRESIÓN</i> .....	43
3.6.	CONCLUSIONES.....	43
3.7.	REFERENCIAS.....	44

<b>CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO .....</b>	<b>46</b>
4.1. RESULTADOS .....	46
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	50
4.2.1. <i>CENTRO DE TORSIÓN</i> .....	58
4.3. REFERENCIAS.....	60
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
5.1. RECOMENDACIONES .....	63
<b>ANEXO A. MACRO PARA EL CÁLCULO DE CP.....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

---

Figura I.1 Huracán Kenna en 2002 y daños a infraestructura (Jiménez, J., 2007)	2
Figura 1.1 Daño en fachada de edificio de departamentos (Muria, et. al., 2015)	7
Figura 1.2 Daño en fachada de hotel (a) y edificio de condominios (b) (Muria, et. al., 2015)	8
Figura 1.3 Daños en Hotel Hyatt (Mosqueda, G. y Porter, K., 2007)	9
Figura 1.4 Daños en fachada de la Torre Dominion (Mosqueda, G. y Porter, K., 2007)	9
Figura 1.5 Fachada principal y daños en Hotel Riu Cancún (Ramírez, J., 2007 y Alva, O., 2015)	10
Figura 1.6 Daños en Hotel Park Royal Pirámides (Ramírez, J., 2007 y Alva, O., 2015)	11
Tabla 2.1 Coeficientes de presión exterior propuestos por el MOC (MOC – DV, 2008)	19
Figura 2.1 Representación de edificio alto con planta rectangular cerrada (MOC – DV, 2008)	19
Tabla 2.2 Coeficientes de presión exterior propuestos por ASCE (ASCE, 2010)	20
Figura 2.2 Túnel de circuito abierto (Aerolab, 2018 y Terrés, J., 2014)	22
Figura 2.3 Túnel de circuito cerrado (Aerolab, 2018)	22
Figura 2.4 Geometría del modelo: Edificio con forma en “L” (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)	23
Figura 2.5 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 0° (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)	24
Figura 2.6 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30° (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)	24
Figura 2.7 Geometría del modelo: Edificio cuadrado con esquinas biseladas (Kumar, N., 2011)	25
Figura 2.8 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 0° (Kumar, N., 2011)	26
Figura 2.9 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 45° (Kumar, N., 2011)	26
Figura 3.1 Vista exterior del ventilador de flujo axial del túnel de viento del IINGEN	30
Figura 3.2 Vista exterior del cono de contracción y zona de pruebas No.1	31
Figura 3.3 Plano en planta del túnel de viento (II UNAM)	32
Figura 3.4 Modelo rígido	33
Figura 3.5 Localización de sensores en paredes del modelo	34
Figura 3.6 Instrumentación en cubierta del modelo	34

Figura 3.7 Instrumentación en paredes del modelo	35
Figura 3.8 Ángulos de análisis	36
Figura 3.9 Rugosidades para simulación de categoría de terreno 2	37
Figura 3.10 Esquema de un tubo Pitot (Benson, T., s.a.)	40
Figura 3.11 Instrumentación de prueba	41
Figura 4.1 Relación de coeficientes presión con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 2, b) Sensor 6, c) Sensor 10, d) Sensor 14	46
Figura 4.2 Relación de coeficientes presiones con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 18, b) Sensor 22, c) Sensor 26, d) Sensor 30, e) Sensor 34, f) Sensor 38, g) Sensor 42, h) Sensor 46	47
Figura 4.3 Relación de coeficientes presiones con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 50, b) Sensor 54, c) Sensor 57, d) Sensor 60, e) Sensor 61, f) Sensor 63	48
Tabla 4.1 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30°	49
Tabla 4.2 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°	49
Tabla 4.3 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°	50
Figura 4.4 Promedio de coeficientes de presión por incidencia de viento	51
Figura 4.5 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30°; Sin rugosidades, Tr = 200 años	52
Figura 4.6 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30°; Con rugosidades, Tr = 200 años	53
Figura 4.7 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°; Sin rugosidades, Tr = 200 años	54
Figura 4.8 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°; Con rugosidades, Tr = 200 años	55
Figura 4.9 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°; Sin rugosidades, Tr = 200 años	56
Figura 4.10 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°; Con rugosidades, Tr = 200 años	57
Tabla 4.4 Excentricidad	58
Figura 4.11 Esquema de fuerza resultante y excentricidad	59

## NOTACIÓN

---

$A_m$	Área de sección transversal del modelo.
$A_{ref}$	Área de referencia sobre la que actúa la presión generada por el viento, medida en $m^2$
$A_t$	Área de sección transversal de la sección de pruebas.
$A_z$	Área de la estructura, a la altura $z$ , sobre la que actúa la presión de diseño, medida en $m^2$ .
$b$	Dimensión horizontal de la construcción con planta rectangular, perpendicular al flujo del viento, medida en m.
$C/R$	Prueba realizada con rugosidades.
$C_p$	Coefficiente de presión, adimensional.
$C_{pe}$	Coefficiente de presión exterior, adimensional.
$d$	Dimensión paralela de la construcción con planta rectangular, perpendicular al flujo del viento, medida en m.
$D$	Dimensión mínima de la base de la estructura, medida en m.
$F_{AD}$	Factor de Amplificación Dinámica.
$F_{es}$	Fuerza estática incidente sobre la estructura producto de la acción del viento.
$Fr$	Número de Froude.
$g$	Gravedad, en $m/s^2$ .
$\bar{h}$	Altura promedio del techo de la edificación, medida en m.
$H$	Altura de la construcción desde el nivel del terreno natural, medida en m.
$K_A$	Factor de reducción de presión por tamaño de área, adimensional.
$K_L$	Factor de presión local, adimensional.
$l$	Parámetro de longitud, medido en m.

$l_e$	Escala geométrica.
$l_m$	Parámetro de longitud del modelo, en m.
$l_p$	Parámetro de longitud del prototipo, en m.
$MB$	Muro de barlovento.
$ML$	Muro lateral.
$MS$	Muro de sotavento.
$P_{din}$	Presión dinámica registrada experimentalmente en tubo Pitot, medida en Pa.
$p_e$	Presión que actúa en la superficie exterior de la estructura, medido en Pa.
$P_{est}$	Presión estática registrada experimentalmente en tubo Pitot, medida en Pa.
$P_{tap}$	Presión registrada experimentalmente en el tap correspondiente, medida en Pa.
$p_z$	Presión de diseño a la altura $z$ , en Pa.
$q_z$	Presión dinámica de base a una altura $z$ sobre el nivel del terreno, medida en Pa.
Re	Número de Reynolds.
$S / R$	Prueba realizada sin rugosidades.
$tap$	Toma de presión.
$Tr$	Tiempo de retorno.
$U$	Velocidad del viento, medido en m/s.

### **SIMBOLOS GRIEGOS**

$\theta$	Dirección del viento, medido en °.
$\gamma$	Inclinación del techo, medido en °.
$\nu$	Viscosidad cinemática, en $\text{cm}^2/\text{s}$ .



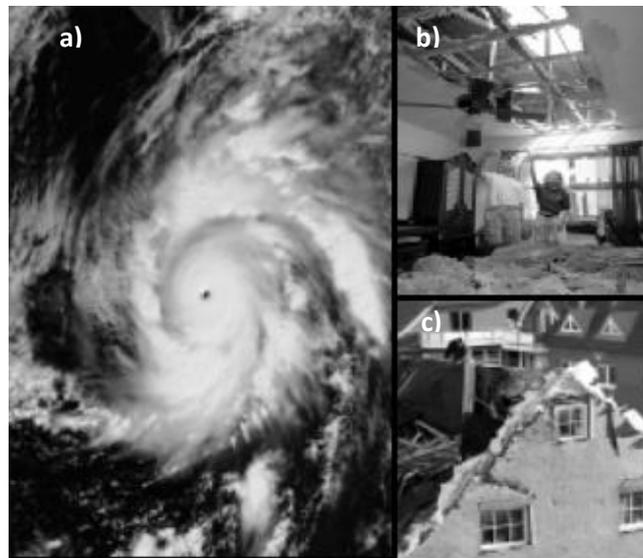
# INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

---

En México se consideran principalmente dos fenómenos naturales que afectan a la seguridad estructural: el sismo y el viento. El sismo ha tenido grandes avances en la investigación con el fin de disminuir las grandes pérdidas humanas y económicas que han ocasionado eventos recientes en la historia del país, aunado a la información recopilada por la alta actividad sísmica en el territorio nacional; sin embargo, los avances en la ingeniería de viento han tenido un crecimiento más lento por falta de apoyo y herramientas necesarias.

Las costas de México son muy vulnerables durante gran parte del año a fenómenos meteorológicos (**Figura I.1.a**) capaces de producir intensidades de viento considerables que provocan pérdidas humanas y económicas a través de daños a la infraestructura y servicios (**Figura I.1.b** y **Figura I.1.c**). Por esta razón la importancia de impulsar la investigación en materia de ingeniería de viento en el país.



**Figura I.1 Huracán Kenna en 2002 y daños a infraestructura (Jiménez, J., 2007)**

La ingeniería de viento permite estudiar el desempeño de diferentes estructuras ante las acciones de eventos meteorológicos con el fin de realizar un diseño que cumpla con condiciones de seguridad aceptables. Las estructuras más sensibles suelen ser aquellas que son ligeras y/o esbeltas como las naves industriales, antenas, torres, techumbres y velarias.

El viento se define como el movimiento de masas de aire provocado por las diferencias de energía entre estas. Al incidir sobre una estructura generan fuerzas resultantes que suponen incrementos en los esfuerzos de los elementos estructurales y no estructurales. Para asegurar que la estructura cumpla con los requisitos mínimos de seguridad se realizan análisis teóricos basados en normas y códigos; asimismo, se realizan análisis experimentales o computacionales que prueban a escala el desempeño de la estructura ante acciones del viento previstas durante su vida útil con un mayor grado de detalle.

El efecto en edificios no suele estudiarse a profundidad en el país dado que en zonas sísmicas el sismo tiene mayor repercusión en los elementos estructurales; desafortunadamente, en zonas no sísmicas donde la acción del viento rige, no siempre se dispone de información completa para su diseño. No obstante, el viento tiene la capacidad de generar situaciones que ponen en riesgo las condiciones de estabilidad, aunado al daño económico provocado en elementos de fachadas y principalmente en los contenidos. Ante situaciones de irregularidad, los edificios presentan distribuciones de presión fuera de lo común que pueden contribuir a situaciones de riesgo en la estructura.

Por lo mencionado anteriormente, en la presente tesis se evaluará el efecto del viento en un edificio irregular alto ante diferentes condiciones de análisis. El análisis se realizará con pruebas en el túnel de viento del Instituto de Ingeniería (IINGEN) de la UNAM.

An aerial photograph of a river with turbulent, white-water rapids. A concrete dam structure is visible in the upper left quadrant, with water cascading over it. The surrounding landscape is hilly and green. The text 'CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES' is overlaid in the center of the image.

**CAPÍTULO 1.  
ANTECEDENTES**

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

### 1.1. VIENTO

El aire es una mezcla de gases que conforman la atmósfera terrestre. Por su naturaleza gaseosa tiene una nula resistencia interna a la fuerza cortante, por lo que por medio de alguna perturbación es fácil lograr su movimiento para alcanzar estabilidad. La principal causa del viento son las diferencias en la temperatura dado que esto provoca la alteración del nivel de energía de las partículas, teniendo de esta forma zonas de baja y alta presión; el movimiento de las masas de aire se presenta en trayectorias de las zonas de alta presión hacia zonas de baja presión (Kolousek, V., 1984).

La topografía tiene influencia en la trayectoria y magnitud del viento cuando se presenta a altitudes cercanas al terreno natural, esta zona recibe el nombre de capa límite atmosférica y es en la cual se encuentran construidas la mayoría de las estructuras civiles y por lo mismo es la zona de estudio de la presente tesis.

El viento puede clasificarse en una escala que está en función de dos variables principales: espacio y tiempo, las cuales están intrínsecamente relacionadas dado que mientras más grande sea el área de influencia donde se presenta el fenómeno meteorológico entonces más tiempo durará. De acuerdo con Villarubia, M. (2012) las escalas de viento son:

- Global
- Sinóptica
- Mesoescala
- Microescala

El viento a escala global es producto del calentamiento de la superficie terrestre por el sol. Dado que la superficie del planeta es irregular y además éste se encuentra inclinado con respecto a su órbita, esto provoca que el calentamiento no ocurra de manera uniforme, presentándose de esta forma un campo de presiones que pone en movimiento grandes masas de aire en la tropósfera, con duración de uno a varios años. Aunado a esto se incorpora el efecto de la gravedad, la compresión y expansión del aire, la evaporación y condensación del

agua derivado del ciclo hidrológico y la rotación de la tierra, la cual da como resultado el efecto Coriolis.

A escala sinóptica los fenómenos meteorológicos tienen longitudes que abarcan de cientos a miles de kilómetros con duraciones de días a incluso meses. Los eventos pertenecientes a esta escala dentro de la capa límite atmosférica son en los que se enfoca esta tesis debido a que son los que presentan efectos más destructivos en la infraestructura costera, particularmente para este caso en edificios altos. Fenómenos meteorológicos de esta escala son los ciclones, anticiclones y frentes.

En la Mesoescala la duración puede variar entre horas a un par de días, cubriendo extensiones del orden de cientos de kilómetros; ejemplos de esta clasificación son los tornados y tormentas. En la Microescala los eventos duran tan solo minutos, teniendo una extensión de 1 km o menos.

### 1.2. EFECTOS DEL VIENTO EN EDIFICIOS ALTOS

#### 1.2.1. HURACÁN ODILE

El mes de septiembre de 2014 el Servicio Meteorológico Nacional alertó sobre la formación de un huracán de categoría IV (respecto a la escala Saffir - Simpson) frente a las costas de Guerrero y Michoacán, con velocidades sostenidas de 215 km/h y ráfagas que alcanzaron los 260 km/h. El huracán llegó a tener un diámetro de 600 km de nubosidad, un núcleo de 70 km y una velocidad de desplazamiento de 24 km/h. El 14 de septiembre tocó tierra en la península de Baja California reduciéndose a categoría III con velocidades de 205 km/h y ráfagas de 240 km/h, disipándose 3 días después (Muria, et. al., 2015).

El IIUNAM realizó una visita a la zona afectada en la que se reportó daño en 10 978 viviendas, 923 escuelas, sistemas extendidos, así como en estructuras industriales, comerciales, deportivas y cubiertas aisladas. El Aeropuerto Internacional de los Cabos y el Aeródromo Internacional de Cabo San Lucas sufrieron daños considerables que provocaron la suspensión de actividades en sus instalaciones (Muria, et. al., 2015).

Los daños en edificios altos ocurrieron principalmente en elementos no estructurales debido a la falta de su diseño para las acciones de estos fenómenos meteorológicos. En la **Figura 1.1.a**

se observa la fachada de un edificio de departamentos de 18 niveles que sufrió afectaciones en los elementos de borde; asimismo, se observa que no existen estructuras circundantes. En la **Figura 1.1.b** se observan a detalle los daños en el edificio de departamentos; se muestra que los elementos de borde son paneles prefabricados que se montan sobre perfiles metálicos. La presión generada por el huracán fue lo suficientemente grande para romper los paneles dejando expuesta la parte interior del edificio, lo que provoca la pérdida de los bienes dentro del inmueble, la generación de proyectiles que ponen en riesgo el mismo edificio o inmuebles adyacentes y adicionalmente, la aparición de presiones interiores que provocan un cambio en las fuerzas de diseño.



**Figura 1.1 Daño en fachada de edificio de departamentos (Muria, et. al., 2015)**

En la **Figura 1.2** se observa que los paneles prefabricados se vuelven a emplear en las fachadas de ambos de edificios. Sin embargo, en la **Figura 1.2.a** se muestra que detrás de los paneles prefabricados existen muros de concreto los cuales resistieron sin problema alguno las presiones generadas por el huracán, no obstante el desprendimiento de los paneles desprendidos los convirtió en proyectiles. En la **Figura 1.2.b** se exhibe el uso de los paneles prefabricados como elementos de borde, la misma práctica constructiva que el edificio de departamentos de la **Figura 1.1**.

El uso de estos elementos prefabricados es práctica común en Baja California debido a la facilidad del proceso constructivo y su costo, sin embargo, son evidentes los daños que se presentan ante la ocurrencia de eventos meteorológicos de tal magnitud.



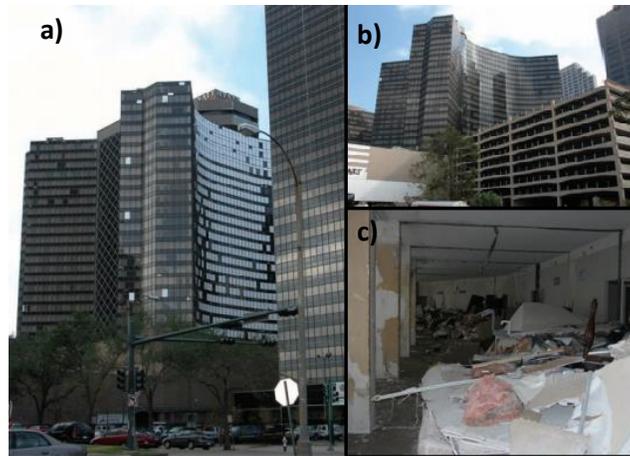
**Figura 1.2 Daño en fachada de hotel (a) y edificio de condominios (b) (Muria, et. al., 2015)**

### 1.2.2. HURACÁN KATRINA

El huracán Katrina se formó con las características necesarias para considerarse huracán de categoría 5 en el golfo de México, sin embargo, los vientos sostenidos bajaron de magnitud para catalogarse como huracán categoría 3, no obstante otros parámetros como la marea de tormenta permanecían con características pertenecientes a categoría 5 por lo que los daños a infraestructura fueron muy graves. Se registraron vientos sostenidos de 201 km/h que se extendían a 200 km de diámetro con marea de tormenta de altura aproximada de 7.5 metros de altura (Mosqueda, G. y Porter, K., 2007).

De acuerdo con Mosqueda y Porter el saldo del huracán fue de 1 800 vidas perdidas, daños e inundaciones en la costa del Golfo de México en Estados Unidos. Entre los daños se reporta afectaciones en edificios comerciales y públicos, hospitales, sistemas extendidos e infraestructura de telecomunicación.

En la **Figura 1.3** se observan los daños presentados en el hotel Hyatt en donde principalmente se rompieron los cristales de la fachada. La ruptura se concentró en los pisos superiores al 5° piso, esto debido a que la presión que incide en un edificio tiende a aumentar con la altura, con lo que a partir de cierto nivel la presión fue más alta que la que podía resistir las ventanas. Con la ruptura de cristales se tuvo en consecuencia una afectación al inmobiliario por la acción del viento, agua y residuos acarreados por el huracán (**Figura 1.3.c**).



**Figura 1.3 Daños en Hotel Hyatt (Mosqueda, G. y Porter, K., 2007)**

En la **Figura 1.3.a** se observa que en las inmediaciones del hotel hay edificios de altura similar por lo que la presencia de éstos pudo provocar la aparición de vórtices que agravaron la situación en las fachadas norte y este. En las fachadas sur y oeste el daño fue considerablemente menor (**Figura 1.3.b**).

La torre Dominion mostrada en la **Figura 1.4** es un edificio comercial con altura de 25 pisos ubicado en Nueva Orleans. Con el paso del huracán Katrina se reportó daño en aproximadamente el 50 % de las ventanas en las fachadas. En la **Figura 1.4.a** se observa el daño extendido en las ventanas de la fachada oeste. En la **Figura 1.4.b** se observa que enfrente de la fachada este se encuentra el edificio Amoco mientras que en la fachada oeste no hay otra edificación de gran altura.



**Figura 1.4 Daños en fachada de la Torre Dominion (Mosqueda, G. y Porter, K., 2007)**

En ambos edificios altos se observa que el daño más común fue la ruptura de los cristales en las fachadas debido a las presiones generadas por el huracán o bien por el impacto de proyectiles. Esto tiene como consecuencia la destrucción de bienes, instalaciones y acabados en el interior del inmueble.

### 1.2.3. HURACÁN WILMA

Es el huracán más fuerte que ha sido registrado en el Atlántico Norte y el que ha dejado mayores daños y pérdidas económicas a México. El 18 de octubre de 2005 adquirió las condiciones necesarias para categorizarse como huracán, pero en tan sólo 24 horas alcanzó la fuerza necesaria para convertirse en categoría 5 de la escala Saffir Simpson, con vientos máximos sostenidos de 280 km/h y ráfagas de 345 km/h en su punto de mayor intensidad. Justo antes del impacto descendió a categoría 4 con vientos máximos sostenidos de 230 km/h registrados en Cozumel y de 220 km/h en Puerto Morelos, Quintana Roo (Alva, O., 2015).

El hotel Riu Cancún mostrado en la **Figura 1.5.a** tiene 16 pisos con una forma irregular en planta en forma de “V” con el lado cóncavo hacia el mar. Su irregularidad pudo provocar que se presentaran presiones grandes en el barlovento por estancamiento del flujo, sin embargo, no se presentaron daños severos más allá de ventanas rotas y consecuentemente daños en los interiores de las habitaciones. En la **Figura 1.5.b** se aprecia a detalle el daño en una de las ventanas del edificio, se puede observar que en el interior parte de los plafones fueron dañados. En la **Figura 1.5.c** se observa los daños al recubrimiento y plafones del lobby del hotel.



**Figura 1.5** Fachada principal y daños en Hotel Riu Cancún (Ramírez, J., 2007 y Alva, O., 2015)

En la **Figura 1.6** se muestran los daños en el hotel Park Royal Pirámides, el cual consiste en dos torres de 6 niveles cada una (**Figura 1.6.a**). El huracán Wilma provocó grave daño en vidrios, contenidos y accesos. En la **Figura 1.6.b** se observan escombros acarreados por el huracán en las inmediaciones del hotel. En la **Figura 1.6.c** se muestra el daño a las ventanas de la fachada lo cual provocó un grave daño en los contenidos.



**Figura 1.6 Daños en Hotel Park Royal Pirámides (Ramírez, J., 2007 y Alva, O., 2015)**

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos del viento en un edificio irregular alto realizando pruebas experimentales en túnel de viento, modelando 2 diferentes condiciones de terreno con el uso o ausencia de rugosidades. Las configuraciones de análisis son: 1) Sin rugosidades / velocidad de 196 km/h; 2) Sin rugosidades / velocidad de 243 km/h; 3) Con rugosidades / velocidad de 196 km/h y; 4) Con rugosidades / velocidad de 243 km/h.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los coeficientes de presión en cada punto de interés para las condiciones de análisis determinadas.
- Comparar los coeficientes de presión obtenidos para diferentes condiciones de análisis.
- Determinar condición más desfavorable de análisis.
- Analizar el efecto presentado en los bordes del edificio.
- Analizar la importancia de realizar un estudio en túnel de viento para edificios irregulares altos.

### 1.4. JUSTIFICACIÓN

El auge del turismo en las costas del país ha generado un crecimiento económico que impulsa la construcción de edificios altos con fines principalmente hoteleros. La arquitectura de estos edificios se encuentra influenciada cada vez más por elementos geométricos irregulares, teniendo de esta forma una mejor integración con el entorno y una visión moderna de la arquitectura.

Como se observó en la revisión de literatura sobre daños a edificios altos, la falta de un diseño adecuado en los elementos resulta en daño extendido que abarca desde contenidos hasta elementos estructurales. Para evitar estas situaciones es necesario cumplir con los requisitos mínimos de seguridad estipulados en la normatividad vigente; sin embargo, ante figuras geométricas irregulares se recomienda realizar un estudio más detallado sobre las acciones del viento en la estructura ya que se presentan distribuciones de presión fuera de lo común.

En la presente tesis se pretenden mostrar los efectos que tiene el viento en un edificio irregular de gran altura realizando ensayos en un túnel de viento para enfatizar los daños que pueden llegar a suponer la omisión de estos análisis.

### 1.5. ALCANCES DE LA TESIS

La presente tesis estudia la componente estática del viento en un edificio de forma irregular en planta ubicado en Cancún por medio de un modelo rígido en túnel de viento. El análisis se realizó con y sin rugosidades, con las velocidades indicadas en el Manual de Obras Civiles de la CFE para períodos de retorno de 50 y 200 años (196 km/h y 243 km/h, respectivamente). Se busca obtener los coeficientes de presión para compararlos entre los diferentes ensayos e identificar la condición más desfavorable.

Se consideró aceptable realizar una sola sesión de pruebas para las 4 configuraciones de estudio. Se recomienda realizar sesiones futuras con diferentes estructuras asimétricas.

### 1.6. CONCLUSIONES

El viento es un fenómeno que se presenta en la atmósfera por la diferencia de energía entre las masas de aire lo cual provoca el movimiento de las mismas. Este movimiento se presenta a diferentes escalas de longitud y tiempo.

México es un país que se encuentra expuesto a eventos meteorológicos los cuales provocan daños en la infraestructura, siendo las más dañadas aquellas que son ligeras y esbeltas. No obstante, en edificios en donde su sistema estructural es más resistente a las acciones del viento, se siguen observando daños principalmente en elementos de fachada y de contenido debido a la falta de un diseño adecuado que soporte la magnitud de las presiones, como se observa en los ejemplos presentados en el apartado 1.2 del presente capítulo. Los daños provocan un deterioro parcial o total del inmueble durante un periodo de tiempo o, en casos severos, de forma definitiva; esto aunado a la pérdida de vidas humanas y daños económicos. La falta de un diseño adecuado se debe a diferentes causas, entre ellas al uso de materiales inadecuados para la acción de eventos meteorológicos.

### 1.7. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 1

En el capítulo 1, se define el problema sobre el cual versa la tesis, para lo cual se da una breve explicación sobre las causas y origen del viento y además se muestran daños provocados en edificios altos por los huracanes Odile, Katrina y Wilma que se muestran en la literatura. Asimismo se establecen los objetivos y se justifica la importancia de la presente investigación.

### 1.8. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 2

En el capítulo 2 se describen las herramientas que se disponen para realizar el diseño eólico en edificios. Se menciona el Manual de Obras Civiles en su versión de Diseño por Viento, especificando las consideraciones que toma en cuenta para el análisis de edificios. Asimismo, se detalla el uso y características de los túneles de viento como herramientas que permiten analizar el efecto del viento en diferentes estructuras; adicionalmente se muestran resultados de pruebas experimentales en túnel de viento para edificios de gran altura. Por último, se hace mención de la Dinámica de Fluidos Computacional como una nueva herramienta que permite realizar análisis eólicos por medio de algoritmos matemáticos y computacionales.

### 1.9. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 3

Al inicio del capítulo 3 se describe el túnel de capa límite atmosférica de la UNAM en donde se llevó a cabo las pruebas experimentales de la presente tesis. Posteriormente se realiza una descripción de las características del modelo ensayado y se comenta el proceso de construcción e instrumentación del mismo. También se detallan los parámetros considerados para la realización de las pruebas, así como la descripción de las escalas de similitud para garantizar la reproducción del fenómeno de estudio. Por último se describe el proceso llevado a cabo durante la prueba en las fases de: instrumentación de prueba, registro de datos, proceso de datos y el cálculo de los coeficientes de presión.

### 1.10. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 4

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el túnel de viento de la UNAM, enfocándose en aquellas que se consideraron más desfavorables para la estructura. En estas condiciones desfavorables se realizó un análisis más detallado comparando la distribución en la superficie del modelo de los coeficientes de presión obtenidos para las dos condiciones de análisis.

### 1.11. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO 5

En este capítulo se enuncian las conclusiones a las que se llegó con las pruebas realizadas en el túnel de viento y al final se dan recomendaciones para futuras investigaciones.

### 1.12. FORMATO DE TESIS

El formato de la tesis incluye al final de cada capítulo un apartado de conclusiones y/o recomendaciones a excepción del capítulo 4 puesto que sus conclusiones y recomendaciones son el tema sobre el que versa el capítulo 5. De igual manera se incluye un apartado de referencias empleadas por capítulo al final del mismo.

### 1.13. REFERENCIAS

- Alva, O. (2015). *Evaluación de daños en la infraestructura de Quintana Roo y Yucatán causados por el huracán Wilma*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 34 – 37
- Jiménez, J. (2007). *Ciclones tropicales*. Serie Fascículos. México: CENAPRED. pp. 17
- Kolousek, V. (1984). *Wind effects on civil engineering structures*. Amsterdam: Elsevier.
- Mosqueda, G. y Porter, K. (2007). *Damage to Engineered Buildings and Lifelines from Wind, Storm Surge and Debris in the Wake of Hurricane Katrina*. MCEER Special Report Series. Volumen 4: Buildings. MCEER. pp. 9 – 16
- Muria, et. al., (2015). *El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California*. Serie Investigación y desarrollo del Instituto de Ingeniería, UNAM. pp. 21 – 31, 179 – 183.
- Ramírez, J. (2007). *Estimación de pérdidas por viento ocasionadas por el huracán Wilma en el Caribe Mexicano*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 43 – 44, 51 – 52.
- Villarubia, M. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Barcelona: MARCOMBO. pp.32.



**CAPÍTULO 2.**  
**HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS**  
**EÓLICO EN EDIFICIOS**

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

---

### 2.1. NORMATIVIDAD EN MATERIA DE VIENTO APLICABLE A EDIFICIOS ALTOS

México es un país que se encuentra expuesto a distintos fenómenos meteorológicos que provocan intensidades de viento considerables. Con el fin realizar un diseño adecuado que disminuya el riesgo de estos eventos surge la necesidad de recurrir a una normatividad vigente con la que se pueda determinar las acciones mínimas de diseño. En materia de diseño por viento se emplea el Manual de Obras Civiles (MOC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en su versión de Diseño por Viento (DV).

#### 2.1.1. MANUAL DE OBRAS CIVILES: DISEÑO POR VIENTO.

En esta versión del MOC se detallan los procedimientos que deben de llevarse a cabo para determinar las velocidades por viento y fuerzas mínimas de diseño correspondientes que actúan en una estructura localizada en la República Mexicana. El manual es el resultado de la recopilación de investigación realizada por diferentes expertos en materia de viento e infraestructura. Cabe aclarar que no se incluyen todas las estructuras por lo que se recomienda la consulta a especialistas ante situaciones no previstas en el manual.

En el MOC – DV (2008) se distinguen tres diferentes tipos de respuestas estructurales ante la acción del viento: estática, dinámica y aeroelástica. La respuesta estática se presenta en “estructuras no sensibles a efectos dinámicos con frecuencias naturales de vibración considerablemente mayores que el intervalo de frecuencias de la turbulencia”. Asimismo, se realiza un análisis estático para el diseño de recubrimientos y elementos de soporte en fachadas que formen parte de cualquier tipo de estructuras, sean o no esbeltas. Las fuerzas para este tipo de análisis se calculan con la siguiente expresión:

$$F_{es} = \sum q_z C_p A_{ref} \quad (2.1)$$

donde

$F_{es}$ , fuerza estática, en N

$q_z$ , presión dinámica de base a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno, en Pa

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

$C_p$ , coeficiente de presión, adimensional

$A_{ref}$ , área de referencia sobre la que actúa la presión, en m<sup>2</sup>

En el MOC – DV (2008) se define una estructura cerrada como una construcción prismática delimitada por muros y techos, los cuales pueden tener un cierto grado de permeabilidad que permite la generación de presiones interiores. En ese sentido se distinguen dos fuerzas principales que actúan en una estructura cerrada: presiones exteriores y presiones interiores. La fuerza estática resultante que actúan sobre las superficies de la estructura se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$F_{es} = p_z A_z \quad (2.2)$$

donde

$p_z$ , es la presión de diseño a la altura  $z$ , en Pa. Se define como la diferencia entre la presión exterior y la presión interior

$A_z$ , área de la estructura, a la altura  $z$ , sobre la que actúa la presión de diseño, en m<sup>2</sup>

La presión exterior que actúa sobre una superficie de la estructura se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$p_e = C_{pe} K_A K_L q_z \quad (2.3)$$

donde

$p_e$ , presión exterior, en Pa

$C_{pe}$ , coeficiente de presión exterior, adimensional

$K_A$ , factor de reducción de presión por tamaño de área, adimensional

$K_L$ , factor de presión local, adimensional

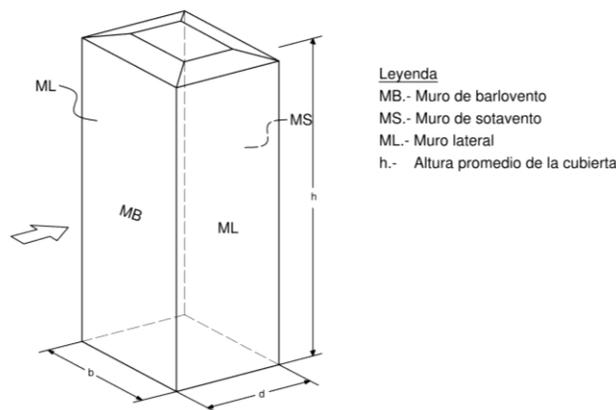
## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

Como se observa en la expresión anterior, hay diferentes factores que se toman en cuenta para la determinación de la presión exterior que actúa en una cara de la estructura, siendo el coeficiente de presión el objeto de estudio de la presente tesis. El coeficiente de presión modela las propiedades aerodinámicas de la estructura, por lo cual varía en función del ángulo de incidencia del viento y geometría de la edificación.

En el manual no se tiene en cuenta una geometría irregular en planta por lo que se tomarán los coeficientes de presión propuestos para planta rectangular cerrada (**Figura 2.1**) como referencia para los resultados obtenidos de las pruebas de la presente tesis. En la **Tabla 2.1** se muestran los coeficientes de presión considerados en el MOC – DV (2008) cuando el viento incide en forma perpendicular al muro de Barlovento del edificio de planta rectangular.

**Tabla 2.1 Coeficientes de presión exterior propuestos por el MOC (MOC – DV, 2008)**

Muro	Dirección del viento $\theta$ , en grados	d/b	Inclinación del techo $\gamma$ , en grados	$C_{pe}$
Barlovento	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) o paralela a las generatrices ( $\theta = 90^\circ$ )	Cualquiera	Cualquiera	0.8
Sotavento	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) o paralela a las generatrices ( $\theta = 90^\circ$ ), para techos a cuatro aguas.	$\leq 1$	$< 10^\circ$	-0.5
		2		-0.3
		$\geq 4$		-0.2
	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) a las generatrices, para techos a una o dos aguas.	Cualquiera	$10^\circ \leq \gamma \leq 15^\circ$	-0.3
			$20^\circ$	-0.4
			$\geq 25^\circ$	-0.75
	Paralela ( $\theta = 90^\circ$ ) a las generatrices, para techos a una o dos aguas.	$\leq 1$	Cualquiera	-0.5
		2		-0.3
		$\geq 4$		-0.2



**Figura 2.1 Representación de edificio alto con planta rectangular cerrada (MOC – DV, 2008)**

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

Una respuesta dinámica “ocurre en estructuras sensibles a los efectos dinámicos, con una o más frecuencias naturales dentro del intervalo de frecuencias de la turbulencia”. Para aplicar este método se debe de cumplir con alguna de las siguientes condiciones:

- La relación  $H/D > 5$ , en donde H es la altura de la construcción y D la dimensión mínima de la base.
- El período fundamental de la estructura es mayor que un segundo y menor o igual que cinco segundos.

En este tipo de análisis se evalúa la magnitud de las fuerzas multiplicando la componente estática por un factor de amplificación dinámica ( $F_{AD}$ ).

Cabe aclarar que el MOC – DV (2008) permite el uso de otros coeficientes de presión siempre y cuando sean justificados en resultados analíticos, experimentales o presentados en literatura especializada.

### 2.1.2. ASCE: SECCIÓN 6.0 CARGAS POR VIENTO

En el código de diseño *Cargas mínimas para el diseño de edificios y otras estructuras* del ASCE se detallan los procedimientos y consideraciones que deben de tomarse en cuenta para el diseño de la estructuras en Estados Unidos de América. En la sección 6.0 se especifica la acción de las carga por viento, en donde toman en cuenta los siguientes coeficientes de presión para edificios cerrados y parcialmente cerrados, con planta rectangular cerrada.

**Tabla 2.2 Coeficientes de presión exterior propuestos por ASCE (ASCE, 2010)**

Muro	d/b	$C_{pe}$
Barlovento	Cualquiera	0.8
Sotavento	0 - 1	-0.5
	2	-0.3
	$\geq 4$	-0.2

Para el caso de estructuras que no cumplen con los requisitos planteados en el código, se recomienda realizar pruebas en túnel de viento para la obtención de los parámetros de diseño.

### 2.2. TÚNEL DE VIENTO

Las cargas por viento son una de las principales acciones que se toman en cuenta para el diseño de estructuras debido a que su acción supone un incremento significativo en los esfuerzos de los elementos que la integran. Por lo mismo, con el paso del tiempo se han desarrollado herramientas analíticas para la estimación de las fuerzas inducidas por el viento, las cuales se representan en códigos de diseño.

Existen escenarios en los que no es posible aplicar estas herramientas analíticas debido a que no describen con exactitud el fenómeno en la estructura. En estos escenarios están presentes dos factores principales: 1) el desconocimiento de las propiedades aerodinámicas de la estructura y, 2) perturbaciones locales significantes en el flujo del viento, como lo es el efecto de bloqueo por estructuras cercanas (Simiu, E. y Scanlan, R., 1978).

Para resolver la problemática planteada anteriormente se recurre a análisis experimentales en un túnel de viento. El túnel de viento se define como una herramienta tecnológica que permite simular el flujo del viento en modelos a escala. De esta forma, en ingeniería civil es posible determinar con mayor precisión los efectos del viento en diferentes estructuras para diferentes configuraciones de análisis.

El funcionamiento general del túnel de viento se basa en recrear un flujo de aire a escala por medio de un ventilador; este flujo deberá de tener características similares al viento que se desea reproducir, por lo que en un túnel de capa límite atmosférica se introducen superficies rugosas para simular distintas categorías de terreno; al llegar a la zona de pruebas el viento incide sobre el modelo, el cual está instrumentado con sensores que registran las variables que se desean medir. En la zona de pruebas es posible modelar elementos que se encuentran en las cercanías de la estructura de análisis que provocan perturbaciones locales en el flujo.

#### 2.2.1. TIPOS DE TÚNEL DE VIENTO

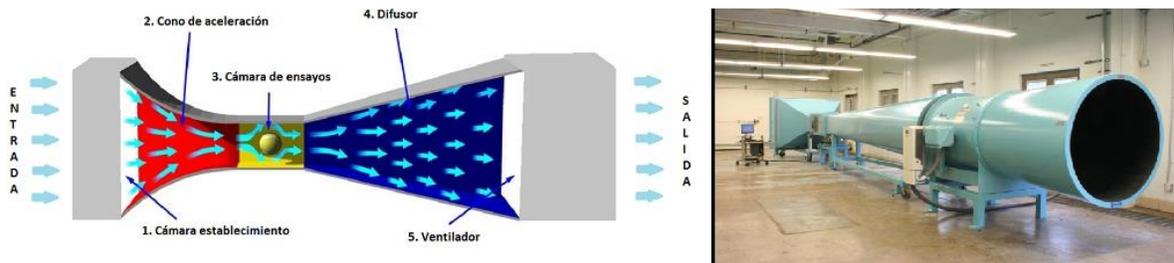
De acuerdo con Kolousek, V. (1984), los túneles de viento se pueden clasificar de forma general por su funcionamiento en:

- Túnel de viento de circuito abierto o NPL (National Physical Laboratory)
- Túnel de viento de circuito cerrado o Göttingen

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

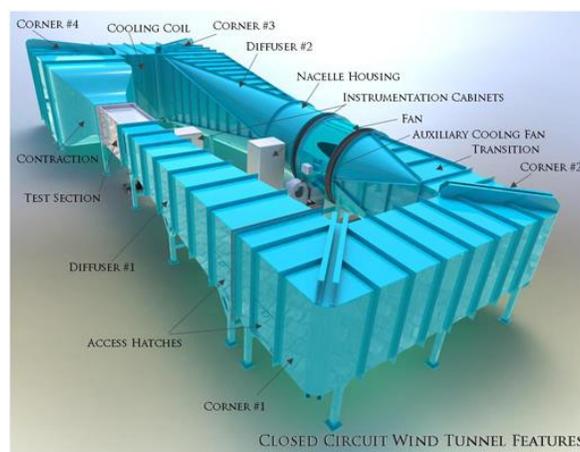
Los cuales a su vez pueden tener una sección de prueba abierta o cerrada, teniendo de esta forma cuatro configuraciones posibles.

Los túneles de viento de circuito abierto (**Figura 2.2**) son de menor tamaño y son más económicos en su construcción; sin embargo, el ventilador debe de proporcionar constantemente energía al aire atmosférico para mantener la velocidad de análisis, lo cual supone un alto costo de operación. Debido a que el aire se obtiene directamente de la atmósfera no se presentan problemas por la variación de la densidad.



**Figura 2.2 Túnel de circuito abierto (Aerolab, 2018 y Terrés, J., 2014)**

Los túneles de viento de circuito cerrado (**Figura 2.3**) son de mayor tamaño debido a que la infraestructura forma un ciclo donde el aire es continuamente recirculado, de esta forma el ventilador no debe de impulsar continuamente el aire, solo debe de aportar la energía necesaria para vencer la fricción en las paredes teniendo un menor costo de operación. Este tipo de túnel es más costoso en su construcción debido a que la infraestructura es más compleja. Para evitar el sobrecalentamiento del aire por uso prolongado, se instala un sistema regulador de temperatura para que la densidad del aire permanezca constante.

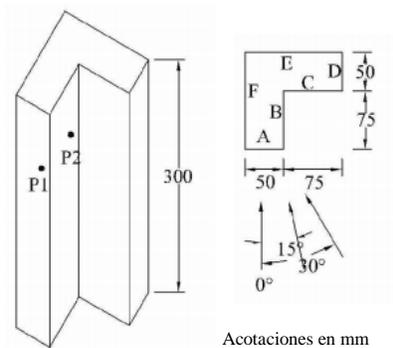


**Figura 2.3 Túnel de circuito cerrado (Aerolab, 2018)**

## 2.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO

### 2.3.1. EDIFICIO CON FORMA EN "L"

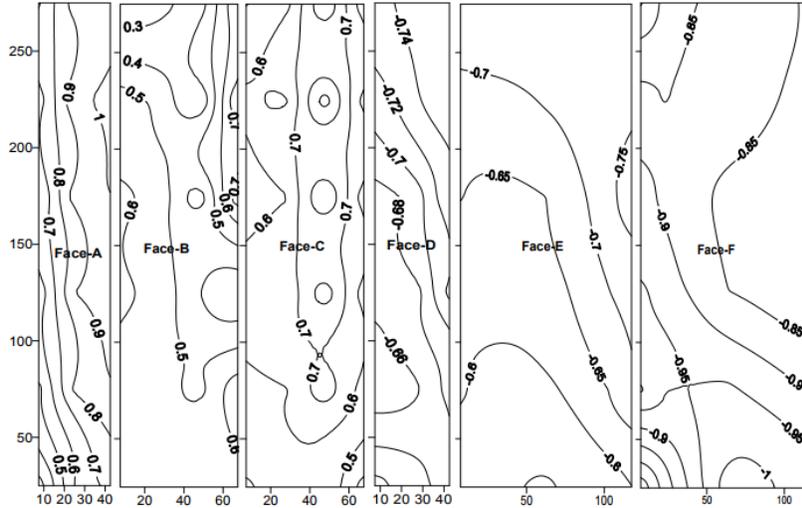
Amin, J. y Ahuja, A. (2008) probaron en el túnel de viento del Instituto Indio de Tecnología de Roorkee el modelo de un edificio con forma de L, con una escala geométrica de 1:500 y con las dimensiones que se muestran en la **Figura 2.4**. El modelo fue instrumentado con más de 150 sensores distribuidos a las alturas de 25, 75, 125, 175, 225 y 275 mm medido desde la base, ubicándolos principalmente cerca de las esquinas de las caras para registrar la variación de la presión en ese lugar. Los ensayos se realizaron para incidencia del viento en un intervalo de  $0^\circ$  -  $180^\circ$ , con intervalos de  $15^\circ$ .



**Figura 2.4 Geometría del modelo: Edificio con forma en "L" (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)**

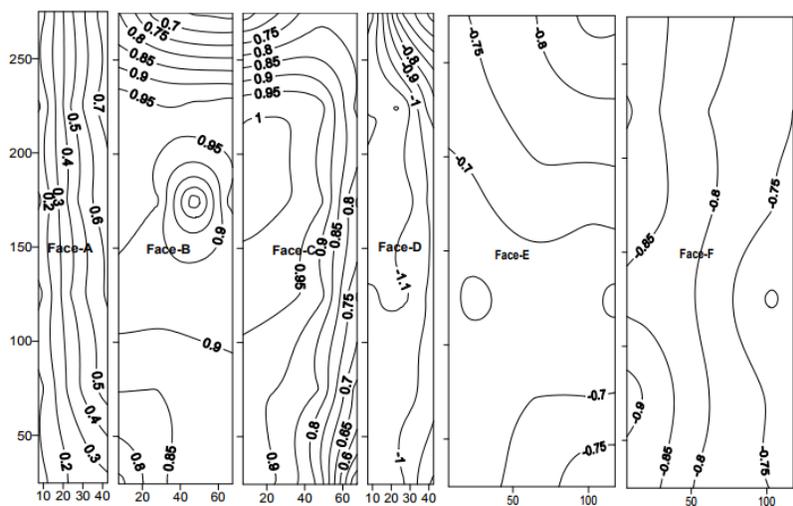
Los resultados para un ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$  se muestran en la **Figura 2.5**. Se observa que los coeficientes de presión en la cara A tiene una tendencia creciente hacia la derecha, efecto diferente a un edificio rectangular en planta donde los valores mayores de presión se concentran en el centro de la cara. En la cara B se observa la presencia de valores positivos a pesar de ser paralela a la cara F, esto según explican Amin, J. y Ahuja, A. se debe a un efecto de bloqueo provocado por la cara C, lo cual ocasiona un estancamiento del flujo. Se observa que el flujo de viento se separa en las paredes del modelo por lo que en las caras paralelas al flujo del viento se presenta un efecto de separación que ocasiona un incremento en la succión en dirección hacia el sotavento. La cara E es opuesta al flujo del viento por lo que sólo se presentan succiones con valores cercanos entre sí.

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS



**Figura 2.5 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 0° (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)**

Para un ángulo de incidencia de 30° se observan los cambios en los coeficientes de presión del edificio. Las presiones positivas se vuelven a concentrar en las caras A, B y C, sin embargo, los coeficientes de presión en la cara A tienen una tendencia decreciente hacia el sotavento por la separación del flujo, teniendo de esta forma los coeficientes de presión mayores en las caras B y C. Cabe destacar que los valores más grandes de los coeficientes se localizan justo arriba de la mitad del modelo, para posteriormente descender de magnitud conforme se incrementa la altura. Los coeficientes en las caras E y F se encuentran en el lado del sotavento y las variaciones entre ellos son mínimas.

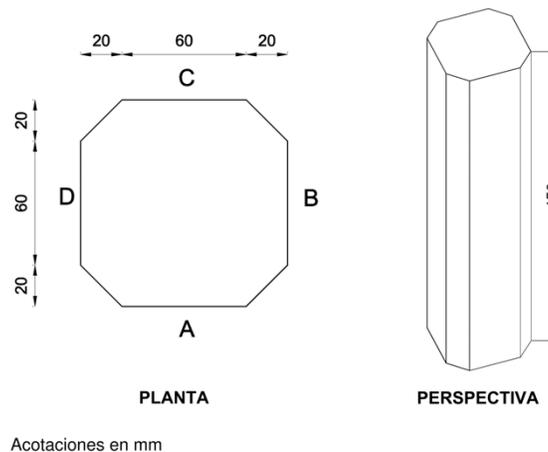


**Figura 2.6 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30° (Amin, J. y Ahuja, A., 2008)**

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

### 2.3.2. EDIFICIO CUADRADO CON ESQUINAS BISELADAS

Kumar, N. (2011) probó un edificio con forma de prisma cuadrado con sus esquinas biseladas en el túnel de viento del Instituto Indio de Tecnología de Roorke. El modelo tiene una altura de 450 mm a escala geométrica de 1:500, como se muestra en la **Figura 2.7**. Se realizó la instrumentación con 262 sensores repartidos uniformemente entre las paredes. Las pruebas se llevaron a cabo para un intervalo de  $0^\circ - 45^\circ$  debido a su doble simetría, con incrementos de  $15^\circ$ .



**Figura 2.7 Geometría del modelo: Edificio cuadrado con esquinas biseladas (Kumar, N., 2011)**

Para una incidencia del viento de  $0^\circ$  (**Figura 2.8**) se tuvo como resultado una distribución de presiones positivas en la cara A, con una alineación hacia al centro en forma horizontal y creciente en forma vertical, concentrándose el mayor valor aproximadamente al 75% de la altura; en los biseles del barlovento se obtuvieron coeficientes de presión negativos con magnitudes cercanas a 0. En los muros laterales (B y D) se presentaron valores negativos, presentándose las mayores succiones con una tendencia hacia el barlovento. Respecto a las caras del sotavento se registraron succiones con magnitudes muy similares entre sí.

Con una incidencia del viento de  $45^\circ$  (**Figura 2.9**) se observa un claro cambio en la distribución de presiones. Los valores más grandes de presión se localizan en el bisel AB, el cual es perpendicular a la dirección del flujo. En las caras A y B el viento comienza a desprenderse del modelo por lo que los coeficientes de presión tienden a reducir hasta separarse por completo en el borde del bisel aguas abajo. En las caras del sotavento, los coeficientes de presión tienen pequeñas variaciones entre sí.

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

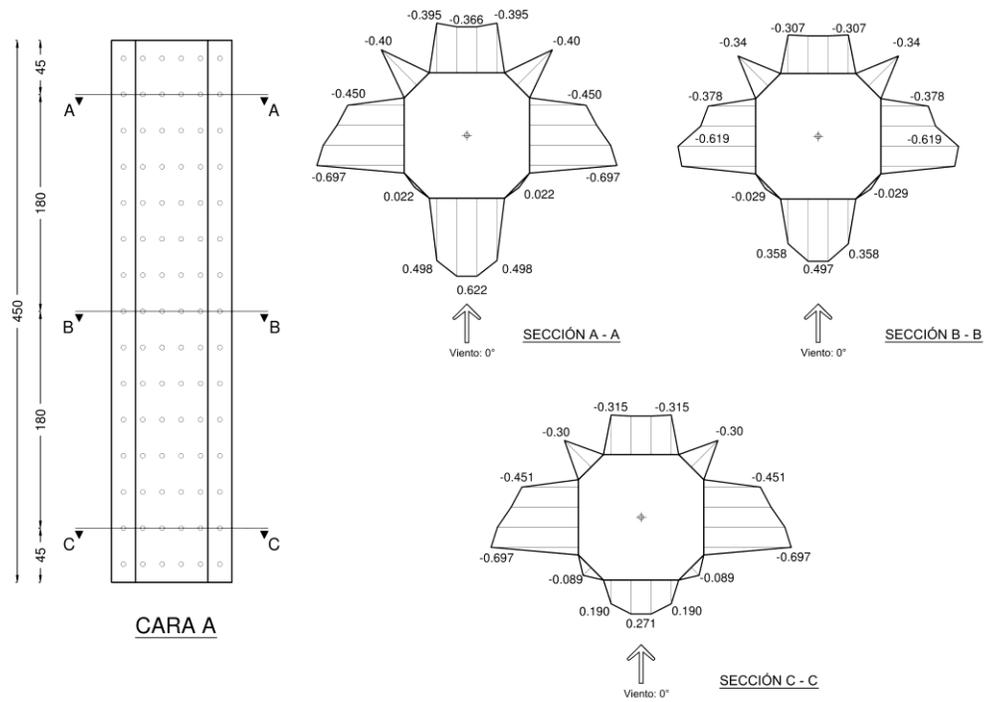


Figura 2.8 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 0° (Kumar, N., 2011)

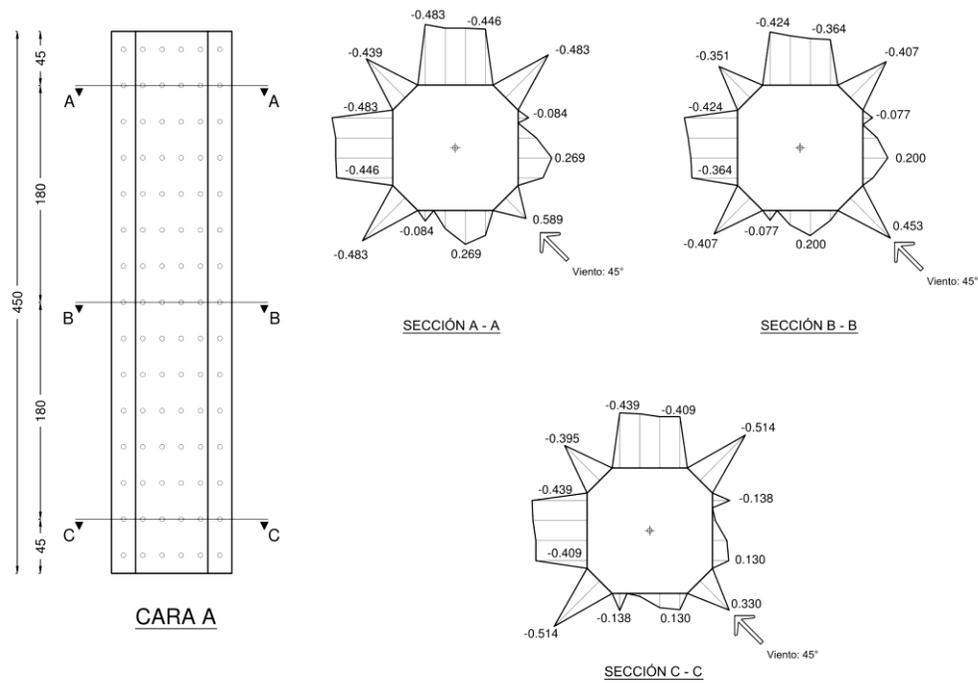


Figura 2.9 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 45° (Kumar, N., 2011)

### 2.4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La Dinámica de Fluidos Computacional es una herramienta que se emplea para modelar el comportamiento de un fluido en su interacción con un cuerpo sólido. Esta rama de la Mecánica de Fluidos expresa el comportamiento por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales se resuelven por medio del uso métodos numéricos y algoritmos en software especializado.

Esta herramienta es empleada en diferentes ramas de las ciencias y la ingeniería, y particularmente en ingeniería de viento se emplea para modelar la acción del viento en diferentes estructuras. Tiene la ventaja de no requerir una infraestructura compleja para su realización; sin embargo, se requiere de un equipo de cómputo de alto rendimiento para obtener una mayor precisión en los datos. Asimismo, permite la modelación de estructuras y condiciones que son complejas de replicar a escala en un túnel de viento (Rosado, E., 2016).

### 2.5. CONCLUSIONES

Para realizar el análisis por viento en un edificio alto se dispone de diferentes herramientas para determinar las acciones del viento. Los códigos de diseño son el producto de numerosas investigaciones realizadas, por lo mismo dan un procedimiento práctico para determinar las acciones mínimas que se deben de tomar en cuenta en el proceso de diseño; no obstante, para condiciones no contempladas se requiere de un análisis más detallado.

El túnel de viento permite reproducir los efectos del viento en un modelo a escala, con lo que es posible conocer las propiedades aerodinámicas y de comportamiento de la estructura de una forma más precisa pues permite modelar condiciones del terreno, velocidad del viento, estructuras vecinas, entre otras variables que afectan la distribución de presiones.

En las pruebas que se describieron en el apartado 2.3 se observa la importancia de realizar un estudio en túnel de viento para edificios con formas poco convencionales pues la distribución de presiones en los muros es completamente diferente para cada orientación de análisis e incluso se llegan a presentar situaciones imposibles de predecir.

La dinámica de fluidos computacional permite realizar un análisis detallado de las propiedades aerodinámicas de un edificio alto de una forma más económica a un túnel de

## CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS EÓLICO EN EDIFICIOS

viento. Los resultados obtenidos tienen un grado de precisión aceptable respecto a las presiones medias, sin embargo, aún se tienen errores considerables respecto a las fluctuaciones y presiones máximas.

### 2.6. REFERENCIAS

Aerolab (2018). *Closed Circuit Wind Tunnels*. Disponible en: <http://bit.ly/2EOQ09i> [Último acceso: 18/02/2018]

Aerolab (2018). *Open Circuit Wind Tunnels*. Disponible en: <http://bit.ly/2EOQ09i> [Último acceso: 18/02/2018]

Amin, J., Ahuja, A. (2008). *Experimental study of wind pressures on irregular – plan shapes buildings*. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, July. pp. 20 – 24.

ASCE (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: Section 6.0 Wind Loads*. Reston Virginia: American Society of Civil Engineers.

MOC -DV (2008). *Manual de Obras Civiles: Diseño por Viento* (2ª ed.). Ciudad de México – CFE.

Kolousek, V. (1984). *Wind effects on civil engineering structures*. New York: Elsevier. pp. 178 – 181.

Kumar, N. (2011). *Effects of geometrical shapes on wind load son buildings*. India: Indian Institute of technology of Roorkee, Department of Civil Engineering. PhD Thesis. pp. 91 – 100.

Rosado, E. (2016). *Análisis comparativo del impacto de presiones dinámicas de viento sobre una torre de transmisión mediante el uso de dinámica de fluidos computacional*. México: UNAM, Instituto de Ingeniería. Tesis de Maestría en Ingeniería. pp. 17 – 19.

Simiu, E. y Scanlan, R. (1978). *Wind effects on structures: An introduction to wind engineering* (3a ed). New York: John Wiley & Sons. pp. 318 – 319.

Terrés, J. (2014). *El viento en el diseño de fachadas ligeras de gran altura*. Disponible en: <http://bit.ly/2odGnHV> [Último acceso: 18/02/2018]

A photograph of a server room. In the center, a large bundle of fiber optic cables hangs from a rack. The cables are bundled together and secured with red ties. To the right, a blue ladder is leaning against a rack. The room has blue metal frames and a perforated ceiling. The text "CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA" is overlaid in the center of the image.

# CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

---

### 3.1. TÚNEL DE CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA DE LA UNAM

#### 3.1.1. VENTILADOR

El ventilador es el encargado de proporcionar la energía necesaria al aire para ponerlo en movimiento dentro del circuito. Se acciona de forma remota en la sala de control, en donde se fija la velocidad de giro, medida en rpm, con la que se desea poner en marcha; se dispone de una correlación para estimar la velocidad en la sección de prueba en función de la velocidad angular del ventilador que se ha determinado con pruebas de calibración en el túnel. En la sección de pruebas No. 1 se llegan a alcanzar velocidades del orden de 87 km/h.



**Figura 3.1 Vista exterior del ventilador de flujo axial del túnel de viento del IINGEN**

#### 3.1.2. DIFUSOR

A la salida del ventilador el viento es altamente turbulento por lo que es necesario uniformizarlo para disminuir las pérdidas de energía. El difusor consiste en un tramo de sección variable que aumenta en la dirección del flujo, con lo cual la velocidad del viento disminuye.

Este elemento es clave en el diseño del túnel de viento debido a que las pérdidas de energía originadas por la turbulencia del flujo aumentan las dimensiones del túnel así como el costo de operación (Barlow, et. al., 1999).

### 3.1.3. ALABES GUÍA

En las esquinas del circuito se encuentran álabes guía para garantizar que la transición del flujo de una dirección a otra sea de forma suave disminuyendo las pérdidas de energía y asimismo, permitiendo que el flujo siga siendo uniforme (Barlow, et. al., 1999).

### 3.1.4. CÁMARA DE ESTABILIZACIÓN DEL FLUJO

La cámara de estabilización del flujo tiene la función de uniformizar el viento antes de que llegue a la zona de pruebas (Barlow, et. al., 1999). Para tal fin se dispone de un panel hexagonal “honeycomb” de aluminio de 15 cm de espesor y dos pantallas de turbulencia, los cuales en conjunto logran la estabilización del flujo requerida.

En la entrada de la cámara de estabilización del flujo existe un “Intercambiador de calor” para regular la temperatura del aire y, en consecuencia, la densidad del mismo.

### 3.1.5. CONO DE CONTRACCIÓN

El cono de contracción aumenta la velocidad del flujo a través de una transición que disminuye el área de la sección, está diseñado con la forma adecuada para que las pérdidas de energía sean mínimas y además se conserve la uniformidad del flujo proveniente de la cámara de estabilización (Barlow, et. al., 1999).



**Figura 3.2 Vista exterior del cono de contracción y zona de pruebas No.1**

3.1.6. SECCIÓN DE PRUEBAS

La sección de pruebas es la zona donde se llevan a cabo las pruebas experimentales; en ella se instrumenta el modelo sobre una mesa giratoria con el fin de determinar los efectos del viento ante diferentes orientaciones, asimismo se colocan sensores para determinar las características del flujo.

El túnel de viento de la UNAM tiene dos secciones de pruebas: la sección de pruebas No.1, la cual se localiza a la salida del cono de contracción con una altura de 2 m, un ancho de 3 m y una longitud de 20 m; la sección de pruebas No. 2 se encuentra ubicada a la salida del difusor con una altura de 4 m, un ancho de 5 m y una longitud de 4 m.

Los estudios relativos a la capa límite atmosférica se llevan a cabo en la sección de pruebas No. 1, específicamente en la Mesa giratoria No.2 debido a que de esta forma se cuenta con una longitud disponible para la colocación de dispositivos que simulen la rugosidad, las cuales se colocan a lo largo de la sección de pruebas No.1.

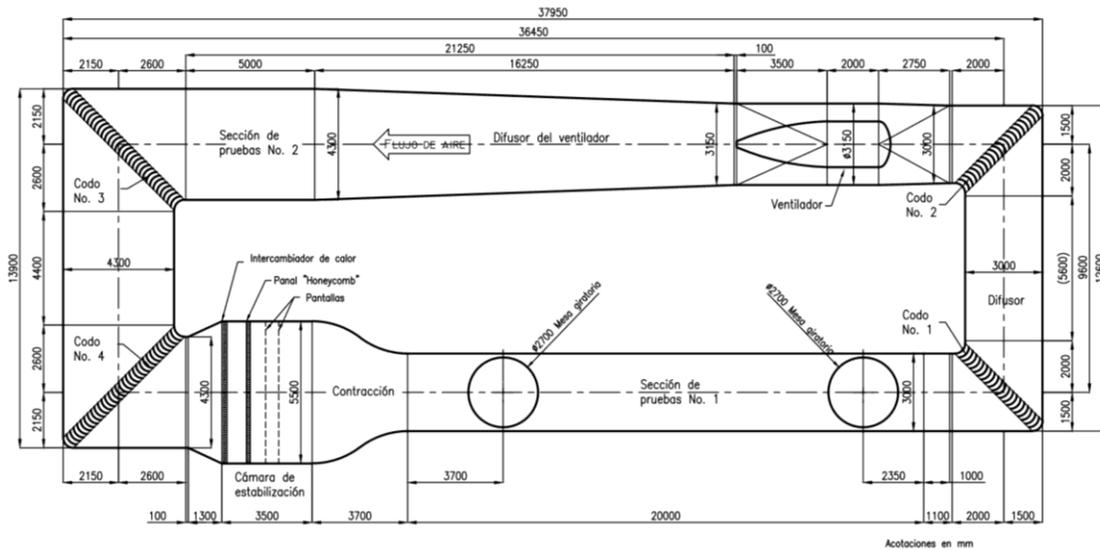
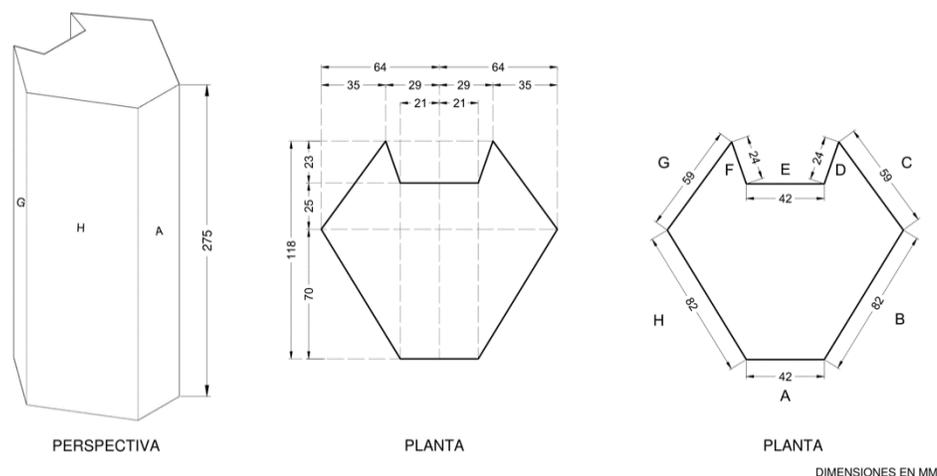


Figura 3.3 Plano en planta del túnel de viento (II UNAM)

## 3.2. MODELO RÍGIDO

### 3.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo del edificio que se estudia en la presente tesis está basado en el concepto de un edificio alto y geoméricamente irregular en planta. El modelo se construyó a una escala de 1:350, con una altura de 275 mm y dimensiones en planta como se muestra en la **Figura 3.4**.



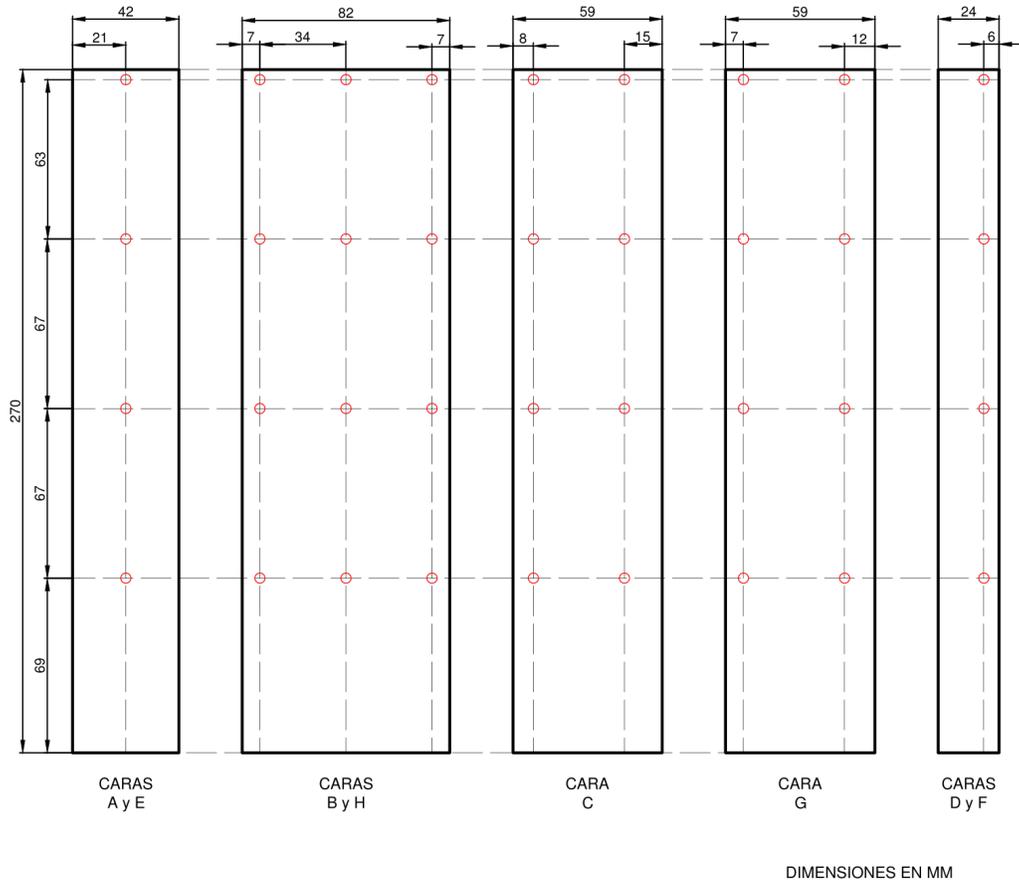
**Figura 3.4 Modelo rígido**

En planta tiene forma de hexágono irregular con un entrante en la zona frontal del modelo, que correspondería a la fachada en la entrada del edificio.

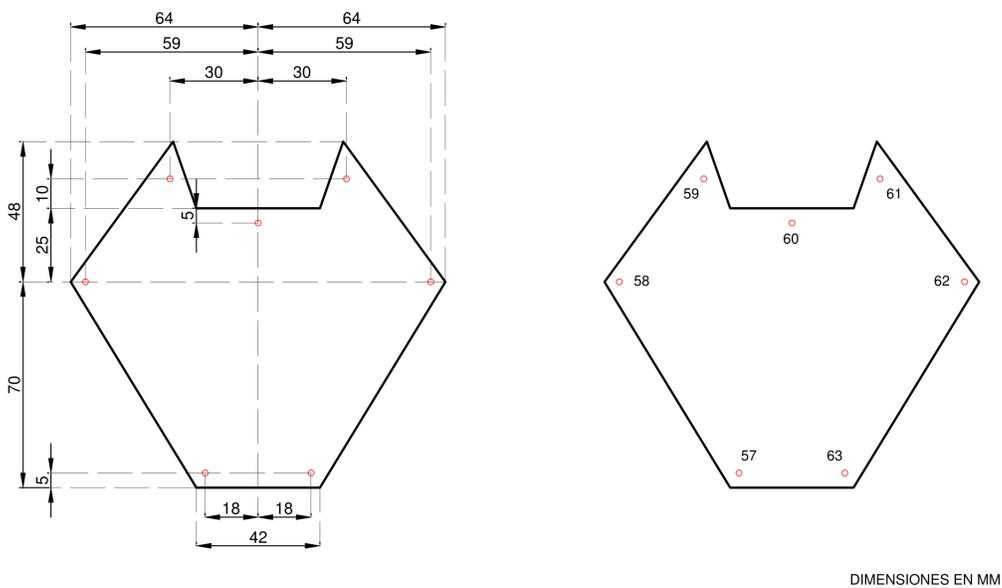
### 3.2.2. CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN

El modelo se construyó con placas de acrílico de 5 mm de espesor en su mayoría, a excepción de la placa del muro G que es de 7 mm de espesor. Con dicho material y espesor se asegura que el modelo será rígido y por lo mismo no presentará deformaciones. Las piezas se unieron con silicón frío, sellando cualquier posible abertura en las uniones de las placas para evitar la aparición de presiones al interior del modelo.

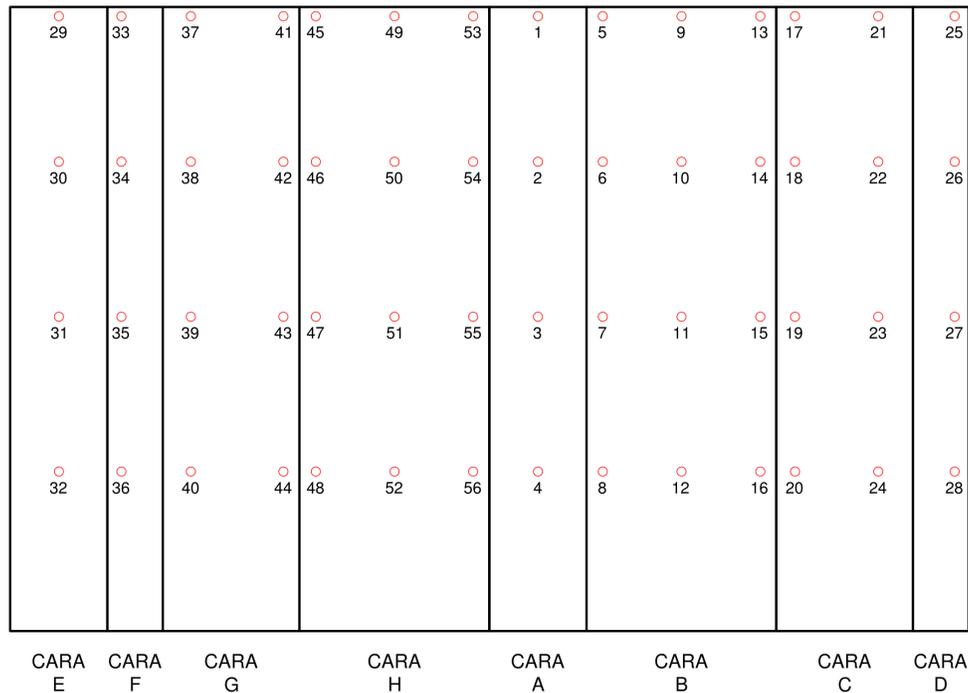
Se realizó la instrumentación con 63 tomas de presión (taps) en la superficie del modelo, de los cuales 7 taps se localizan en la cubierta. En los muros se procuró colocar taps cerca de las aristas del modelo para registrar los efectos en dichas zonas; en la cubierta se colocaron los taps cerca de los vértices. Se decidió emplear solo 63 taps debido a que cubre de forma uniforme la superficie del modelo para los fines de la presente tesis de licenciatura.



**Figura 3.5 Localización de sensores en paredes del modelo**



**Figura 3.6 Instrumentación en cubierta del modelo**



**Figura 3.7 Instrumentación en paredes del modelo**

Las caras C y G son simétricas, sin embargo, dado que el espesor de la cara C es 2 mm mayor la posición de los sensores tuvo que cambiar debido a que el bisel necesario en la cara C para la construcción del modelo es mayor al de la cara G.

Los taps se conectan al módulo de escaneo de presión por medio de mangueras de plástico de 1.2 mm de diámetro. El orificio del modelo por el que se introduce la manguera (tap) se selló con el pegamento pegacryl para evitar fugas de aire y el desprendimiento de la manguera durante el desarrollo de la prueba; asimismo se aseguró que las mangueras no se hubiesen tapado por el uso del pegamento.

### 3.3. PARÁMETROS DE LA PRUEBA

#### 3.3.1. VELOCIDAD DE DISEÑO

Las pruebas se realizaron con las velocidades regionales de 196 km/h (54.44 m/s) y 243 km/h (67.50 m/s) que corresponden a un periodo de retorno de 50 y 200 años, respectivamente, establecidas por el MOC - DV (2008) para la ciudad de Cancún, Quintana Roo.

Dado que no es posible ingresar directamente la velocidad de diseño en el ventilador del túnel se procedió a escalar a 1/6 de su magnitud, valor usado comúnmente en pruebas de este tipo.

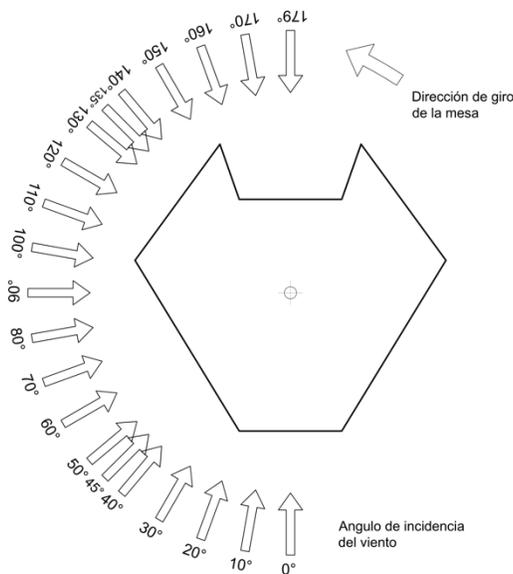
### 3.3.2. TIEMPO DE MUESTREO

Se estimó un tiempo efectivo de prueba de 30 segundos, sin embargo se agregaron 10 segundos por el tiempo que tarda la mesa en cambiar de ángulo y 15 segundos por el tiempo que tarda el flujo en estabilizarse; de tal forma que se redondeó a una duración total de 60 segundos para cada orientación.

### 3.3.3. ÁNGULOS DE ANÁLISIS

Se decidió analizar la estructura para los ángulos 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120°, 130°, 135°, 140°, 150°, 160°, 170° y 179° para tener un intervalo completo de datos sobre la respuesta del modelo ante cualquier posible incidencia del viento.

Como se observa en la **Figura 3.8** sólo se dio medio giro al modelo debido a su simetría respecto al eje Y.



**Figura 3.8** Ángulos de análisis

### 3.3.4. RUGOSIDADES

El modelo se analizó para dos posibles escenarios. El primer escenario se realizó considerando que el edificio se encontrará localizado en una franja costera plana, lo cual es catalogado por el MOC - DV (2008) como terreno Tipo 1, el cual se define como “terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua”.

El segundo escenario se planteó como “terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones”. Para tal fin se colocaron en el piso del túnel elementos cúbicos de 3 cm de lado, espaciados a 20 cm entre sí a ejes (**Figura 3.9**), los cuales han sido fabricados y calibrados en pruebas realizadas en el túnel de viento del Instituto de Ingeniería.



**Figura 3.9** Rugosidades para simulación de categoría de terreno 2

## 3.4. ESCALAS DE SIMILITUD

Para la correcta reproducción del fenómeno de estudio a escala en una prueba experimental, se requiere que las variables del prototipo y del modelo sean similares; sin embargo, en ingeniería de viento hay una extensa cantidad de variables involucradas en los fenómenos estudiados, por lo mismo se requiere enfocarse en aquellas que afectan de forma significativa al caso particular de estudio (Sánchez, J., 2004). De esta forma se han desarrollado las escalas de similitud que engloban a las diferentes variables involucradas.

### 3.4.1. SIMILITUD DINÁMICA

La similitud dinámica implica que la distribución de fuerzas en el flujo del modelo sea tal que las fuerzas sean paralelas en puntos homólogos al flujo real y que además mantengan

una relación constante entre sus magnitudes. Para asegurar el cumplimiento de la similitud dinámica se emplean los parámetros: Número de Reynolds y Número de Froude

El número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia y viscosas que actúan en el flujo por medio de la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{Ul}{\nu} \quad (3.1)$$

donde

$R_e$ , número de Reynolds

$U$ , velocidad del viento, en m/s

$l$ , parámetro de longitud, en m

$\nu$ , viscosidad cinemática, en  $\text{cm}^2/\text{s}$

El número de Reynolds tiene una gran importancia en estructuras con superficies curvas y en estructuras con rugosidad en su superficie. En estructuras prismáticas con bordes agudos el número de Reynolds es independiente debido a que el flujo se separa en los bordes de la estructura (Simiu, E. y Scanlan, R., 1978). La estructura que se analiza en la presente tesis tiene múltiples bordes agudos además de contar con superficie lisa, por lo que el número de Reynolds no se tomará en cuenta para la reproducción a escala del fenómeno.

El número de Froude relaciona las fuerzas de inercia del flujo con las fuerzas gravitacionales que actúan en la estructura por medio de la siguiente expresión:

$$F_r = \frac{U^2}{gl} \quad (3.2)$$

donde

$F_r$ , número de Froude

$g$ , gravedad, en  $\text{m}/\text{s}^2$

En edificios altos el número de Froude no tiene un impacto significativo debido a que las cargas permanentes gravitacionales son tomadas directamente por la cimentación y no interactúan con las vibraciones inducidas por el viento en el edificio. Adicionalmente, al estudiarse un modelo rígido, el número de Froude no influye en los resultados esperados.

#### 3.4.2. SIMILITUD CINÉTICA

La similitud cinética implica que el flujo en el prototipo y el del modelo estén constituidos por líneas de corrientes geoméricamente semejantes. En estudios de capa límite se requiere reproducir en forma adecuada la capa límite para asegurar que el perfil de velocidad media y las características de turbulencia del flujo en el modelo coincidan con el flujo real que se desea reproducir.

#### 3.4.3. SIMILITUD GEOMÉTRICA

En estudios de túnel de viento surge la necesidad de disminuir las dimensiones de la estructura (prototipo) para representarlo en un modelo que facilite el desarrollo de la prueba; el empleo de modelos grandes ocasiona un efecto de bloqueo con las paredes del túnel de viento. La similitud geométrica implica que las dimensiones de los elementos aerodinámicamente relevantes del prototipo y el modelo tienen una relación entre sí, representado mediante la siguiente expresión:

$$l_e = \frac{l_p}{l_m} \quad (3.3)$$

donde

$l_e$ , escala geométrica, adimensional

$l_p$ , parámetro de longitud del prototipo, en m

$l_m$ , parámetro de longitud del modelo, en m

Para fines de esta investigación se decidió emplear la escala 1:350, con la cual se evita el efecto de bloqueo  $\left( \frac{A_m}{A_r} \leq 5\% \right)$ .

donde

$A_m$ , área de sección transversal del modelo

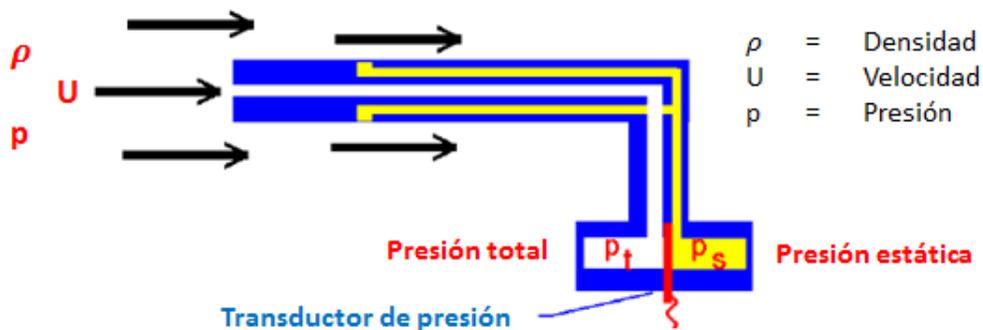
$A_t$ , área de sección transversal de la sección de pruebas

### 3.5. PROCEDIMIENTO REALIZADO EN PRUEBA EXPERIMENTAL

#### 3.5.1. TUBO PITOT

La velocidad en el túnel de viento es una de las variables que caracterizan el flujo que se desea reproducir en el ensayo, por lo mismo se requiere de un transductor de velocidad para llevar el registro de la misma. El transductor de velocidad empleado en el túnel de viento de la UNAM es un tubo pitot (**Figura 3.10**), el cual está conformado por dos tubos, el primero con orientación hacia la corriente incidente, mientras que el otro está conectado a unos orificios laterales, alejados lo suficiente de la sección inicial y orientados perpendicular a la corriente incidente.

En la presente prueba se lleva el registro de las presiones total y estática con ayuda del tubo Pitot. La toma de la presión total se registra con el tubo orientado hacia la corriente incidente mientras que la presión estática se registra con los orificios orientados en forma perpendicular.



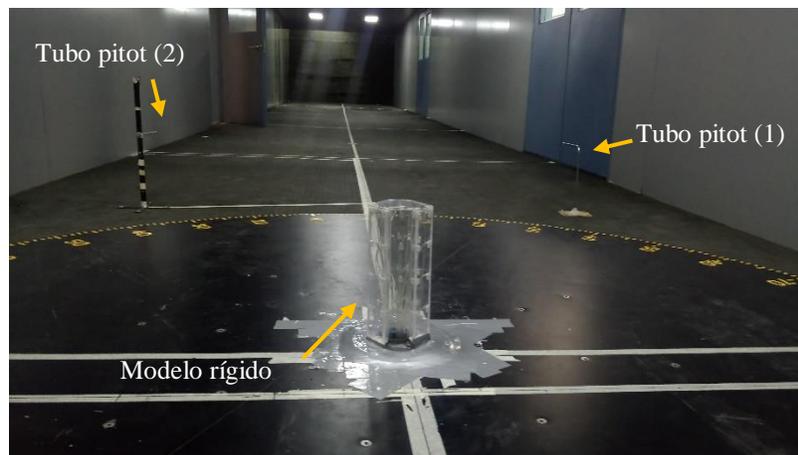
**Figura 3.10 Esquema de un tubo Pitot (Benson, T., s.a.)**

#### 3.5.2. INSTRUMENTACIÓN DE PRUEBA

Primero se procedió a alinear el modelo sobre la mesa giratoria de tal forma que la cara A quedara perpendicular al eje longitudinal de la sección de pruebas. El modelo se colocó sobre una placa metálica que cubriera parte del orificio por donde pasan las mangueras hacia el

módulo de escaneo de presión. Una vez alineado se procedió a sellar cualquier abertura con cinta industrial para evitar cualquier fuga, asimismo se colocó la suficiente cinta para que el modelo quedara anclado y de esta forma no tuviera movimiento durante el desarrollo de las pruebas.

Posteriormente se colocaron dos tubos pitot en ambas esquinas de la sección de pruebas (Figura 3.11); el primer tubo pitot se encargó de registrar la presión total y la presión estática necesarias para los cálculos de los coeficientes de presión, por otra parte el segundo tubo pitot sirvió como referencia al primero para asegurar que la presión registrada fuera la misma en toda el área de estudio.



**Figura 3.11 Instrumentación de prueba**

Las mangueras que llevan a los taps, así como a los tubos pitot se conectaron en los módulos de escaneo de presión; los taps se conectaron en los sensores 1 – 63, mientras que los tubos pitot se conectaron en los sensores 66 (presión de referencia), 67 (presión estática) y 68 (presión total).

Para las pruebas con rugosidades relativas a terreno tipo 2 descritas en el apartado 3.3.4, se anclaron las piezas de madera en el piso del túnel con tornillos para evitar su desprendimiento durante el desarrollo de las mismas.

### 3.5.3. REGISTRO DE DATOS

El registro de datos se realizó con el software especializado del túnel de viento, el cual se encarga de realizar los giros de la mesa de forma automática el registro de los datos y además

muestra en forma gráfica los valores de presión para cada uno de los sensores conectados al modelo y los tubos pitot. De esta forma se programaron las orientaciones de análisis y el tiempo de pruebas anteriormente mencionadas, así como una frecuencia de registro de 473.48 datos por segundo.

La curva de calibración que relaciona las rpm con la velocidad en la zona de pruebas No.1 corresponde al centro de la sección por lo que se realiza una ligera corrección para que la presión registrada por los tubos pitot sea similar a la esperada. La velocidad de giro empleada para cada prueba se enlista a continuación:

- Primera prueba: Sin rugosidades (S/R) / Velocidad: 9.07 m/s / 359 rpm
- Segunda prueba: Sin rugosidades (S/R) / Velocidad: 11.25 m/s / 442 rpm
- Tercera prueba: Con rugosidades (C/R) / Velocidad: 9.07 m/s / 335 rpm
- Cuarta prueba: Con rugosidades (C/R) / Velocidad: 11.25 m/s / 415 rpm

La velocidad angular del ventilador se ingresa de forma manual en la sala de control para posteriormente iniciar la prueba revisando que no se presenten anomalías durante el desarrollo de la misma. Se registraron aproximadamente 28 000 datos en cada sensor para cada orientación.

### 3.5.4. PROCESO DE DATOS

Se realizó una limpieza de los datos eliminando aquellos que correspondían a los primeros 25 segundos por el tiempo que toma el giro de la mesa y la estabilización del flujo; de los datos restantes se eliminaron los primeros 2.5 segundos y los dos últimos 2.5 segundos. De esta forma se obtuvo un tiempo neto de prueba de 30 segundos con aproximadamente 14 000 datos en cada sensor para cada orientación.

Posteriormente se procedió a obtener el promedio de las 14 000 presiones registradas en cada uno de los sensores por cada orientación, los cuales se ordenaron en forma de tablas para facilitar su procesamiento. Con los promedios obtenidos para cada ensayo es necesario revisar que las presiones del tubo pitot (estática y total) se mantengan constantes para cada orientación en una misma prueba.

Por último se calcularon los coeficientes de presión para cada caso de análisis con la Macro programada en VBA (Visual Basic for Applications) que se muestra en el Anexo A, la cual

emplea la expresión del apartado 3.5.5 para el cálculo de los coeficientes y posteriormente los resultados se almacenan en un nuevo archivo.

### 3.5.5. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE PRESIÓN

Los coeficientes de presión se calcularon con la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{P_{tap} - P_{est}}{P_{din}} \quad (3.4)$$

donde

$P_{tap}$ , presión registrada en el tap correspondiente, en Pa

$P_{est}$ , presión estática, en Pa

$P_{din}$ , presión dinámica, en Pa

### 3.6. CONCLUSIONES

El túnel de viento de la UNAM es muy completo en su tipo ya que brinda la facilidad de realizar ensayos para diferentes tipos de infraestructura en el país, con ello se dará paso a realizar avances en la investigación que complementen y actualicen las normatividad en el país.

La instrumentación de la prueba está llevada a cabo para obtener los coeficientes de presión del edificio estudiado de forma uniforme en todas sus caras. La correcta instrumentación y construcción del modelo es fundamental para los resultados pues la fuga del viento al interior del edificio y el desprendimiento de las mangueras ocasionaría resultados erróneos por lo que debería de repetirse la prueba.

La incertidumbre siempre está ligada a cualquier experimento debido a que no es posible tener control de todas las variables, sin embargo, es indispensable asegurar que el error esperado sea el mínimo posible para tener confianza en los resultados.

### 3.7. REFERENCIAS

Barlow, J., et. al. (1999). *Low – speed wind tunnel testing* (3a ed.). New York: John Wiley & Sons. pp. 78 – 92.

Benson, T. (s.a.). *Pitot tube*. Disponible en: <https://go.nasa.gov/2tXsRgw> [Último acceso: 19 de marzo de 2018]

MOC -DV (2008). *Manual de Obras Civiles: Diseño por Viento* (2ª ed.). Ciudad de México: CFE.

Sánchez, J. (2004). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier – Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*. Capítulo 5: Ensayos de túnel aerodinámico, disponible en: <http://bit.ly/2u19Utx> [Último acceso: 19 de marzo de 2018]

Simiu, E. y Scanlan, R. (1978). *Wind effects on structures: An introduction to wind engineering* (3a ed.). New York: John Wiley & Sons.



**CAPÍTULO 4.  
PRUEBA EXPERIMENTAL EN  
TÚNEL DE VIENTO**

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

## 4.1. RESULTADOS

Para cada prueba realizada se obtuvieron 21 coeficientes de presión en cada uno de los 63 sensores instrumentados en el modelo, cantidad que corresponde cada una de las orientaciones analizadas por prueba. Dado que es una gran cantidad de información, resulta conveniente seleccionar solo aquellas que son más relevantes para la presente tesis.

Los coeficientes de presión obtenidos en cada sensor se graficaron para observar el comportamiento del viento en las regiones instrumentadas con el fin de decidir un criterio para identificar aquellas que resulten más desfavorables. El eje de las ordenadas corresponde al coeficiente de presión (adimensional), mientras que el de las abscisas corresponde al de la orientación (en grados). Se muestran las gráficas de los sensores que se localizan a la altura de 203 mm en el modelo y algunos distribuidos en la cubierta.

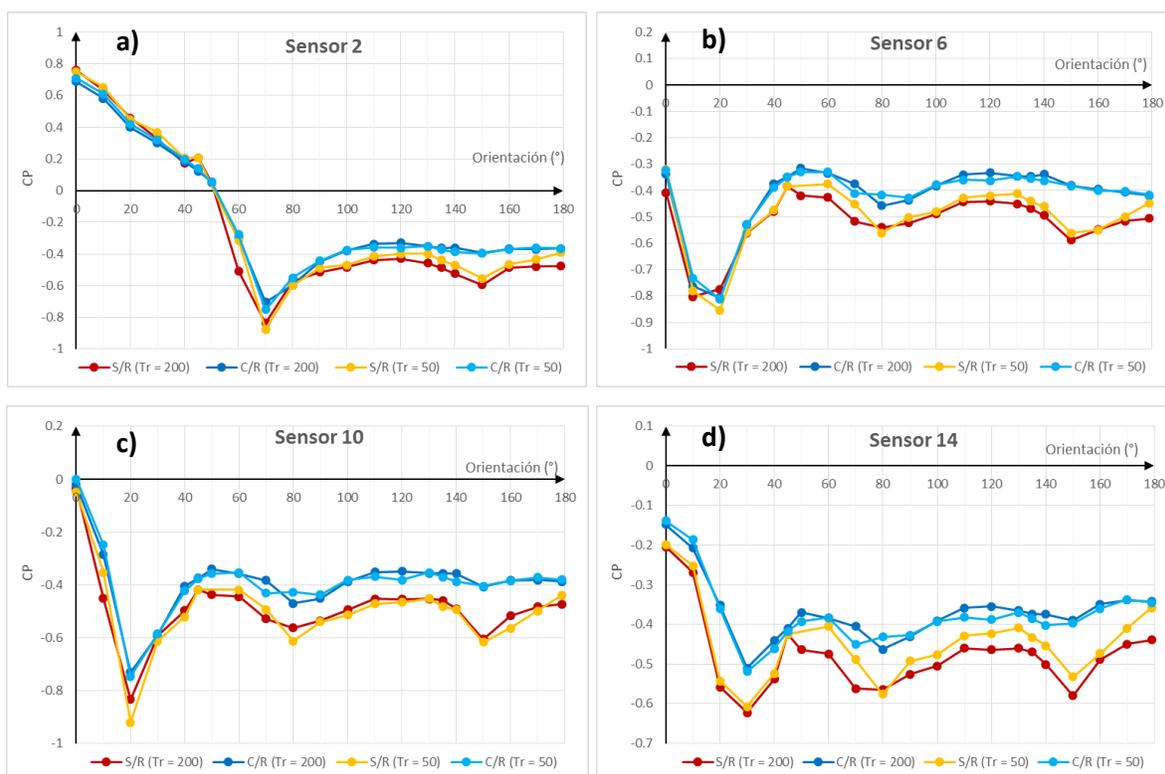
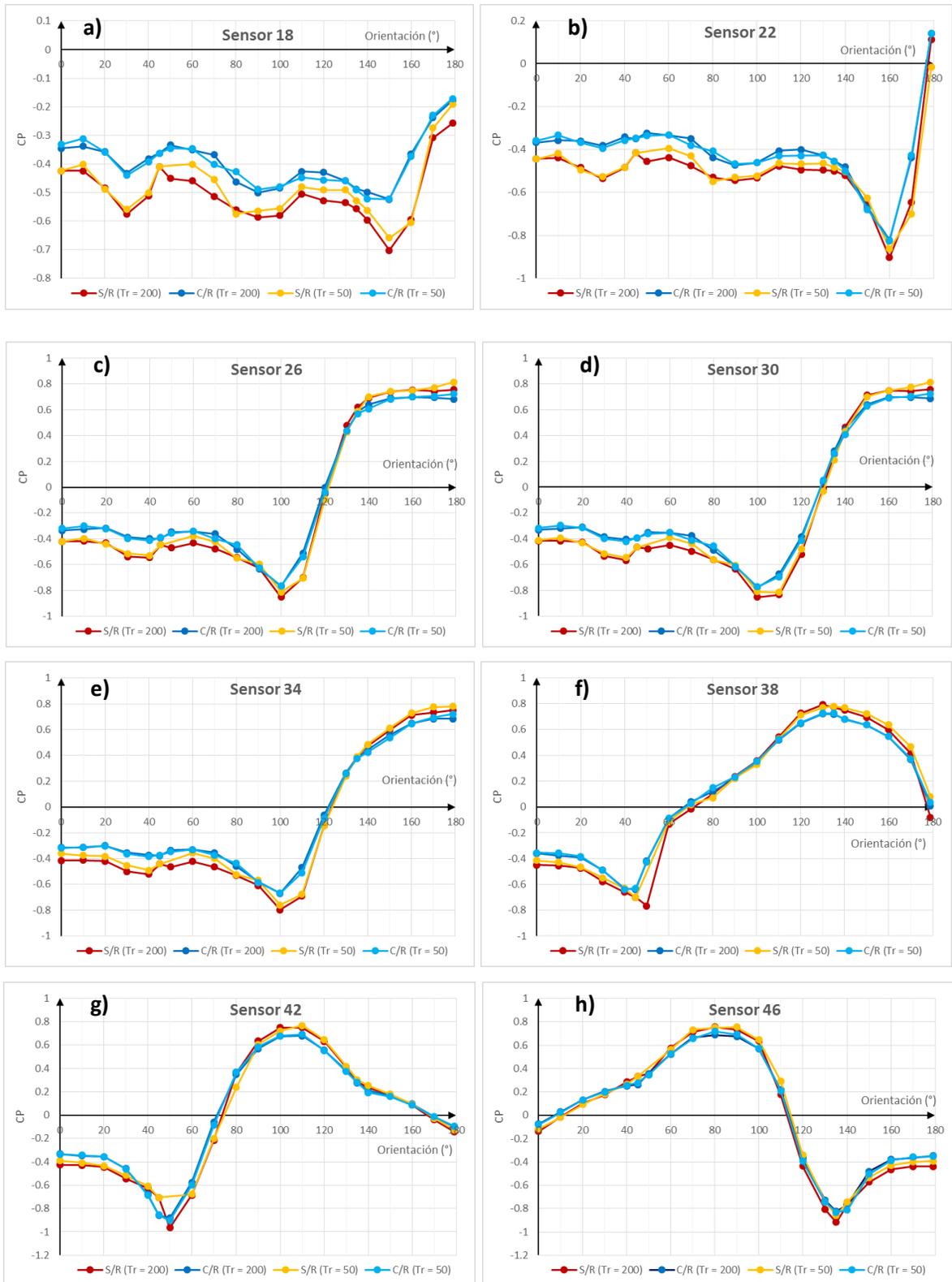


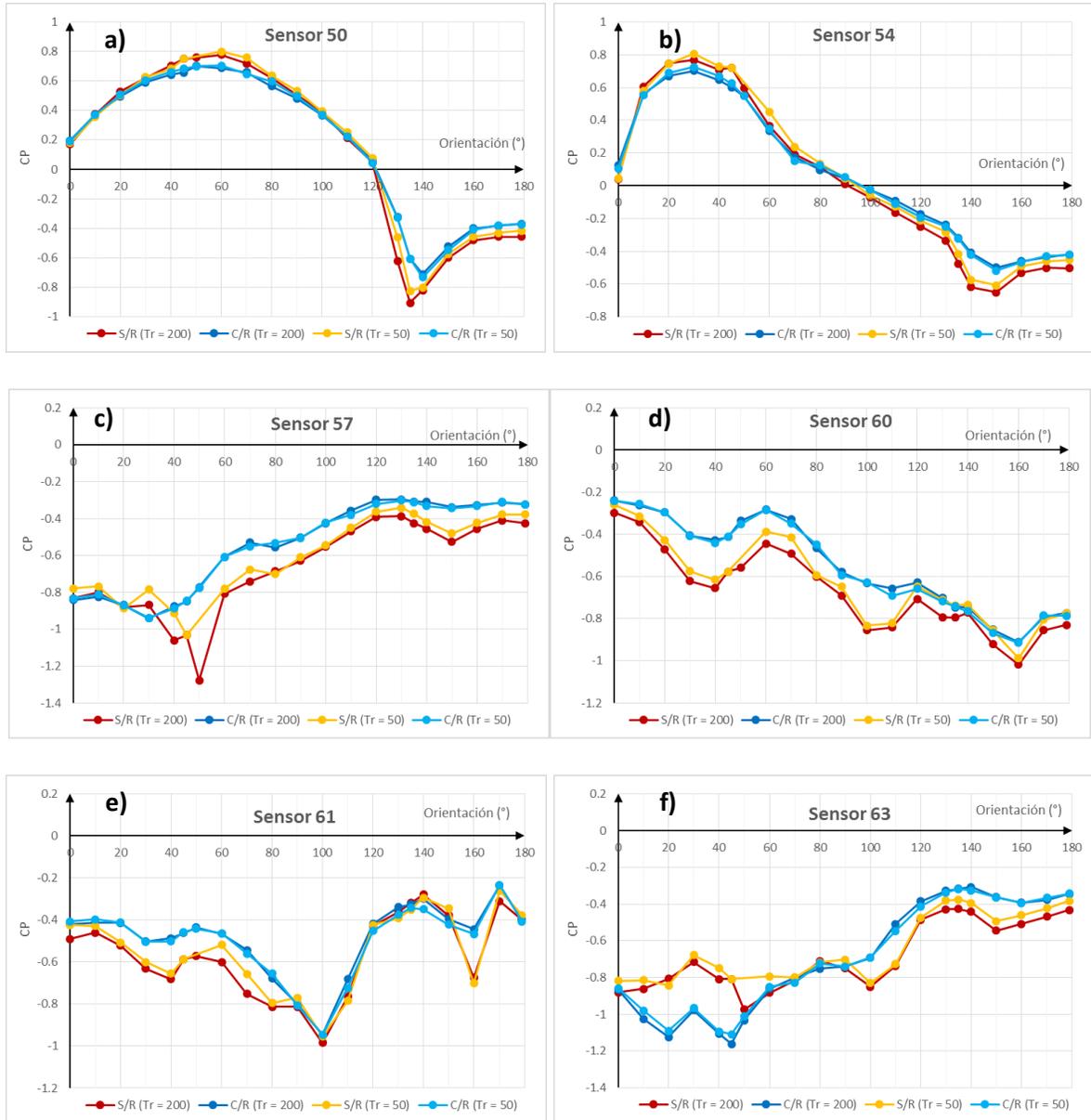
Figura 4.1 Relación de coeficientes presión con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 2, b) Sensor 6, c) Sensor 10, d) Sensor 14

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO



**Figura 4.2** Relación de coeficientes presiones con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 18, b) Sensor 22, c) Sensor 26, d) Sensor 30, e) Sensor 34, f) Sensor 38, g) Sensor 42, h) Sensor 46

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO



**Figura 4.3** Relación de coeficientes presiones con respecto al ángulo de incidencia. a) Sensor 50, b) Sensor 54, c) Sensor 57, d) Sensor 60, e) Sensor 61, f) Sensor 63

Los coeficientes de presión obtenidos para las orientaciones consideradas más desfavorables se muestran en las siguientes tablas:

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

**Tabla 4.1 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30°**

Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200
1	0.207	0.176	0.210	0.193	25	-0.524	-0.538	-0.395	-0.385	49	0.442	0.422	0.464	0.445
2	0.367	0.327	0.318	0.299	26	-0.515	-0.538	-0.398	-0.388	50	0.626	0.622	0.604	0.591
3	0.267	0.219	0.187	0.171	27	-0.495	-0.508	-0.386	-0.379	51	0.540	0.551	0.498	0.482
4	0.257	0.237	0.176	0.164	28	-0.464	-0.479	-0.373	-0.365	52	0.445	0.458	0.399	0.382
5	-0.608	-0.611	-0.635	-0.641	29	-0.537	-0.566	-0.402	-0.397	53	0.602	0.565	0.587	0.560
6	-0.558	-0.561	-0.529	-0.532	30	-0.516	-0.535	-0.400	-0.386	54	0.806	0.768	0.726	0.702
7	-0.546	-0.548	-0.539	-0.539	31	-0.505	-0.511	-0.392	-0.382	55	0.707	0.682	0.601	0.572
8	-0.530	-0.518	-0.502	-0.508	32	-0.490	-0.493	-0.381	-0.373	56	0.574	0.571	0.465	0.443
9	-0.624	-0.629	-0.601	-0.610	33	-0.521	-0.559	-0.401	-0.395	57	-0.785	-0.868	-0.939	-0.941
10	-0.613	-0.591	-0.585	-0.590	34	-0.454	-0.500	-0.364	-0.355	58	-0.488	-0.541	-0.399	-0.397
11	-0.599	-0.599	-0.590	-0.595	35	-0.428	-0.454	-0.345	-0.336	59	-0.503	-0.545	-0.372	-0.364
12	-0.578	-0.573	-0.535	-0.539	36	-0.414	-0.442	-0.339	-0.335	60	-0.576	-0.622	-0.408	-0.405
13	-0.539	-0.551	-0.421	-0.412	37	-0.555	-0.580	-0.503	-0.500	61	-0.600	-0.633	-0.504	-0.503
14	-0.607	-0.623	-0.519	-0.510	38	-0.550	-0.577	-0.489	-0.491	62	-0.695	-0.712	-0.746	-0.735
15	-0.611	-0.635	-0.505	-0.501	39	-0.507	-0.565	-0.488	-0.483	63	-0.678	-0.716	-0.967	-0.978
16	-0.586	-0.608	-0.467	-0.460	40	-0.513	-0.541	-0.467	-0.462					
17	-0.492	-0.510	-0.372	-0.364	41	-0.561	-0.590	-0.520	-0.515					
18	-0.559	-0.576	-0.440	-0.432	42	-0.516	-0.544	-0.461	-0.457					
19	-0.514	-0.534	-0.405	-0.405	43	-0.502	-0.520	-0.463	-0.460					
20	-0.485	-0.492	-0.374	-0.369	44	-0.468	-0.500	-0.458	-0.452					
21	-0.503	-0.521	-0.377	-0.366	45	0.172	0.149	0.212	0.206					
22	-0.527	-0.536	-0.395	-0.382	46	0.183	0.176	0.200	0.203					
23	-0.468	-0.480	-0.354	-0.350	47	0.141	0.150	0.153	0.146					
24	-0.438	-0.453	-0.346	-0.342	48	0.050	0.067	0.062	0.057					

**Tabla 4.2 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°**

Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200
1	-0.516	-0.518	-0.407	-0.410	25	-0.842	-0.863	-0.635	-0.647	49	0.196	0.185	0.233	0.227
2	-0.469	-0.484	-0.375	-0.380	26	-0.813	-0.853	-0.765	-0.767	50	0.392	0.386	0.373	0.368
3	-0.441	-0.441	-0.352	-0.356	27	-0.810	-0.844	-0.721	-0.721	51	0.354	0.356	0.311	0.311
4	-0.411	-0.400	-0.330	-0.335	28	-0.801	-0.842	-0.722	-0.729	52	0.314	0.299	0.258	0.253
5	-0.476	-0.490	-0.368	-0.372	29	-0.928	-0.994	-1.017	-1.033	53	-0.201	-0.199	-0.103	-0.106
6	-0.481	-0.489	-0.378	-0.383	30	-0.809	-0.853	-0.772	-0.777	54	-0.060	-0.072	-0.024	-0.026
7	-0.434	-0.437	-0.349	-0.350	31	-0.827	-0.862	-0.773	-0.784	55	-0.001	-0.002	0.018	0.017
8	-0.407	-0.410	-0.331	-0.337	32	-0.837	-0.863	-0.769	-0.778	56	-0.054	-0.050	-0.031	-0.032
9	-0.432	-0.456	-0.338	-0.343	33	-0.880	-0.927	-0.907	-0.913	57	-0.544	-0.553	-0.422	-0.426
10	-0.514	-0.494	-0.382	-0.387	34	-0.759	-0.797	-0.667	-0.669	58	-0.526	-0.609	-0.491	-0.514
11	-0.435	-0.440	-0.344	-0.349	35	-0.789	-0.813	-0.698	-0.694	59	-0.477	-0.484	-0.374	-0.382
12	-0.390	-0.394	-0.321	-0.324	36	-0.779	-0.803	-0.686	-0.688	60	-0.834	-0.855	-0.627	-0.631
13	-0.456	-0.471	-0.362	-0.365	37	0.229	0.260	0.289	0.295	61	-0.954	-0.985	-0.947	-0.946
14	-0.476	-0.505	-0.393	-0.390	38	0.329	0.357	0.353	0.349	62	-1.049	-1.222	-1.433	-1.505
15	-0.439	-0.457	-0.365	-0.366	39	0.279	0.288	0.254	0.255	63	-0.829	-0.850	-0.691	-0.693
16	-0.435	-0.450	-0.378	-0.377	40	0.162	0.192	0.157	0.151					
17	-0.476	-0.501	-0.412	-0.416	41	0.581	0.592	0.577	0.578					
18	-0.555	-0.579	-0.479	-0.485	42	0.720	0.750	0.679	0.676					
19	-0.558	-0.589	-0.490	-0.498	43	0.617	0.665	0.557	0.551					
20	-0.577	-0.589	-0.489	-0.496	44	0.524	0.547	0.432	0.430					
21	-0.490	-0.517	-0.450	-0.457	45	0.419	0.391	0.403	0.394					
22	-0.523	-0.532	-0.461	-0.462	46	0.647	0.634	0.572	0.571					
23	-0.500	-0.514	-0.449	-0.450	47	0.586	0.583	0.488	0.483					
24	-0.491	-0.516	-0.473	-0.472	48	0.461	0.487	0.382	0.377					

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

**Tabla 4.3 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°**

Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200	Sensor	S/R, Tr=50	S/R, Tr=200	C/R, Tr=50	C/R, Tr=200
1	-0.535	-0.552	-0.365	-0.367	25	0.276	0.264	0.335	0.337	49	-0.586	-0.623	-0.556	-0.536
2	-0.555	-0.595	-0.396	-0.393	26	0.741	0.740	0.684	0.689	50	-0.573	-0.600	-0.548	-0.524
3	-0.553	-0.584	-0.390	-0.381	27	0.660	0.662	0.557	0.561	51	-0.585	-0.599	-0.551	-0.524
4	-0.516	-0.534	-0.358	-0.355	28	0.535	0.545	0.435	0.437	52	-0.580	-0.605	-0.534	-0.506
5	-0.542	-0.574	-0.379	-0.376	29	0.369	0.289	0.386	0.373	53	-0.544	-0.583	-0.435	-0.425
6	-0.561	-0.588	-0.382	-0.382	30	0.702	0.714	0.628	0.641	54	-0.608	-0.651	-0.518	-0.500
7	-0.514	-0.542	-0.353	-0.346	31	0.595	0.629	0.509	0.518	55	-0.629	-0.672	-0.508	-0.490
8	-0.501	-0.535	-0.353	-0.344	32	0.447	0.507	0.392	0.396	56	-0.603	-0.651	-0.466	-0.456
9	-0.550	-0.599	-0.390	-0.390	33	-0.422	-0.467	-0.285	-0.288	57	-0.481	-0.527	-0.344	-0.337
10	-0.616	-0.606	-0.404	-0.407	34	0.611	0.597	0.535	0.555	58	-0.660	-0.718	-0.521	-0.511
11	-0.550	-0.576	-0.373	-0.374	35	0.560	0.575	0.467	0.483	59	-0.768	-0.830	-0.872	-0.853
12	-0.505	-0.529	-0.345	-0.340	36	0.455	0.474	0.373	0.382	60	-0.855	-0.921	-0.869	-0.852
13	-0.525	-0.566	-0.382	-0.382	37	0.534	0.522	0.529	0.537	61	-0.347	-0.380	-0.423	-0.395
14	-0.533	-0.580	-0.398	-0.389	38	0.724	0.695	0.636	0.636	62	-0.747	-0.732	-0.726	-0.690
15	-0.515	-0.558	-0.374	-0.369	39	0.681	0.617	0.520	0.522	63	-0.492	-0.544	-0.365	-0.362
16	-0.502	-0.533	-0.355	-0.344	40	0.527	0.497	0.390	0.386					
17	-0.587	-0.632	-0.423	-0.427	41	0.030	-0.040	0.036	0.035					
18	-0.658	-0.701	-0.523	-0.524	42	0.180	0.166	0.159	0.170					
19	-0.632	-0.676	-0.472	-0.471	43	0.182	0.168	0.137	0.139					
20	-0.602	-0.630	-0.432	-0.416	44	0.152	0.112	0.077	0.087					
21	-0.640	-0.690	-0.747	-0.735	45	-0.586	-0.615	-0.589	-0.555					
22	-0.626	-0.658	-0.680	-0.671	46	-0.533	-0.573	-0.504	-0.480					
23	-0.617	-0.655	-0.661	-0.654	47	-0.543	-0.562	-0.510	-0.485					
24	-0.597	-0.640	-0.609	-0.610	48	-0.579	-0.555	-0.517	-0.481					

### 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se observa que existe cierta dispersión en los coeficientes de presión entre las pruebas sin rugosidades y con rugosidades cuando los sensores están ubicados en el lado del sotavento; en el área del barlovento se aprecia una semejanza entre los resultados de las 4 pruebas con mínimas variaciones. El factor en común de las diferencias de las pruebas son la superficie rugosa empleada, lo cual puede indicar que ésta no sea la indicada para el estudio de edificios de gran altura ya que como menciona Hong, E. (2017) debe de fabricarse una rugosidad especial para cada tipo de estructura que se desea analizar, sin embargo, esto se complica por cuestiones de presupuesto y facilidad. Las rugosidades que se emplean en el presente estudio se han utilizado para pruebas de edificaciones de baja altura como naves industriales y terminales de aeropuerto con buenos resultados. Cabe destacar que actualmente se están ensayando diferentes tipos de rugosidades en el túnel de viento de la UNAM y se decidió emplear las actuales para analizar los resultados obtenidos con la herramienta disponible.

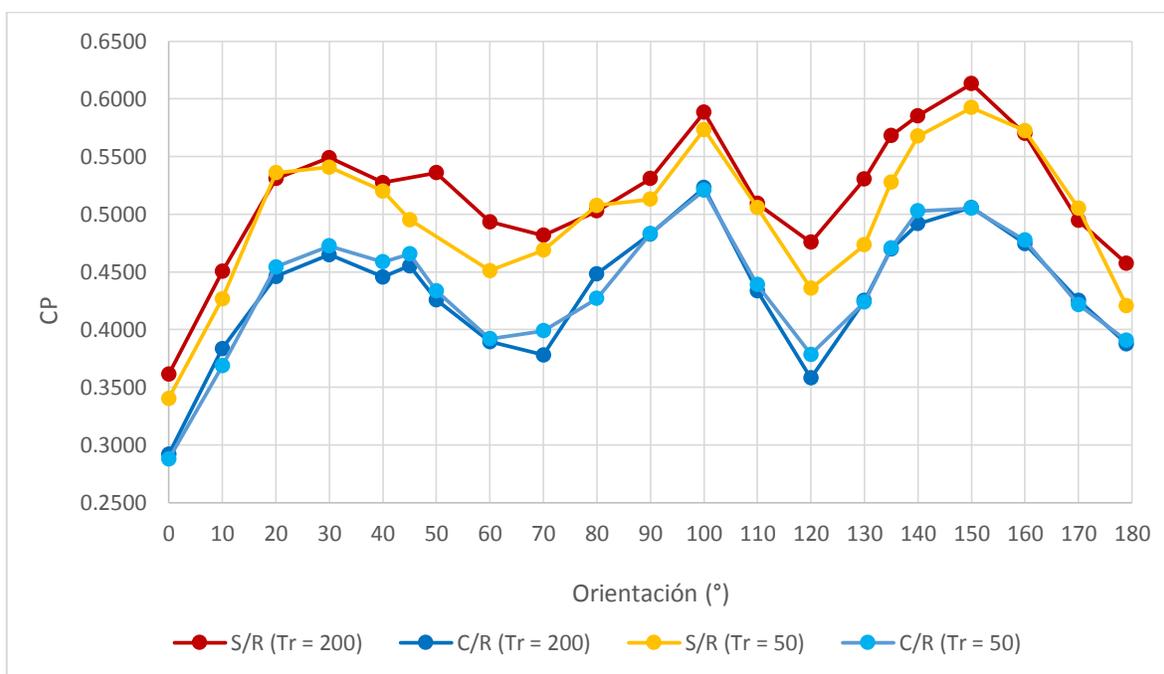
Los sensores con mayor dispersión entre sí son los que están localizados en las caras B y C, teniendo la máxima dispersión en la arista que une dichas caras. Esta zona está en el lado del sotavento para todas las incidencias del viento y dada la geometría del edificio analizado, es

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

probable que las succiones tengan grandes variaciones debido a la alta turbulencia en la zona, lo que incrementaría la dispersión observada anteriormente.

En todos los sensores se observa que el coeficiente de presión máximo registrado es 0.8, localizado en los sensores a 207 mm de altura en el modelo. Este resultado coincide con los valores indicados en la normatividad consultada para barlovento en edificios prismáticos de base cuadrada. El coeficiente alcanza el máximo de 0.8 cuando la incidencia del viento es lo más perpendicular a la cara en donde se localiza dicho sensor.

Para determinar las orientaciones que provocarían los efectos más desfavorables en la edificación en forma general, se promedió los valores absolutos de los 63 coeficientes de presión para cada una de las orientaciones analizadas bajo el supuesto de que las condiciones más desfavorables se presentarán cuando la suma de todas las fuerzas actuantes sea la mayor posible. La gráfica obtenida se muestra en la **Figura 4.4**.



**Figura 4.4 Promedio de coeficientes de presión por incidencia de viento**

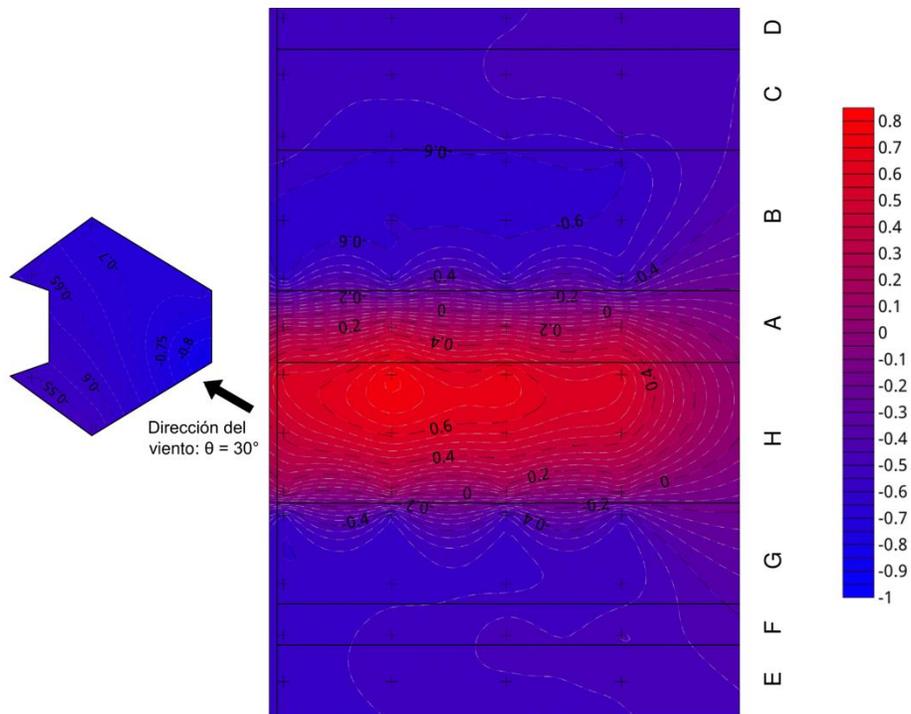
En la **Figura 4.4** se observa que las gráficas entre las pruebas “sin rugosidades” y “con rugosidades” no coinciden pero esto se debe a las variaciones de los CP en el sotavento que se explicó anteriormente, sin embargo, la tendencia de las 4 es bastante similar presentándose 3 picos en las orientaciones: 150°, 100° y 30°. Los valores obtenidos de la prueba “Sin

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

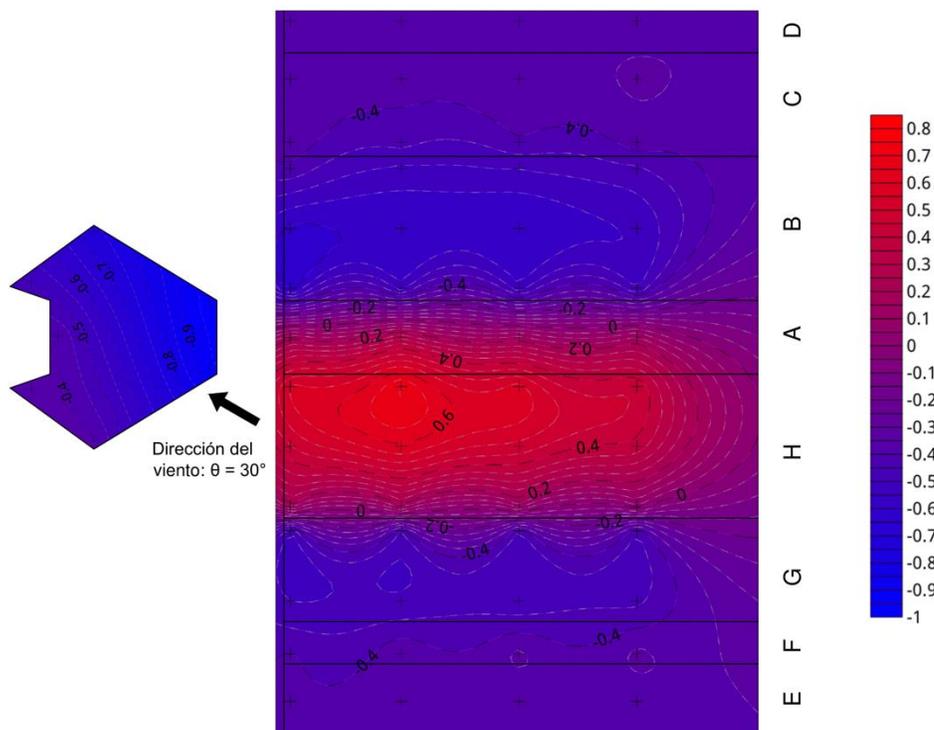
rugosidades” con un tiempo de retorno de 200 años son los más altos de las 4 pruebas realizadas.

Con ayuda del programa Surfer® se complementó el análisis al realizar una interpolación entre los coeficientes de presión, creando con esto curvas de igual magnitud. Esto permite observar de manera gráfica la distribución de los coeficientes de presión en la superficie del modelo. La numeración de los sensores se mostró en la **Figura 3.7**.

En los gráficos creados se observa que la distribución de los coeficientes es muy similar entre pruebas del mismo tipo, sean “Con rugosidades” o “Sin rugosidades”, sin embargo se aprecia cierta diferencia entre ambos pares de pruebas por lo que en los siguientes gráficos se muestran los resultados con ambos tipos de superficies rugosas, pero sólo con la velocidad de un periodo de retorno de 200 años para realizar la comparación.



**Figura 4.5** Coeficientes de presión, incidencia del viento:  $30^\circ$ ; Sin rugosidades,  $Tr = 200$  años



**Figura 4.6 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 30°; Con rugosidades, Tr = 200 años**

Con una incidencia del viento de 30° (Figura 4.5 y 4.6) se observa que el flujo se separa en las aristas AB y GH, comportamiento esperado por la geometría del modelo. En la zona del barlovento se aprecia cierta similitud en la distribución de los coeficientes de presión entre ambas pruebas, con una tendencia creciente proporcional al incremento de la altura, concentrándose el máximo aproximadamente al 75% de la altura, a partir de la cual comienzan a disminuir los CP.

La diferencia apreciable entre la distribución de los coeficientes de ambas pruebas se debe a que la superficie rugosa modifica el perfil de velocidades teniendo velocidades más bajas conforme se acerca a la base de la sección de pruebas en comparación a una prueba con superficie lisa.

En la zona del sotavento, el cambio más abrupto se localiza en las aristas donde se separa el flujo por lo que los valores más grandes de succión están concentrados en la cara B y G. En el resto de caras las variaciones son mínimas.

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

En los coeficientes obtenidos para este caso de análisis se aprecia una cierta similitud a los coeficientes propuestos en el MOC -DV (2008), pues en la zona del barlovento se alcanza una magnitud cercana a 0.8 en la cara H. En la cara A no incide directamente el viento, sin embargo, se aprecia que existe empuje por lo que no se puede comparar con los coeficientes de muros laterales en el MOC -DV (2008). En las caras B y G se observan valores negativos indicando succión, la magnitud de estos coeficientes es muy cercana a -0.65 que indica el manual para muros laterales. En las caras C, D, E y F se observan mínimas variaciones entre sí con valores ligeramente superiores a -0.5 que indica el manual para muros en sotavento.

En la zona de la cubierta se observa que el flujo se desprende en las inmediaciones de la arista HA por lo que se presenta el coeficiente de succión más alto. En las figuras se observa una tendencia decreciente en magnitud en el sentido del flujo del viento, lo cual indica que el flujo tiende a adherirse a la superficie de la cubierta.

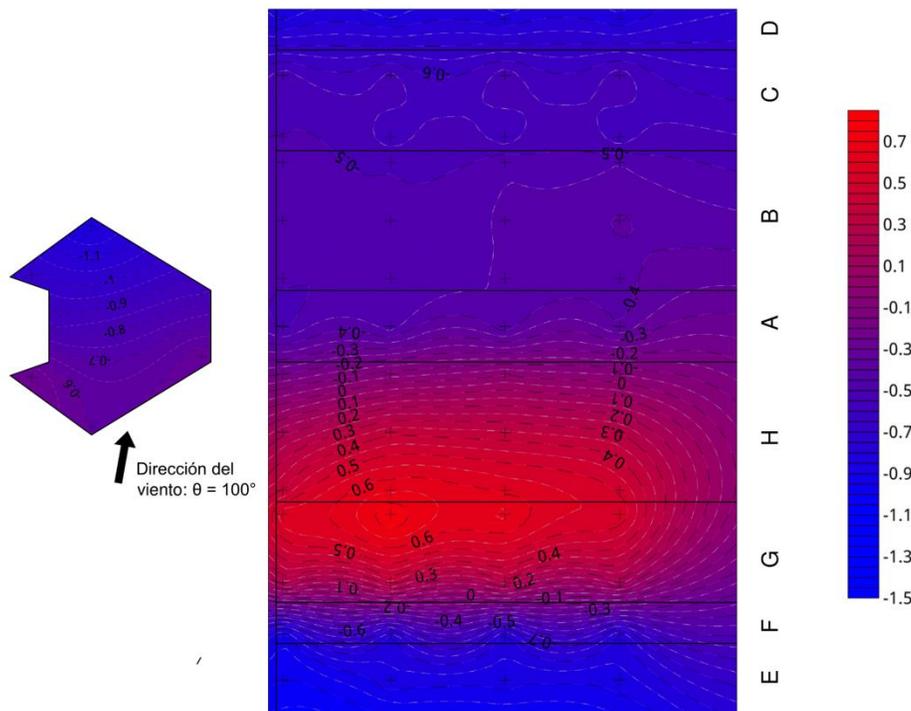
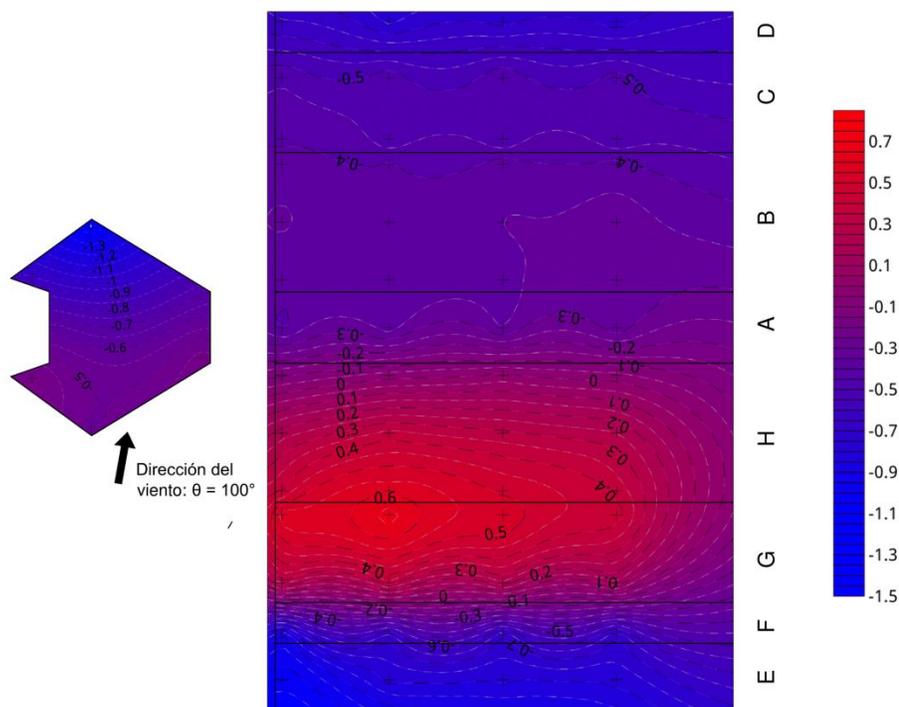


Figura 4.7 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°; Sin rugosidades, Tr = 200 años



**Figura 4.8 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 100°; Con rugosidades, Tr = 200 años**

En los resultados del ángulo de análisis de 100° (Figura 4.7 y 4.8) se observa que el flujo vuelve a separarse en las aristas del modelo, particularmente en las aristas HA y FG. En las caras G y H se observa una tendencia decreciente en la magnitud de los coeficientes en el mismo sentido del flujo, esto debido a que el viento incide cerca de la arista dividiendo el flujo en dos direcciones y provocando un efecto de separación entre el flujo y la superficie del modelo, no obstante la succión se llega a presentar hasta los bordes mencionados, mientras tanto sigue actuando el empuje en dichas caras.

Los coeficientes de presión más grandes vuelven a presentar una tendencia creciente en forma proporcional a la altura hasta alcanzar un punto máximo a partir del cual comienza a descender la magnitud.

En el sotavento se observa que las succiones de mayor magnitud se concentran en el entrante de la fachada principal del edificio, esto se presenta debido a la separación del flujo en la arista FG y también por la irregularidad en la geometría que provoca la entrante.

Realizando una comparación con los coeficientes del manual se aprecian diferencias notables. Los muros G y H están ubicados en el barlovento, sin embargo, no son

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

perpendiculares al ángulo de incidencia del flujo por lo que se aprecia la disminución de los coeficientes de presión a lo largo de los muros, no obstante se alcanza un CP máximo de 0.80, un poco menor al valor indicado en la normatividad para flujo normal a la cara. En esta orientación de análisis no se observa similitud en algún muro a los muros laterales del manual. Se presenta un caso particular derivado de la irregularidad de la edificación, localizado en las caras D, E y F, donde se presentan succiones muy altas, teniendo valores máximos cercanos a -1.00. En las caras B y C los valores están en el intervalo de -0.4 y -0.6.

En la zona de la cubierta se observa que la succión aumenta en el sentido del flujo, efecto diferente al que se presenta en el caso de análisis de 30°. Las magnitudes de los coeficientes en la cubierta son muy altas, alcanzado valores de hasta -1.5.

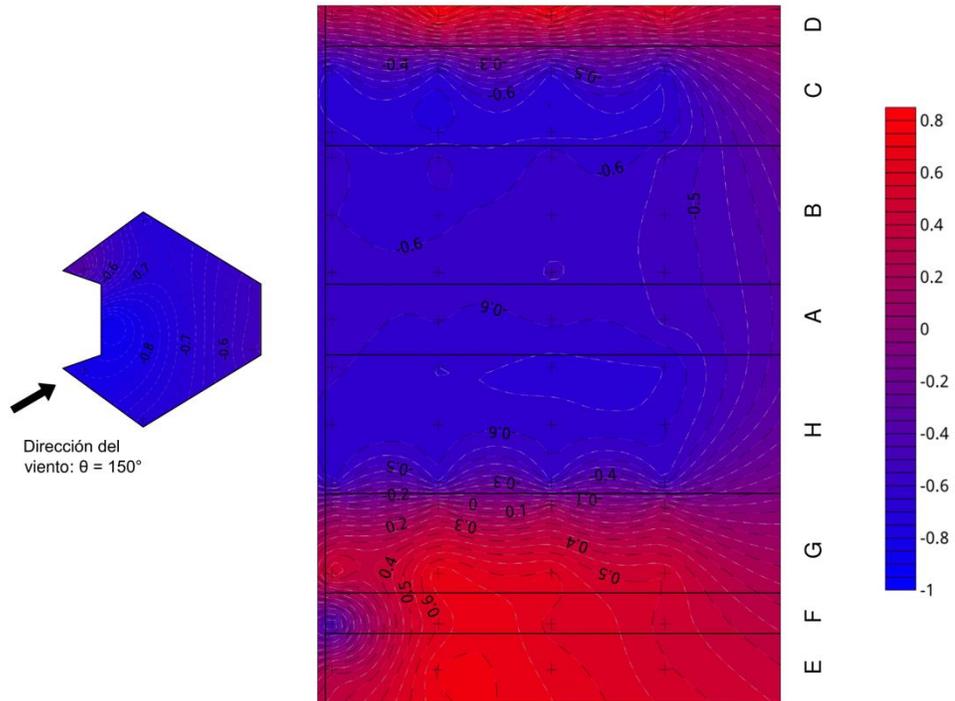
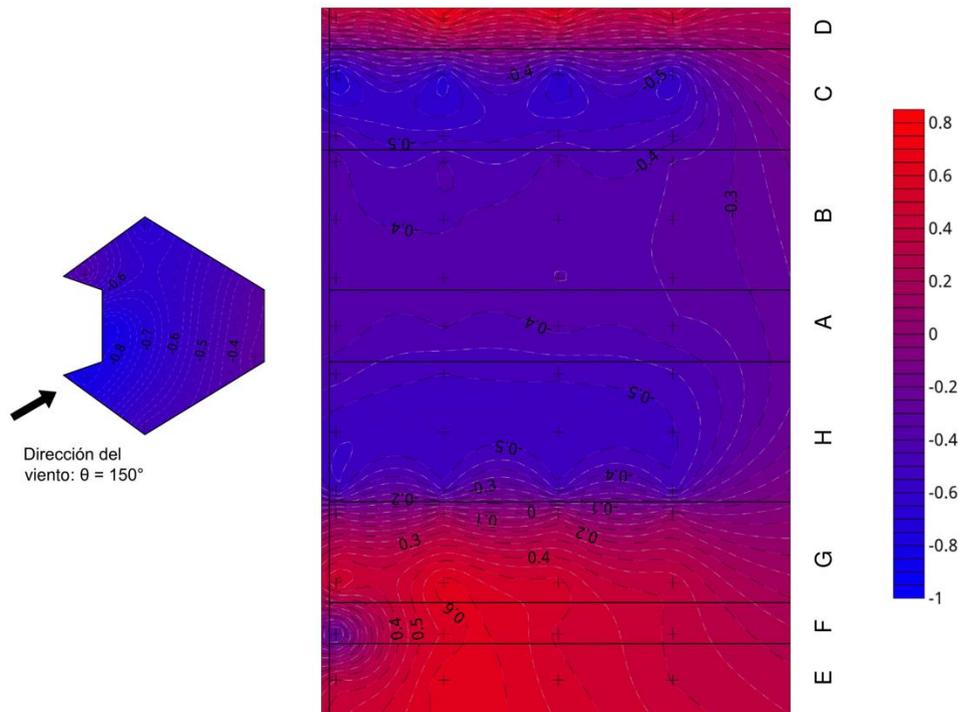


Figura 4.9 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°; Sin rugosidades, Tr = 200 años



**Figura 4.10 Coeficientes de presión, incidencia del viento: 150°; Con rugosidades, Tr = 200 años**

Con un ángulo de 150° (Figura 4.9 y 4.10) se vuelve a presentar la separación del flujo en los bordes del modelo, para este caso de análisis se presentó en los bordes CD y GH, concentrándose el barlovento en las caras D, E y F. Se vuelve a presentar una tendencia creciente de los coeficientes de presión conforme aumenta la altura hasta alcanzar un punto máximo.

Se observa que el sensor 33 registró succión a pesar de estar localizado en la zona del barlovento, lo cual se puede explicar como una consecuencia de la acción de la succión en la cubierta, combinado con el hecho de que en el muro no incide el viento en forma directa.

Dado que en el muro F se presentan empujes a pesar de que no incida directamente el viento, significa que los muros D y E generan un efecto local que provoca el estancamiento del flujo y en consecuencia la aparición de presiones positivas en dicho muro.

En la zona de la cubierta se presenta una distribución particular pues en el vértice de los muros F y G se presenta la mayor succión del caso de análisis con una tendencia decreciente

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

hacia el muro A, sin embargo, en el vértice de los muros C y D se observa un valor bajo de succión con una tendencia creciente hacia el muro C.

Para este caso de análisis se complica aún más realizar la comparación con el manual debido a que la irregularidad vuelve a tomar un papel importante en el análisis. Se observa que existen empujes en las caras D, E, F y G, con un valor máximo de 0.74, pero se observan ciertos efectos locales donde se presentan succiones. Por causa del entrante se observan succiones muy grandes en la cara C, alcanzando valores de -0.7. De igual forma se observan valores grandes en la cara H por la separación del flujo en la arista. En el resto de las caras la variación no es muy grande entre sí, con valores en su mayoría menores a -0.6.

Con las tres orientaciones analizadas se cubrieron tres posibles escenarios: Viento incidente sobre una superficie horizontal ( $30^\circ$ ), Viento incidente sobre una esquina con afectación en el entrante ( $100^\circ$ ) y Viento incidente sobre el entrante ( $150^\circ$ ). Con estos escenarios se pudo observar que la irregularidad del edificio toma un papel importante en su desempeño eólico pues supone condiciones no establecidas en el manual, razón por la cual en el mismo manual se recomienda realizar análisis en túnel de viento para estructuras que no cumplan con los supuestos de los procedimientos de análisis

### 4.2.1. CENTRO DE TORSIÓN

De forma adicional se calculó el centro de torsión de la estructura en los tres casos de análisis presentados, considerando sólo la forma geométrica de la estructura y el procedimiento establecido en el MOC para análisis estático. Este análisis debería de realizarse considerando las características del sistema estructural de la edificación, sin embargo, al carecer de éstas se realizó el análisis solo con la información disponible con el fin de mostrar las implicaciones directas que presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

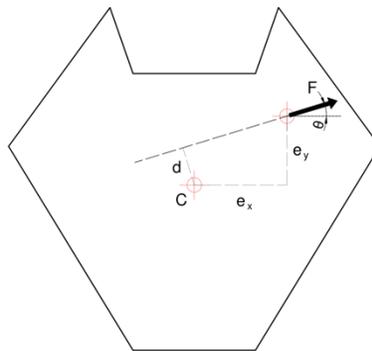
**Tabla 4.4 Excentricidad**

Incidencia del viento ( $\theta$ )	F (kN)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$e_x$ (m)	$e_y$ (m)	d (m)
$30^\circ$	21517.67	43.57	-27.39	21.67	3.18
$100^\circ$	23718.80	12.98	2.48	-4.93	4.25
$150^\circ$	21714.73	-61.22	-19.53	-41.48	2.85

## CAPÍTULO 4. PRUEBA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

En la **Tabla 4.4** se observa que las fuerzas resultantes se llegan a presentar muy alejadas del centroide de la estructura, lo cual implica que la irregularidad de la estructura propicia efectos significativos de torsión en el sistema estructural, ya que se modifica la distribución de las presiones en los muros, presentándose cambios abruptos en los coeficientes de presión y teniendo zonas en donde los coeficientes son de gran magnitud.

La mayor excentricidad se presenta cuando el ángulo incidente es de  $150^\circ$ , el cual se da cuando el viento incide directamente en el entrante del edificio, sin embargo, se observa que tiene el menor brazo de palanca. El caso de  $100^\circ$  tiene la menor excentricidad, pero se observa que tiene el mayor brazo de palanca, lo cual aunado a la magnitud de la fuerza resultante provoca el mayor efecto torsional de los tres casos; en este caso de análisis se observaron succiones muy altas en el entrante de la edificación



**Figura 4.11 Esquema de fuerza resultante y excentricidad**

Las excentricidades obtenidas pueden aumentar o disminuir en función del sistema estructural que se diseñe, tal y como muestra Guzmán, V. (2016) en donde los cambios de rigideces en un edificio alto, analizado bajo la acción del viento provocaron aumentos considerables en las excentricidades respecto a un modelo con la misma distribución de rigidez en todas las plantas.

### 4.3. REFERENCIAS

MOC -DV (2008). *Manual de Obras Civiles: Diseño por Viento* (2ª ed.). Ciudad de México – CFE.

Guzmán, V. (2016). *Efectos de torsión inducidos por el viento en edificios altos con diferente distribución de rigidez en planta*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hong, E. (2017). *Wall Pressure Coeficientes for Low to High Rise Buildings*. Electronic thesis and Dissertation Repository. 448. Disponible en: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4488> [Último acceso: 22/03/2018]



**CAPÍTULO 5.  
CONCLUSIONES**

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

Con base en los resultados presentados en el capítulo 4 se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se cumplió con los objetivos planteados de la tesis: Se logró calcular los coeficientes de presión para las 4 configuraciones de análisis propuestas y se analizaron las afectaciones por la irregularidad de la estructura.
- La distribución de los coeficientes de presión resultó bastante similar para las pruebas del mismo tipo: “Sin rugosidades” o “Con rugosidades”; sin embargo, se aprecian ciertas diferencias en los resultados entre ambos tipos de pruebas.
- Es importante realizar estudios de túnel de viento en edificios irregulares dado que en las condiciones analizadas se observa que la irregularidad de la estructura provoca distintas afectaciones que no podrían ser predichas y que no son contempladas en la normatividad aplicable.
- Las condiciones de irregularidad en la estructura provocan un incremento considerable en la magnitud de los coeficientes de presión.
- En la zona del barlovento no se apreciaron efectos fuera de lo normal ya que los coeficientes de presión no rebasaron el valor de 0.8 estipulado en la normatividad vigente para edificaciones rectangulares.
- Cuando el viento incidió directamente sobre el entrante se apreció un estancamiento del flujo que provocó que toda la zona estuviera bajo efecto de presión aunque no incidiera directamente sobre un muro de dicha zona.
- Para todas las condiciones que se analizaron se observó que el viento tiende a separarse en las aristas del modelo provocando succiones de gran magnitud en las caras inmediatas a dichos bordes, por lo que debe de tomarse especial cuidado en estas zonas al realizar el diseño de los recubrimientos y elementos estructurales.
- Los efectos observados en la cubierta no tienen una tendencia clara ya que los coeficientes de presión presentaron distintas variaciones en su magnitud y diferentes tendencias crecientes y decrecientes.

- Los coeficientes de presión en la cubierta indican que en esta zona de la estructura se presenta la mayor succión de todos los registros analizados, siendo una zona de alto riesgo ante un evento meteorológico de gran intensidad.
- La irregularidad de la estructura influye significativamente en la excentricidad torsional bajo la acción del viento

### 5.1. RECOMENDACIONES

En la presente tesis se analizó el efecto del viento en un edificio irregular alto, considerando dos tipos de terreno en las inmediaciones de la estructura. Se observó que en los bordes se presenta la separación del flujo y por la irregularidad se observan afectaciones de gran intensidad. Para futuras investigaciones se recomienda lo siguiente:

- Instrumentar un mayor número de sensores en las caras donde sólo se colocó una fila, con el fin de observar el efecto en los bordes y la distribución horizontal para diferentes condiciones de análisis.
- Ensayar incidencias del viento que sean normales a los muros del edificio.
- Ensayar diferentes geometrías de edificios irregulares.
- Ensayar con superficies rugosas de diferentes categorías escaladas específicamente para el estudio de estructuras de gran altura.
- Ensayar el efecto en edificios irregulares con edificaciones vecinas de gran altura.

## ANEXO A. MACRO PARA EL CÁLCULO DE CP

---

### Sub **CalculodeCP()**

```
'
' CalculodeCP Macro
' Calcula el coeficiente de presión a partir de los datos en el archivo de resultados
' Declaración de variables
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim m As Integer
Dim n As Integer
Dim S(1 To 63) As String
' Se crea un ciclo For para la iteración de las páginas en los libros
For i = 1 To 21
' Los datos comienzan en el renglón 5, columna 3
m = 5
n = 3
' Se activa el archivo de Resultados
Workbooks("Resultados Jueves (442 rpm).xlsx").Activate
' Se activa la hoja i del archivo de Resultados
Sheets(i).Select
' Se inicia un ciclo For para almacenar en la cadena S(j) los Coeficientes de presión
' calculados en el libro de resultados
For j = 1 To 63
' Se calcula el coeficiente de presión. La presión estática se encuentra en el renglón
' 30 columna 3; la presión dinámica se encuentra en el renglón 32, columna 3
S(j) = (Cells(m, n) - Cells(30, 3)) / Cells(32, 3)
' Se cambia al siguiente renglón
m = m + 1
' Si se llega al renglón 21 se pasa a la siguiente columna con datos y se inicia
```

## ANEXO A: MACRO PARA EL CÁLCULO DE CP

```
' desde el renglón 5
If m = 21 Then
    n = n + 2
    m = 5
End If
Next j
' Se activa el archivo de Coeficientes de presión
Workbooks("CP Jueves (442 rpm).xslm").Activate
' Se activa la hoja i del archivo de Coeficientes de presión
Sheets(i).Select
' Los datos comienzan en el renglón 5, columna 3
m = 5
n = 3
' Se inicia un ciclo For para almacenar en una celda los Coeficientes de presión
' almacenados en la cadena S(j)
For j = 1 To 63
    ' Se almacena en una celda el valor de la cadena S(j)
    Cells(m, n).Value = S(j)
    ' Se cambia al siguiente renglón
    m = m + 1
    ' Si se llega al renglón 21 se pasa a la siguiente columna con datos y se inicia
    ' desde el renglón 5
    If m = 21 Then
        n = n + 2
        m = 5
    End If
Next j
Next i
End Sub
```