



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**INGENIERA CIVIL - ESTRUCTURAS**

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL VIENTO EN CUBIERTAS DE NAVES  
INDUSTRIALES**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

**JOSÉ ÁNGEL TOALÁ SÁNZ**

TUTOR:

**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, D.F. AGOSTO 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	VI
<b>1. Resumen</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>2</b>
2.1. Revisión de la literatura . . . . .	2
2.1.1. Daño a edificaciones debido a vientos extremos . . . . .	5
2.1.2. Tipos de falla en láminas de acero . . . . .	6
2.2. Planteamiento del problema . . . . .	9
2.3. Justificación . . . . .	10
2.4. Alcances . . . . .	10
2.5. Objetivos . . . . .	10
<b>3. Descripción de la amenaza meteorológica</b>	<b>11</b>
3.1. Amenaza por viento . . . . .	11
3.2. Fenómenos meteorológicos de vientos fuertes . . . . .	11
3.2.1. Huracanes . . . . .	11
3.2.2. Tornados . . . . .	13
3.2.3. Tormentas severas o vaguadas . . . . .	15
3.3. Amenaza meteorológica en México . . . . .	16
3.3.1. Análisis de frecuencia acumulada para los ciclones en México . . . . .	21
<b>4. Aspectos generales del análisis numérico de cuerpos sometidos a cargas de viento</b>	<b>23</b>
4.1. Modelado numérico de fluidos en ANSYS FLUENT . . . . .	24
4.2. Modelo de turbulencia utilizado (modelo $k - \epsilon$ Realizable) . . . . .	26
<b>5. Aerodinámica de edificios bajos</b>	<b>29</b>
5.1. Descripción del Modelo Matemático en ANSYS FLUENT . . . . .	29
5.2. Resultados de los análisis . . . . .	32

---

<b>6. Comportamiento del sistema de techo con base en perfiles laminados de acero</b>	<b>44</b>
6.1. Descripción del Modelo Matemático en ANSYS MECHANICAL . . . . .	45
6.1.1. Mallado de los elementos . . . . .	49
6.1.2. Propiedades de los materiales . . . . .	51
6.1.3. Cargas y condiciones de apoyo . . . . .	52
6.1.4. Criterio de falla . . . . .	55
6.2. Resultados del análisis . . . . .	56
6.2.1. Efecto del espesor de la lámina . . . . .	59
6.3. Método para determinar la resistencia de desprendimiento en láminas de acero . . . . .	60
<b>7. Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de techo</b>	<b>62</b>
7.1. Metodologías para la estimación de daño . . . . .	62
7.2. Metodología utilizada . . . . .	63
7.3. Curvas de daño esperado . . . . .	65
7.4. Interpretación y comparación de resultados . . . . .	67
<b>8. Conclusiones</b>	<b>69</b>
8.1. Amenaza meteorológica en México . . . . .	69
8.2. Aerodinámica de edificios analizados . . . . .	69
8.3. Comportamiento de modelos de conexión de sistemas de techo analizados .	70
8.4. Evaluación de daños . . . . .	71
<b>Referencias</b>	<b>73</b>

# Índice de figuras

2.1. Panel de techo típico y arreglo de sujetadores (He, 2010) . . . . .	3
2.2. Mallado del modelo de elementos finitos (He, 2010) . . . . .	3
2.3. Historia en el tiempo de presiones del viento (He, 2010) . . . . .	4
2.4. Curvas de fragilidad del sistema de techo para diferentes configuraciones (Li y Ellingwood, 2004) . . . . .	4
2.5. Curvas de fragilidad de conexión muro-techo para diferentes configuraciones (Li y Ellingwood, 2004) . . . . .	5
2.6. daños a edificios debidas a vientos extremos. . . . .	6
2.7. Fallas locales en láminas de acero . . . . .	7
2.8. Daños en sistema de techos de edificios bajos . . . . .	8
3.1. Formación gráfica de un huracán (National Weather Service, 2010) . . . . .	12
3.2. Anatomía de una supercélula o supercelda (National Weather Service, 2010)	13
3.3. Formación gráfica de una vaguada (National Weather Service, 2010) . . . . .	16
3.4. Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del hu- racán "Wilma" (National Hurricane Center, 2005) . . . . .	17
3.5. Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del hu- racán "Dean" (National Hurricane Center, 2007) . . . . .	17
3.6. Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del hu- racán "Rick" (National Hurricane Center, 2009) . . . . .	18
3.7. Distribución de frecuencias acumuladas de vientos sostenidos . . . . .	21
3.8. Distribución de frecuencias acumuladas de rachas de viento . . . . .	22
4.1. Ejemplo de la aplicación de DFC . . . . .	24
5.1. Detalle de los modelos realizados . . . . .	30
5.2. Detalles de los modelos de edificios colindantes realizados . . . . .	31
5.3. Vista tridimensional del modelo de la nave industrial y sección de pruebas	31
5.4. Mallado del modelo de la nave industrial . . . . .	32
5.5. Líneas de corriente sobre el modelo . . . . .	33
5.6. Presiones sobre el modelo . . . . .	33
5.7. Succiones con una velocidad media del viento de 60 m/s, con ángulo de in- clinación del techo a dos aguas y dirección del viento $\beta$ y $\theta$ respectivamente.	34

5.8. Esquema de valores máximos de succione sobre el techo para diferentes direcciones de entrada del viento . . . . .	35
5.9. Succiones máximas en el techo para diferentes ángulos de incidencia y velocidad media del viento . . . . .	35
5.10. Succiones sobre el modelo . . . . .	36
5.11. Comparación de la distribución de succiones con una velocidad media del viento de 60 m/s, con ángulo de inclinación del techo a dos aguas y dirección del viento $\beta$ y $\theta$ respectivamente. . . . .	37
5.12. Succiones máximas para diferentes pendientes de techo . . . . .	38
5.13. Comparación entre las succiones y presiones sobre el techo con una velocidad media del viento de 60 m/s, con ángulo de inclinación del techo a dos aguas y dirección del viento $\beta$ y $\theta$ respectivamente. . . . .	39
5.14. Presiones sobre el modelo con edificios colindantes, configuración III . . . .	40
5.15. Líneas de corriente a través del modelo con edificios colindantes, configuración III. (a) vista en planta, (b) vista isométrica . . . . .	41
5.16. Comparación de la distribución de succiones sobre el techo con una velocidad media del viento de 60 m/s, para configuraciones de edificios colindantes I, II y III con diferentes direcciones del viento $\theta$ . . . . .	42
5.17. Succiones máximas sobre el techo del edificio principal para las configuraciones de edificios colindantes I, II y III. . . . .	43
6.1. Nave industrial típica en México . . . . .	44
6.2. Lámina de acero acanalada TR-72 más utilizada en México . . . . .	45
6.3. Cubierta típica en naves industriales . . . . .	46
6.4. Dimensiones del sujetador autorroscable de acero A325 $f_y=6330$ kg/cm <sup>2</sup> , $d=0.25$ " , $l=1.25$ " , $k=0.24$ " , $c=0.04$ " , $s=0.35$ " y $dk=0.52$ " . . . . .	46
6.5. Dimensiones del polín monten de acero A36, $D=203$ mm, $B=76$ mm, $d=19$ mm, $t=1.9$ mm y $R=9.5$ mm . . . . .	47
6.6. Dimensiones de la lámina acanalada TR-72 acero A653 grado 33 $f_y=2320$ kg/cm <sup>2</sup> y $f_u=3162$ kg/cm <sup>2</sup> , calibres 22, 24 y 26 . . . . .	47
6.7. Modelo M1S . . . . .	48
6.8. Modelo MMS . . . . .	48
6.9. Mallado del modelo MMS . . . . .	50
6.10. Propiedades de los materiales utilizados . . . . .	52
6.11. Aplicación de las cargas sobre el modelo . . . . .	53
6.12. Deformada y aplicación de las cargas sobre el modelo . . . . .	53
6.13. Condiciones de apoyo del modelo MMS . . . . .	54
6.14. Elementos en contacto . . . . .	55
6.15. Vista isométrica de deformaciones en la lámina . . . . .	57
6.16. Vista transversal de deformaciones en lámina . . . . .	57
6.17. Detalle de deformaciones unitarias en la lámina . . . . .	58

---

6.18. Gráfica deformación unitaria vs presión calibre 24 hasta la falla. . . . .	58
6.19. Gráfica deflexión-presión lamina calibre 24 . . . . .	59
6.20. Gráfica deformación unitaria vs presión para diferentes espesores. . . . .	59
6.21. Gráfica deflexión vs presión para diferentes espesores. . . . .	60
7.1. Curva de daño esperado para lámina calibre 24 para un ángulo de incidencia de viento de 45° . . . . .	64
7.2. Curvas de daño esperado para lámina calibre 22 . . . . .	65
7.3. Curvas de daño esperado para lámina calibre 24 . . . . .	65
7.4. Curvas de daño esperado para lámina calibre 26 . . . . .	66
7.5. Promedio de curvas de daño esperado . . . . .	66
7.6. Curvas de daño esperado en función de la escala Saffir-Simpson de huraca- nes . . . . .	68

# Índice de tablas

3.1. Escala Saffir-Simpson para huracanes (National Hurricane Center, 2013) . . . . .	14
3.2. Escala Fujita mejorada para tornados (National Weather Service, 2006) . . . . .	15
3.3. Ciclones tropicales de los últimos 15 años en México ( Servicio Meteorológico Nacional) . . . . .	18
5.1. Configuraciones de los modelos realizados . . . . .	29
5.2. Configuraciones de los modelos de edificios colindantes realizados . . . . .	30
6.1. Configuraciones de los modelos realizados . . . . .	49
6.2. Propiedades de los materiales utilizados . . . . .	51
6.3. Comparación entre la fuerza en los sujetadores obtenida del AEF y Ec. 6.1 . . . . .	61
7.1. Daño esperado en lámina calibre 24 para viento a 45°. . . . .	64

# Capítulo 1

## Resumen

En las últimas décadas los ciclones tropicales han causado algunos de los mayores desastres debido a fenómenos naturales. Por ejemplo, en los Estados Unidos, se ha producido uno de los ciclones tropicales más costosos de la historia, el huracán Andrew, que en 1992 produjo daños por un valor estimado de \$30,000 millones de dólares, y causó la muerte de 53 personas. El caso más reciente es Mitch, que en 1998 provocó el retroceso económico de Honduras y Nicaragua al ocasionar pérdidas por \$5,000 millones de dólares y provocar el deceso de 11,000 personas, afectando seriamente a otros 3 millones. En México, Gilbert provocó en 1998 la muerte de 200 personas y Pauline, en 1997 causó 228 decesos y pérdidas económicas por \$448 millones de dólares. Más recientemente, el paso del huracán Manuel formado durante la temporada de huracanes en el Pacífico del 2013 dejó una cifra de daños que va alrededor de los \$4,200 millones de dólares en 14 entidades federales. El último huracán que impactó México, en la península de Baja California, fue el huracán Odile, el cual causó un impacto económico directo mayor a los 14 mil millones de pesos. Este huracán causó gran daño en elementos de cubierta de naves industriales debido a las grandes succiones y presiones a las que fueron sometidos estos elementos (Pozos Estrada et al., 2015).

En el sector agrícola, 613 mil hectáreas de cultivos fueron declaradas pérdida total, de las cuales, 35 mil hectáreas se perdieron en Sinaloa. El 40% de los daños se dieron en invernaderos y naves industriales dando un gran golpe a la economía de dicha entidad federativa. En la mayoría de los casos, la falla en las naves industriales se presentó en los techos. La integridad de los sistemas de techo es esencial para garantizar la seguridad de los habitantes, maquinaria y la materia resguardada en su interior y por otro lado para prevenir daños excesivos en la estructura. La capacidad de los sistema de techo se investiga con modelos matemáticos de naves industriales empleando Dinámica de Fluidos Computacional. Los modelos matemáticos analizados consideran diferentes ángulos de incidencia y velocidades del viento. Además, se investiga de manera local, el comportamiento y modo de falla de una conexión típica de lámina-polin usando un modelo matemático con elementos de contacto. Por último se evalúa la conexión usando funciones de daño esperado para estimar la relación entre los estados límite estructurales y su ocurrencia.

# Capítulo 2

## Introducción

### 2.1. Revisión de la literatura

El daño del sistema de techo en edificios bajos sometidos a eventos extremos de viento es a menudo el resultado de una resistencia insuficiente de la conexión de los sujetadores con el techo. La pérdida de incluso un sólo panel de techo o ventana tiene el potencial de causar un aumento dramático en pérdidas, que puede alcanzar hasta el 80 % del valor total asegurado de la casa debido a la penetración de agua durante una tormenta (Sparks et al. 1994). En experimentos anteriores, se ha aplicado monotónicamente presión estática para obtener la resistencia de paneles de techo de madera y se definió como falla cuando el primer sujetador se desprendía o cuando ocurrían separaciones permanentes (6 a 12 mm) entre el panel y el soporte (Sutt 2000). Como los experimentos de paneles son costosos, modelos numéricos se emplearon para estimar la capacidad de los techos considerando la resistencia del sujetador (Cunningham 1992, Mizzel 1994, Rosowsky and Schiff 1996, Kallem 1997, Sutt 2000). Por ejemplo, Cunningham (1992) consideró que la capacidad de los techos pueden ser estimados con el área tributaria más grande asociada con el sujetador en el techo, mientras que Mizzel (1994) modeló el techo usando elementos shell en un modelo de elementos finitos, representando los sujetadores por resortes elástico lineal para predecir la capacidad de levantamiento bajo presión estática de viento. Lo anterior mostró que predecir la capacidad de levantamiento usando el enfoque del área tributaria difiere cuando se utiliza el modelo de elementos finitos, y la diferencia decrece reduciendo el espaciamiento entre sujetadores.

He en el 2010, estudió una caracterización probabilista de la capacidad de levantamiento de techos bajo cargas de viento. Para el análisis, consideró un panel de techo usando un modelo de elementos finitos y el comportamiento de los sujetadores fue modelado usando resortes no lineales, como se muestra en la Figura 2.1. El mallado del modelo de elementos finito para este panel se muestra en la Figura 2.2, donde el mallado del modelo fue generado usando ANSYS (ANSYS Inc. 2005).

Por simplicidad, el análisis se enfocó en curvas de fragilidad de la capacidad del panel de techo considerando que la presión del viento se puede modelar como uniforme y estática.

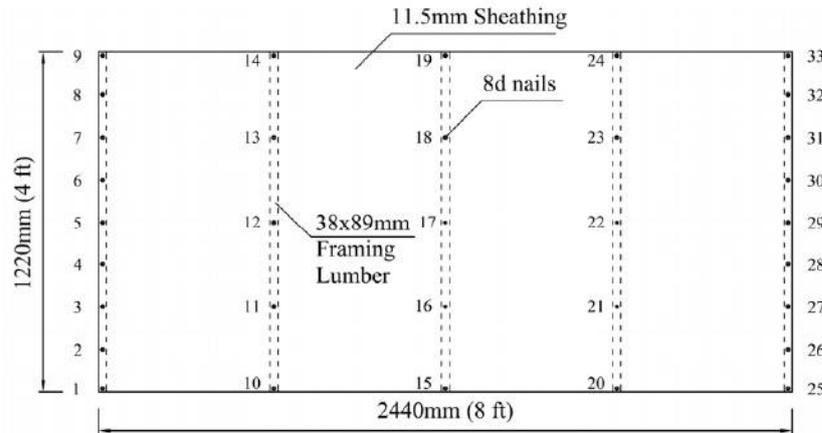


Figura 2.1: Panel de techo típico y arreglo de sujetadores (He, 2010)

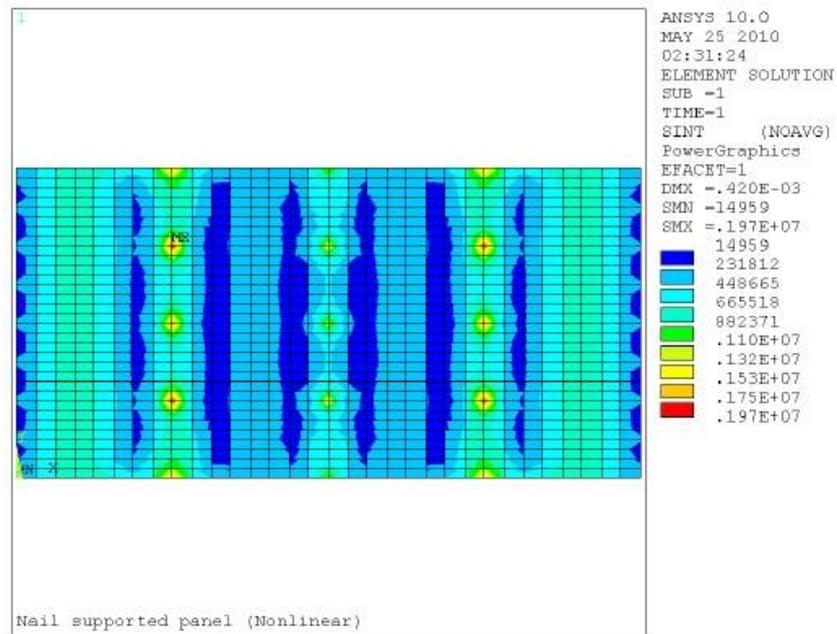


Figura 2.2: Mallado del modelo de elementos finitos (He, 2010)

Además, se utilizó una historia en el tiempo de presiones de viento y se compararon los resultados con los obtenidos con la presión de viento estática y uniforme (ver Figura 2.3). Para estimar la capacidad de levantamiento del panel de techo se utilizaron dos análisis, un análisis estático pushover y un análisis dinámico no lineal. He concluyó que la caracterización estadística de la capacidad de levantamiento del panel de techo bajo presiones de viento estocásticas se puede llevar a cabo considerando la incertidumbre en el comportamiento de los sujetadores. Los resultados numéricos muestran que al considerar la correlación entre el comportamiento del levantamiento de los sujetadores con el panel de techo, afecta la capacidad de levantamiento del panel despreciablemente.

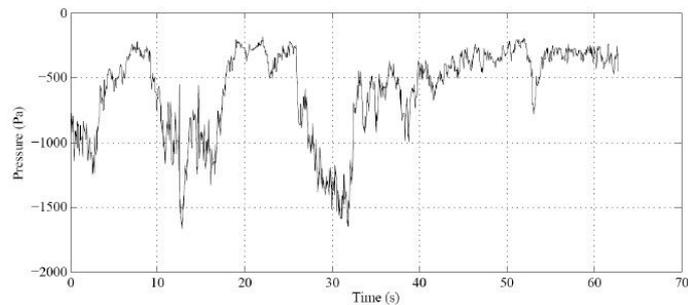


Figura 2.3: Historia en el tiempo de presiones del viento (He, 2010)

Otro estudio interesante es el de Li y Ellingwood (2004), donde estudiaron los daños por huracanes en construcciones residenciales en los Estados Unidos. Desarrollaron una metodología basada en análisis de fragilidad, para evaluar la respuesta de los componentes de los techos de construcciones residenciales de madera expuestos a vientos extremos. Con este modelo expresaron la incertidumbre en el rendimiento de los componentes y sistemas estructurales en función de tormentas fuertes. La curva de fragilidad de residencias típicas de madera fue realizada usando un análisis de confiabilidad de primer orden para calcular la probabilidad de falla de los componentes que son vitales para mantener la integridad del edificio y para minimizar las pérdidas económicas. La Figura 2.4 muestra la curva fragilidad de diferentes configuraciones de techos, en los cuales la más severa presión de viento ocurre en las esquinas y bordes. Una vez que los muros o el sistema de techo se

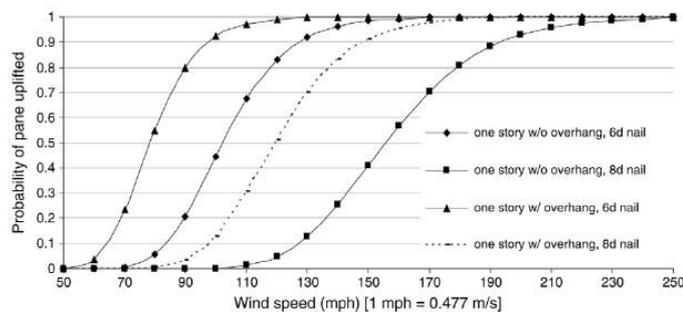


Figura 2.4: Curvas de fragilidad del sistema de techo para diferentes configuraciones (Li y Ellingwood, 2004)

rompen, el edificio y su contenido son más propensos a sufrir graves daños por efecto del viento o agua. Manning y Nichols (1991), encontraron que el daño o la destrucción del sistema estructural de techo podría causar la pérdida de los muros y por consiguiente la pérdida de apoyo lateral dando lugar al colapso de la construcción. Así, por las razones discutidas anteriormente, el estado límite de rendimiento del edificio fue definido como el momento en el que se rompe la envolvente del edificio, es decir cuando se rompe el sistema de techo o muros. Por lo tanto, también estudiaron la fragilidad en la conexión de muros con el sistema de techo para diferentes configuraciones de unión. En la Figura

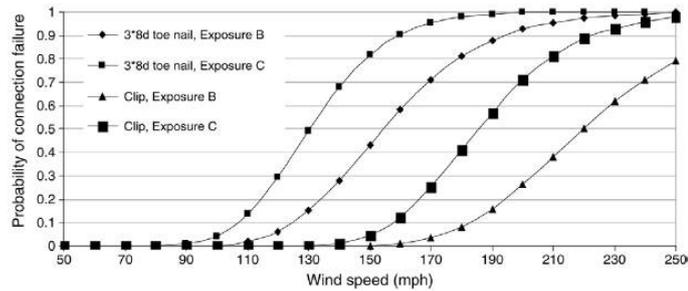


Figura 2.5: Curvas de fragilidad de conexión muro-techo para diferentes configuraciones (Li y Ellongwood, 2004)

2.5, se muestra la gráfica de fragilidad para la conexión entre los muros con el techo para diferentes velocidades del viento.

Con este estudio concluyeron que del análisis de fragilidad se puede saber el nivel de daño basado en velocidades de viento y con esto saber la configuración ideal de las conexiones del sistemas de la envolvente de la estructura.

### 2.1.1. Daño a edificaciones debido a vientos extremos

Por lo regular los edificios de baja altura tiene sistemas de techo con pendientes pequeñas que pueden experimentar grandes fuerzas durante eventos con grandes ráfagas de viento. Estas fuerzas pueden ser presiones positivas o negativas dependiendo de la zona en la que se presenten y se deben considerar en el diseño y la fijación del sistema de techo o muros.

Un gran número de estudios de túnel de viento han mostrado que el techo y los muros pueden estar sujetos a succiones de viento cuando se someten a vientos fuertes (Davenport et al., 1978, Holmes, 1993, Xu and Reardon, 1998). El viento induce grandes succiones que se desarrollan por lo general de forma local en los aleros cerca de la esquina del techo o en el el borde de la cresta en edificios bajos con techos a dos aguas. La presión sobre las láminas de acero es transferida hacia los polines, luego a las vigas o armaduras, después hacia los muros y columnas y finalmente hacia la cimentación. Cuando se transfieren estas cargas a largo de dicha configuración de manera correcta no debería de haber ninguna falla en un miembro o conexión entre estos. Si alguno de los miembros o la conexión en si no es capaz de soportar las cargas de viento, la falla se inicia y permite el inicio progresivo

del colapso del edificio. La magnitud de los daños dependen de donde se encuentren los miembros débiles. Es de mucha importancia diseñar miembros y conexiones con el mismo margen de seguridad.

### 2.1.2. Tipos de falla en láminas de acero

Pasadas observaciones han mostrado que la lámina de acero a menudo cerca de los orificios de los sujetadores, es el eslabón más débil en la conexión del sistema de techo con la estructura principal durante eventos de vientos extremos (Figura 2.6).

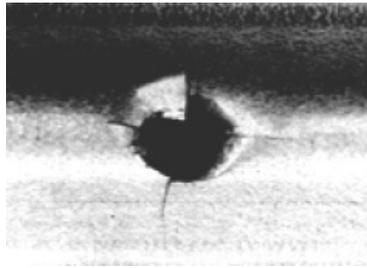


Figura 2.6: daños a edificios debidas a vientos extremos.

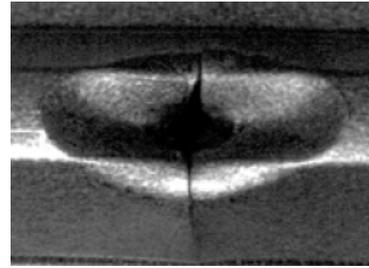
Las presiones en el techo debidas al viento son cargas aleatorias por lo tanto causan la fatiga de las láminas de acero y por consiguiente la falla de la conexión. Este comportamiento se observa en los daños durante ciclones, donde se encuentra la falla cerca de los orificios de los sujetadores que permiten el desprendimiento total o parcial de la lámina de acero.

La presencia de grandes concentraciones de esfuerzos alrededor de las conexiones en láminas de acero bajo cargas fluctuantes proporcionan todos los ingredientes requeridos para una falla por fatiga. La localización de las cargas de viento en edificios de baja altura dependen de la interacción entre el flujo del viento y la orientación de las superficies del edificio.

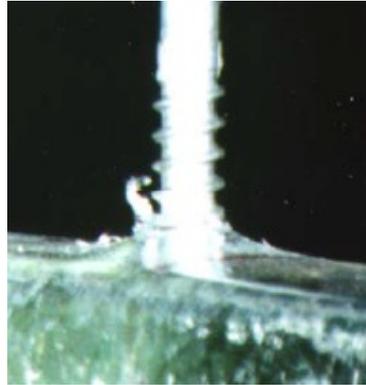
Observaciones en zonas de desastres han mostrado también que los revestimientos de los techos bajo vientos fuertes están sujetos a grandes fuerzas de succión (Xu and Teng, 1994). Las fallas que se han encontrado son por desprendimiento de la lámina ya sea causado por fatiga o simplemente por grandes succiones estáticas. Estas fallas son las más frecuentes, pero en algunos casos, las fallas son causadas por la extracción de los sujetadores de los polines. La figura 2.7 muestra las fallas locales de las láminas de acero más frecuentes.



(a) Fatiga



(b) Succiones estáticas



(c) Extracción de sujetadores

Figura 2.7: Fallas locales en láminas de acero

Cuando este tipo de fallas locales se manifiestan, el edificio puede presentar una falla total o parcial en el sistema de techo como se muestra en la figura 2.8.

En la mayoría de los casos donde se presenta el desprendimiento total o parcial del sistema de techo, puede llegar a perderse por completo los bienes o materiales depositados dentro de los edificios dejando un saldo de pérdidas muy alto.



(a) Daño en edificio con sistema de techo a dos aguas



(b) Daño en edificio con sistema de techo en arco

Figura 2.8: Daños en sistema de techos de edificios bajos

## 2.2. Planteamiento del problema

La enorme devastación causada por los huracanes está marcada como uno de los desastres naturales más importantes que afectan gran parte del territorio mexicano. El reciente incremento en la ocurrencia de huracanes y el continuo crecimiento de las actividades de construcción a lo largo de las costas ha aumentado aún más el potencial de daños ocasionados por huracanes. Las costas mexicanas del Océano Pacífico son una de las áreas más vulnerables a estos fenómenos meteorológicos, sólo en las temporadas 2013 y 2014 se presentaron 25 huracanes de los cuales 10 fueron de categoría mayor a 3 en la escala Saffir-Simpson, con un daño total de \$5.5 mil millones de dólares ocasionando 223 pérdidas humanas. Daños significativos se presentan en el sector agrícola ubicado las costas mexicanas, o cercano a éstas, por ejemplo las estructuras de almacenamiento como naves industriales e invernaderos sufren daño que causan la pérdida total o parcial de los productos agrícolas y maquinaria.

El huracán Manuel en el 2013, dejó el 50 % de la infraestructura urbana dañada, más de 38 mil familias perdieron su patrimonio, 9 municipios con daño severo, 34,697 hectáreas de diverso cultivo siniestradas, 40 % de la hortalizas de invernadero dañadas, 1008 escuelas con daños, más de 40 mil viviendas dañadas y alrededor de 175 mil damnificados todo esto sólo en el estado de Sinaloa. Las pérdidas sufridas por las compañías de seguros y el gobierno y también las dificultades que presenta la sociedad ante estos desastres ha promovido iniciativas de investigación para centrarse en la mitigación de daños y predicción de pérdidas. Un área significativa de investigación es buscar mitigar los daños sufridos en los sistemas de techo en estructuras de baja altura ya que estas estructuras son de las más dañadas en la región. La geometría de este tipo de estructuras en conjunto con los vientos huracanados, crean presiones importantes en los techos que causan la separación del sistema de techo con la estructura principal. En la mayoría de los casos, el daño es a nivel local, ya que no es común el colapso de toda la estructura, aunque sí puede ocurrir.

El Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) toma en cuenta las presiones a nivel local con diferentes valores del factor de presión local pero sólo toma en cuenta dos direcciones (0° y 90°) de incidencia del viento. Se sabe que el viento es una excitación que varía en dirección y magnitud con respecto al tiempo y no necesariamente se presenta en los ejes principales de la estructura. Por ello, para encontrar los factores de presión considerando la direccionalidad del viento, los cuales permitan conocer con mayor detalle el comportamiento del viento sobre este tipo de estructuras, es necesario el desarrollo de esta investigación. Los valores de presión identificados de los análisis permitirán estudiar el posible daño local en las conexiones de la cubierta.

### 2.3. Justificación

La ingeniería de viento es una rama de la ingeniería relativamente reciente y su crecimiento es inminente en nuestro país. La finalidad de este estudio es determinar los efectos del viento sobre la cubierta de naves industriales para uso de invernaderos empleando dinámica de fluidos computacional. En México es de gran importancia buscar nuevas formas de combatir los desastres naturales causados por fenómenos meteorológicos mediante la mejora de las normas y códigos de construcción recientes. La búsqueda de nuevas tecnologías y actualización de las teorías deben de ser prácticas cotidianas para el ingeniero investigador. Este trabajo es necesario para complementar los actuales criterios de diseño de estructuras de baja altura ante cargas de viento y con esto coadyuvar para minimizar las pérdidas humanas y económicas en nuestro país.

### 2.4. Alcances

En esta investigación se utiliza la dinámica de fluidos computacional, que es una de las más recientes y poderosas herramientas utilizadas para el análisis de sistemas relacionados con el flujo de fluidos por medio de la simulación basada en computadora. Sólo se estudia una cubierta de dos aguas, típica de las construidas en México. Los análisis consideran que la cubierta de la nave industrial es rígida y que el campo fluido puede ser caracterizado con la velocidad del viento. Los análisis consideran diferentes ángulos de incidencia del viento.

### 2.5. Objetivos

El objetivo general de esta investigación es estudiar el efecto del viento en cubiertas de naves industriales de dos aguas. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Modelar con Mecánica de Fluidos Computacional una nave industrial típica con cubierta de dos aguas para determinar la distribución de presiones sobre ésta.
- Identificar zonas de concentración de esfuerzos en la cubierta inducidas por el viento con diferentes ángulos de incidencia.
- Desarrollar modelos de la conexión lámina-sujetador para identificar mecanismos de falla.
- Proponer curvas de daño esperado de la conexión lámina-sujetador.

# Capítulo 3

## Descripción de la amenaza meteorológica

### 3.1. Amenaza por viento

La amenaza se puede definir como un peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un periodo de tiempo y en un territorio particular de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antropogénico, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente. La amenaza asociada con un fenómeno natural se mide mediante la frecuencia de ocurrencia y la severidad medida mediante algún parámetro de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica.

### 3.2. Fenómenos meteorológicos de vientos fuertes

#### 3.2.1. Huracanes

La generación de huracanes está asociada con la incidencia de la radiación solar sobre el planeta, y los procesos climáticos que ésta induce. La atmósfera, cuyo espesor medio es de 130 km, está conformada con aire de distintas densidades, según su altura y posición en la superficie terrestre. Debido a los cambios térmicos se pueden presentar moléculas de agua en la composición del aire que cambian su densidad.

En la superficie terrestre se desarrollan procesos circulatorios de las masas de aire, debidos a la variación de la temperatura atmosférica con la altura, también denominada gradiente térmico. Esto induce intercambios termodinámicos entre las zonas más calientes y las más frías, para establecer el equilibrio. El aire caliente se desplaza hacia los polos y el aire frío hacia el ecuador. De este modo, las masas de aire nivelan y suavizan el clima terrestre y establecen los principios de la circulación general. Al presentarse el movimiento de aire caliente hacia las partes altas de la atmósfera se genera un centro de baja presión, con lo que se pierde o reduce el calor de la atmósfera.

En un centro de baja presión el viento tiende a desplazarse hacia el centro del sistema, en donde se acumula para luego ascender verticalmente. Al elevarse, la masa de aire se expande, pierde energía y reduce el calor. Si se dan las condiciones de temperatura y humedad necesarias, el vapor de agua se condensa generando nubes. Los huracanes pueden o no desarrollarse en eventos relevantes dependiendo de las condiciones físicas y ambientales dominantes en la zona y momento en que se generan, por ejemplo:

- Temperatura superficial del océano mayor a 27° C.
- Fuerza de Coriolis suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión. Esta condición se cumple entre los 5° y 30° de latitud.
- Diferencia entre los niveles de presión de 850 a 200 milibares.
- Suficiente humedad relativa en la tropósfera media.
- Una perturbación tropical.

Las distintas etapas del desarrollo de estos sistemas están definidas por la velocidad sostenida de los vientos, es decir, los niveles de velocidad del viento y la presión atmosférica que se mantienen por tiempos superiores a un minuto cerca del centro del sistema. La figura 3.1 muestra esquemáticamente la formación de huracanes.

La escala Saffir-Simpson (Tabla 3.1) clasifica a los huracanes basándose en la velocidad de los vientos sostenidos. Esta escala estima apropiadamente el daño potencial.

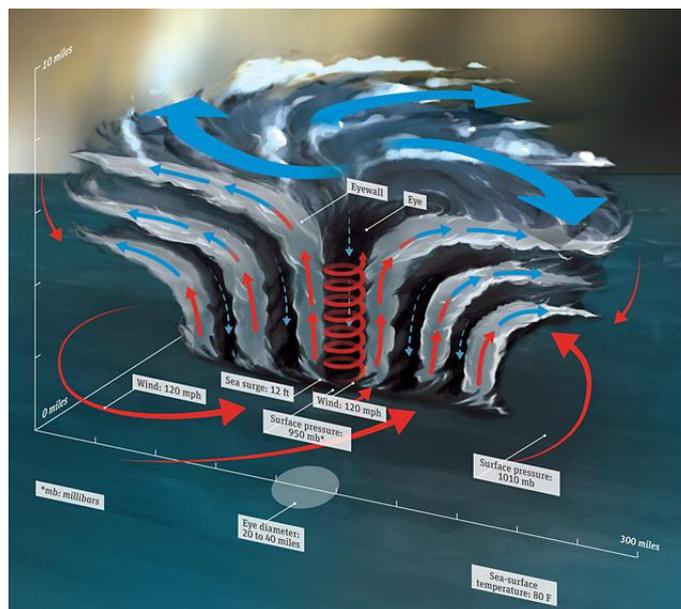


Figura 3.1: Formación gráfica de un huracán (National Weather Service, 2010)

### 3.2.2. Tornados

Un tornado es una masa de aire con alta velocidad angular, su extremo inferior en contacto con la superficie de la tierra y el superior con una nube cumulonimbus. Se trata del fenómeno atmosférico ciclónico de mayor densidad energética de la Tierra, aunque de poca extensión y de corta duración. La mayoría de los tornados cuentan con vientos que llegan a velocidades de entre 65 y 180 km/h, miden aproximadamente 75 metros de ancho y se trasladan varios kilómetros antes de desaparecer. Los más extensos pueden tener vientos con velocidades que pueden girar a 450 km/h o más, medir hasta 2 km de ancho y permanecer tocando el suelo a lo largo de más de 100 km de recorrido. Existen varias escalas para clasificar la fuerza de los tornados, por ejemplo la escala Fujita mejorada que se muestra en la Tabla 3.2.

La mayor parte de los tornados originados en superceldas (figura 3.2) siguen un ciclo de vida reconocible. Este comienza con el origen de la propia supercelda, que se da cuando una corriente de aire frío y seco desciende desde lo alto de una nube para compensar el aire cálido que asciende por el frente para ir incrementando las dimensiones de la propia nube. Al ser más pesado el aire frío, se producen capas de aire inestable donde el aire frío desciende y obliga al aire caliente a ascender, creando la tormenta. Si las diferencias de temperatura son lo suficientemente grandes, el descenso del aire frío se puede dar en forma de remolino, invisible por ser de aire seco: se vuelve visible cuando al llegar al suelo comienza a levantar polvo, hojas y otros objetos. Este aire que desciende, llamado corriente descendiente del flanco trasero (RFD, por sus siglas en inglés), acelera al irse acercando al suelo, y arrastra consigo al mesociclón de la superficie hacia él. Las corrientes ascendentes, por su parte, atraen al aire a su alrededor, aumentando la rotación y convirtiéndose en una columna estrecha, conocida como nube embudo, que va aumentando su diámetro y disminuyendo su velocidad de giro a medida que se eleva. Al ir descendiendo el embudo anticiclónico (RFD) y llegar al suelo, se crea un frente de ráfagas que puede causar daños a una buena distancia considerable del tornado. Usualmente, la nube embudo se convierte en un tornado muy poco después de que la RFD toque el suelo. Cuando la RFD envuelve completamente al tornado y le corta el suministro de aire, el vórtice comienza a debilitarse, y se vuelve delgado, semejando a una cuerda. Esta es la fase de disipación, misma que normalmente no dura más de unos pocos minutos, y tras la cual el tornado se esfuma.

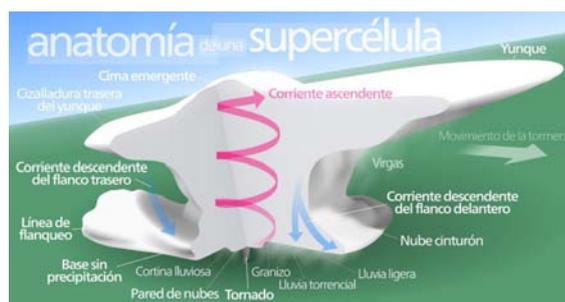


Figura 3.2: Anatomía de una supercélula o supercelda (National Weather Service, 2010)

Tabla 3.1: Escala Saffir-Simpson para huracanes (National Hurricane Center, 2013)

CATEGORÍA	VIENTOS SOSTENIDOS	TIPOS DE DAÑO
1	119 - 153 km/h 33 - 46 m/s	Vientos muy peligrosos que producirán algunos daños. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir daño en el techo, tejas, recubrimientos de vinil y canaletas. Ramas grandes podrían ser proyectadas y los árboles superficialmente arraigados pueden ser derribados. Extensos daños en líneas eléctricas y postes.
2	154 - 177 km/h 43 - 49 m/s	Vientos extremadamente peligrosos que producirán grandes daños. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir importantes daños en el techo y paredes. Muchos árboles superficialmente arraigados podrían ser proyectados o arrancados de raíz y bloquear carreteras. Pérdida casi total de energía.
3	178 - 208 km/h 50 - 58 m/s	Daño devastador. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir graves daños o la eliminación de cubierta de techo. Muchos árboles pueden ser proyectados o arrancados de raíz, bloqueando carreteras. La electricidad y el agua no estarán disponibles durante varios días o semanas después de que pase la tormenta.
4	209 - 251 km/h 59 - 69 m/s	Daño catastrófico. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir graves daños, con pérdidas de la mayor parte de la estructura de techo y/o algunos muros exteriores. La mayoría de los árboles serán proyectados o arrancados de raíz y postes de electricidad derribados. Los apagones duran semanas, posiblemente meses. La mayor parte de la zona será inhabitable por semanas o meses.
5	> 251 km/h > 69 m/s	Daño catastrófico. Un alto porcentaje de viviendas será destruido, con falla total de la azotea y el colapso de la pared. Los árboles caídos y postes de electricidad aislarán las zonas residenciales. Los cortes de energía tendrán una duración de semanas a meses. La mayor parte de la zona será inhabitable por semanas o meses.

Tabla 3.2: Escala Fujita mejorada para tornados (National Weather Service, 2006)

CATEGORÍA	VIENTOS SOSTENIDOS	TIPOS DE DAÑO
EF0	105 - 137 km/h 29 - 37 m/s	Daños leves. Algunas tejas caídas y otras pequeñas piezas de los tejados arrancadas, algunos daños en canaletas, ramas de árboles rotas y algunos árboles poco profundos arrancados.
EF1	138 - 178 km/h 39 - 49 m/s	Daños moderados. Tejados seriamente despedazados, caravanas y casetas volcadas o seriamente dañadas, pérdida de puertas exteriores y ventanas y otros cristales rotos.
EF2	179 - 218 km/h 50 - 60 m/s	Daños considerables. Tejados de casas sólidas arrancados, los cimientos de las casas pueden mover, caravanas completamente destruidas, arboles grandes partidos o arrancados, pequeños objetos convertidos en proyectiles, coches arrancados del suelo.
EF3	219 - 266 km/h 61 - 73 m/s	Daños graves. Pisos enteros de casas bien construidas destruidos, daños graves a los edificios grandes (tales como centros comerciales), trenes volcados, árboles descortezados, vehículos pesados levantados del suelo y arrojados a distancia, estructuras con cimientos débiles lanzados a cierta distancia.
EF4	267 - 322 km/h 74 - 90 m/s	Daños devastadores. Tanto las casas de hormigón y ladrillos como las de madera pueden quedar completamente destruidas, los coches pueden ser proyectados como misiles.
EF5	> 322 km/h > 90 m/s	Daños increíbles. Las casas fuertes pueden quedar arrasadas hasta los cimientos, las estructuras de hormigón armado dañadas críticamente, los edificios altos sufren graves deformaciones estructurales. Devastaciones increíbles.

### 3.2.3. Tormentas severas o vaguadas

Una vaguada (figura 3.3), en el sentido meteorológico constituye una zona inestable donde el aire, mucho más húmedo y cálido que en las zonas anticiclónicas vecinas, se ve obligado a ascender, ya que los anticiclones se introducen a nivel del suelo como una cuña a cada lado de la propia vaguada, debido a su menor temperatura y, por consiguiente, su mayor densidad. Las depresiones barométricas asociadas a las vaguadas equivaldrían a una especie de frente cálido pero estacionario, de lo que se deriva la persistencia de las lluvias. El aire frío es más denso que el aire caliente, por lo que se hunde en el suelo. Cuando el aire frío choca con la superficie de la Tierra, se esparce formando un frente de ráfagas y

comienza a girar. El aire caliente asciende a lo largo del eje delantero. Mientras el aire frío gira hacia afuera, es comprimido ocasionando que los vientos aumenten dramáticamente. Las vaguadas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Macroburst:** tienen un diámetro mayor a 4 km, una duración de 5 a 30 minutos y la velocidad del viento suele ser mayor a 215 km/h.
- **Microburst:** con un diámetro menor a 4 km, una duración de 5 a 15 minutos y la velocidad del viento suele ser menor a 215 km/h

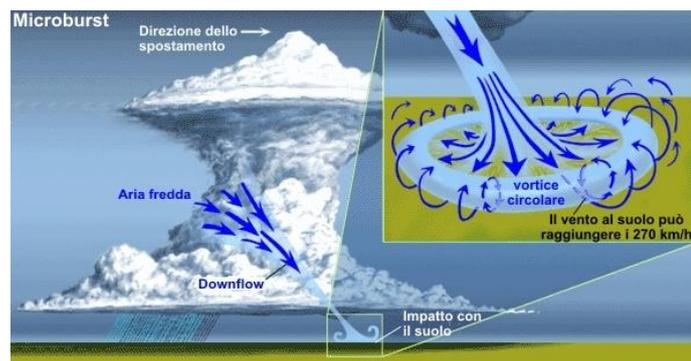


Figura 3.3: Formación gráfica de una vaguada (National Weather Service, 2010)

### 3.3. Amenaza meteorológica en México

México se ubica entre los 40 países con las pérdidas económicas más altas por desastres, con un impacto de casi 50,000 millones de dólares en los últimos 30 años, de acuerdo con estudios de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Por otro lado, también está entre los 15 países con mayor población absoluta expuesta al peligro de ciclones tropicales según el Índice de Riesgo de Desastre de la ONU. Sólo en el 2014 se registraron 61 fallecimientos y daños totales por 1,503 millones de dólares por eventos meteorológicos en nuestro país. Según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en los últimos 15 años se registraron un total de 92 ciclones tropicales que afectaron directamente las costas mexicanas. Los más devastadores fueron, por orden cronológico, el huracán (categoría 5) "Wilma" (2005) el cual alcanzó tierra en más de una ocasión y provocó sus efectos más destructivos en la península de Yucatán con vientos máximos sostenidos de 280 km/h y rachas de 345 km/h que produjeron 8 fallecimientos y daños por alrededor de 7.5 mil millones de dólares. La figura 3.4 muestra la trayectoria de "Wilma".



Figura 3.4: Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del huracán "Wilma" (National Hurricane Center, 2005)

El huracán (categoría 5) "**Dean**" (2007) el cual cruzó por completo la península de Yucatán con vientos máximos sostenidos de 270 km/h y rachas de 350 km/h que tomaron la vida de 14 personas y daños totales de 600 millones de dólares (ver figura 3.5).



Figura 3.5: Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del huracán "Dean" (National Hurricane Center, 2007)

El huracán (categoría 5) "**Rick**" (2009) que afectó los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur y Sinaloa con vientos máximos sostenidos de 260 km/h y rachas de 350 km/h, dejando un saldo de 3 fallecimientos y pérdidas totales de 14.6 millones de dólares (ver figura 3.6).



Figura 3.6: Mapa de la trayectoria e intensidad según la escala Saffir-Simpson del huracán "Rick" (National Hurricane Center, 2009)

Los 92 ciclones tropicales que afectaron directamente en nuestro país en los últimos 15 años se muestran en la Tabla 3.3, donde se nombra a cada ciclón por orden cronológico, su intensidad según la escala Saffir-Simpson y sus vientos máximos.

Tabla 3.3: Ciclones tropicales de los últimos 15 años en México ( Servicio Meteorológico Nacional)

Año	Nombre	Categoría	Sostenidos (km/h)	Rachas (km/h)
2000	Miriam	TT	75	95
	Norman	TT	75	95
	Rosa	TT	100	120
	Gordon	H1	120	150
	Keith	H4	215	260
	Beryl	TT	85	100
2001	Juliette	H4	230	290
	Lorena	TT	95	110
	Chantal	TT	110	140
	Iris	H4	235	270
2002	Julio	TT	75	85
	Kenna	H5	270	325
	Isidore	H3	205	250
2003	Carlos	TT	100	120
	Ignacio	H2	165	205
	Marty	H2	160	195
	Nora	H2	165	205
	Olaf	H1	120	150
	Claudette	H1	140	165
	Erika	H1	120	150

Tabla 3.3 - - Continuación

Año	Nombre	Categoría	Sostenidos (km/h)	Rachas (km/h)
	Larry	TT	95	110
2004	Javier	H4	240	270
	Lester	TT	85	100
	No. 16	DT	55	75
2005	Dora	TT	65	85
	Bret	TT	65	85
2005	Cindy	H1	110	130
	Emlily	H5	250	305
	Gert	TT	75	95
	Jose	TT	85	100
	Stan	H1	130	150
	Wilma	H5	280	345
2006	Jhon	H4	215	265
	Lane	H3	205	250
	Norman	TT	85	100
	Paul	H2	175	215
2007	Barbara	TT	85	105
	Henriette	H1	140	165
	Dean	H5	270	350
	Lorenzo	H1	130	155
2008	No. 5	DT	55	75
	Julio	TT	85	100
	Lowel	TT	95	110
	Norbert	H4	215	260
	Odile	TT	110	140
	Arthur	TT	75	90
	Dolly	H2	160	195
	Marco	TT	100	120
2009	No. 1E	DT	55	75
	Andres	H1	120	150
	Jimena	H4	250	305
	Olaf	TT	75	95
	Rick	H5	260	350
	Ida	H2	165	205
2010	Agatha	TT	75	95
	No. 11	DT	55	75
	Georgette	TT	65	85
	Alex	H2	155	195

Tabla 3.3 - - Continuación

Año	Nombre	Categoría	Sostenidos (km/h)	Rachas (km/h)
	No. 2	DT	55	75
	Hermine	TT	100	120
	Karl	H3	195	240
	Matthew	TT	85	100
	Richard	H1	150	185
2011	Beatriz	H1	150	185
	No. 8	DT	55	75
	No. 12	DT	55	75
	Arlene	TT	100	120
	Harvey	TT	95	110
	Nate	TT	110	140
	Rina	H2	175	215
2012	Norman	TT	75	95
	Paul	H3	195	230
	Bud	H3	185	220
	Carlotta	H2	165	205
2012	Helene	TT	75	95
	Debby	TT	95	110
	Ernesto	H1	140	175
2013	Sonia	TT	75	95
	Octave	TT	100	120
	Manuel	H1	120	155
	Juliette	TT	100	120
	Barbara	H1	130	160
	Ingrid	H1	140	175
	No. 8	DT	55	75
	Fernand	TT	95	115
	Barry	TT	75	95
2014	Boris	TT	75	95
	Odile	H4	220	270
	Simon	H4	215	260
	Trudy	TT	100	120
	Dolly	TT	85	105
	Hanna	TT	65	85

### 3.3.1. Análisis de frecuencia acumulada para los ciclones en México

La frecuencia acumulada es la frecuencia de ocurrencia de valores de un fenómeno menores que un valor de referencia. El fenómeno puede ser una variable aleatoria que varía en el tiempo o en el espacio. Para nuestro caso esta variable aleatoria es la velocidad del viento. Este análisis se hace con el propósito de obtener una idea de cuántas veces ocurrirá una velocidad máxima para poder describir o explicar el comportamiento de los vientos máximos creados por ciclones tropicales.

La probabilidad acumulada  $\mathbb{P}(V \leq Vr)$  - es decir la probabilidad que  $V$  será menor que o igual a  $Vr$  - se puede estimar con base en la frecuencia acumulada relativa  $Pc$  como:

$$Pc(Vr) = M_{Vr}/(N + 1) \quad (3.1)$$

donde  $M_{Vr}$  es el número de datos  $V$  con un valor menor que o igual a  $Vr$ , y  $N$  es el número total de datos. Así, podemos calcular la probabilidad de que la velocidad máxima sea menor o igual a una velocidad dada. En las figuras 3.7 y 3.8, se muestran las distribuciones de frecuencia acumulada para vientos máximos sostenidos y rachas respectivamente. De estas figuras podemos observar que el 50% de los vientos máximos sostenidos de los ciclones tropicales en los últimos 15 años fueron menores o iguales a 100 km/h con rachas de hasta 130 km/h.

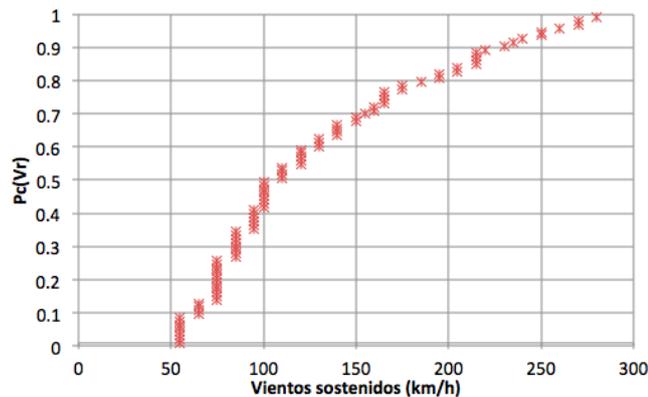


Figura 3.7: Distribución de frecuencias acumuladas de vientos sostenidos

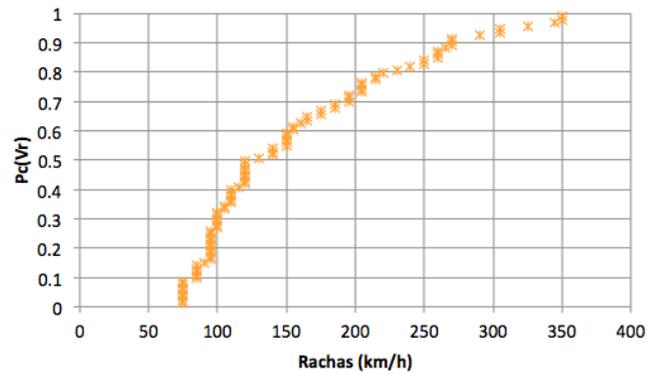


Figura 3.8: Distribución de frecuencias acumuladas de rachas de viento

Por otro lado, estas figuras muestran que el 70 % de los ciclones tropicales fueron menores o iguales a categoría 2 de la escala de Saffir-Simpson. También se puede observar que el 30 % de los ciclones tropicales que afectan las costas mexicanas pueden ser de una categoría mayor o igual a 2. Esto puede ser muy alarmante, ya que en promedio hay 6 ciclones tropicales que afectan directamente a México, por lo tanto se puede concluir que 1.8 ciclones al año pueden ser de categoría 2 o mayor según la escala de Saffir-Simpson. Esto significa que por lo menos habrá 1 ciclón tropical al año que puede generar daños graves.

# Capítulo 4

## Aspectos generales del análisis numérico de cuerpos sometidos a cargas de viento

En la actualidad, en muchas ocasiones es imposible recurrir a soluciones analíticas debido a la tremenda complejidad de los sistemas que estudia la dinámica de fluidos, por lo que se recurre a soluciones numéricas que pueden ser calculadas por computadoras. Surge así una rama de la dinámica de fluidos denominada dinámica de fluidos computacional, o CFD, que se basa en aproximaciones numéricas de las ecuaciones físicas empleadas en la dinámica de fluidos. Las computadoras son utilizadas para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos o los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo disminuyendo el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

La dinámica de fluidos computacional ha sido empleada en una gran cantidad de campos de la ingeniería (figura 4.1), entre los que se pueden destacar:

- Aerodinámica - aviones y automóviles
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Motores
- Turbomáquinas
- Transferencia de calor - sistemas de calentamiento o enfriamiento
- Combustión

- Ingeniería de procesos - mezclas y reacciones químicas
- Cargas de viento - fuerzas y respuesta dinámica de estructuras
- Riesgos de fuego y explosiones
- Ingeniería ambiental - transporte de efluentes líquidos y gaseosos
- Ingeniería costera - cargas en estructuras costeras y "offshore"

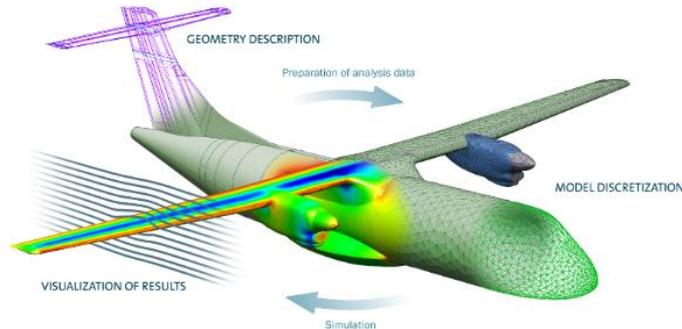


Figura 4.1: Ejemplo de la aplicación de DFC

## 4.1. Modelado numérico de fluidos en ANSYS FLUENT

**ANSYS, Inc.** desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS proporciona diferentes herramientas de software por ejemplo, ANSYS FLUENT, que proporciona capacidades de modelo integral para un amplio rango de problemas de flujo de fluidos, compresibles o incompresibles, laminar y turbulento. Se pueden desarrollar análisis de estado estacionario o transitorio y se puede trabajar con flujos monofásicos y multifásicos, dependiendo del problema a desarrollar.

El problema que se trata en este estudio es de flujo turbulento y de estado estacionario. Las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, que se tratan de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos. No se dispone de una solución analítica; por lo que se recurrió al análisis numérico (DFC) para determinar la solución aproximada. Dichas ecuaciones se describen a continuación:

**Ecuación de continuidad:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (4.1)$$

**Ecuación de cantidad de movimiento:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \rho f + \nabla \cdot \tau \quad (4.2)$$

**Ecuación de la energía:**

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) = -\nabla \cdot (p v) + \nabla \cdot (\tau' \cdot v) + \rho f \cdot v + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ),  $v$  la velocidad del fluido ( $m/s$ ). Estas ecuaciones se pueden simplificar dependiendo del tipo de fluido que se trate.

Los flujos turbulentos son caracterizados por campos de velocidades fluctuantes. Estas fluctuaciones mezclan las cantidades transportadas tales como *momentum*, energía y concentración de especies, y provocan que las cantidades transportadas también fluctúen. Debido a que estas fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y de alta frecuencia, implican un alto costo computacional para ser simuladas directamente en cálculos de la ingeniería práctica. En su lugar, las ecuaciones instantáneas (es decir las ecuaciones de Navier-Stokes evaluadas en un determinado instante de tiempo) que rigen pueden ser promediadas en el tiempo, conjunto promediado o manipuladas de otra manera para eliminar la necesidad de escalas pequeñas, lo que resulta en un conjunto de ecuaciones modificadas que son computacionalmente menos costosas de resolver. Sin embargo, las ecuaciones modificadas contienen variables adicionales desconocidas y se necesitan modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas (ANSYS FLUENT 12 Theory Guide, 2009). A continuación se resumen algunos modelos de turbulencia:

1. Modelo Spalart - Allmaras
2. Modelos  $k - \epsilon$  (donde  $k$  es la energía cinética turbulenta y  $\epsilon$  su tasa de disipación)
  - a) Modelo  $k - \epsilon$  Standart
  - b) Modelo  $k - \epsilon$  Renormalization-group (RNG)
  - c) Modelo  $k - \epsilon$  Realizable
3. Modelos  $k - \omega$  (donde  $\omega$  es la tasa de disipación específica de  $k$ )
  - a) Modelo  $k - \omega$  Standart
  - b) Modelo  $k - \omega$  Shear-stress transport (SST)
4. Modelo  $k - kl - \omega$  Transition
5. Modelo SST Transition
6. Modelo  $v^2 - f$  (donde  $v^2$  es la escala de velocidades y  $f$  es una función de relajación elíptica)

7. Modelos de los esfuerzos de Reynolds (RSM)
  - a) Modelo RSM Linear pressure-strain
  - b) Modelo RSM Quadratic pressure-strain
  - c) Modelo RSM Low-Re stress-omega
  
8. Modelo de simulación de remolinos independientes (DES), que incluye los siguientes modelos RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes):
  - a) Modelo RANS Spalart-Allmaras
  - b) Modelo RANS  $k - \epsilon$  Realizable
  - c) Modelo RANS  $k - \omega$  (SST)
  
9. Modelo de simulación de remolinos largos (LES), el cual incluye los siguientes modelos de sub-escalas:
  - a) Modelo Smagorinsky-Lilly subgrid-scale
  - b) Modelo WALE subgrid-scale
  - c) Modelo Dinamyc Smagorinsky
  - d) Modelo Kinetic-Energy transport subgrid-scale

La elección del modelo de turbulencia dependerá de consideraciones tales como la física del flujo, la práctica establecida para una clase específica de problema, el nivel de precisión requerido, los recursos computacionales disponibles y la cantidad de tiempo disponible para la simulación.

Para el desarrollo de este trabajo se eligió utilizar el modelo  $k - \epsilon$  Realizable, ya que no se espera la aparición de grandes torbellinos en estos modelos físicos. La elección obedece a que los modelos son relativamente pequeños y de geometría sencilla. Si las dimensiones de los modelos fueran mayores, se podría utilizar convenientemente uno de los modelos LES, que son útiles al tener torbellinos de tamaño considerable.

## 4.2. Modelo de turbulencia utilizado (modelo $k - \epsilon$ Realizable)

Los modelos de turbulencia  $k - \epsilon$  tienen una forma similar, con ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta,  $k$  y su tasa de disipación,  $\epsilon$ . Las diferencias principales entre estos modelos son el Método de cálculo de la viscosidad turbulenta, los números de Prandtl turbulentos que rigen la difusión turbulenta de  $k$  y  $\epsilon$  y los términos generación y destrucción en la ecuación de  $\epsilon$ .

El término Realizable significa que el modelo satisface ciertas limitaciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds consistentes con la física del flujo turbulento. Un beneficio inmediato del modelo  $k-\epsilon$  Realizable es que predice de mejor forma la tasa de propagación de ambos, flat jet y round jet. También es probable que proporcione un rendimiento superior para flujos que incluyen rotación, capa límite bajo fuertes gradientes de presión adversa, separación y recirculación.

Una limitación del modelo  $k-\epsilon$  Realizable es que produce viscosidades turbulentas no físicas en situaciones donde el dominio computacional contiene zonas de rotación y zonas de fluido estacionario. Esto se debe al hecho de que el modelo  $k-\epsilon$  Realizable incluye el efecto de rotación media en la definición de la viscosidad turbulenta.

Las ecuaciones de transporte modeladas para  $k$  y  $\epsilon$  en el modelo  $k-\epsilon$  Realizable son las siguientes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.4)$$

y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} + C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4.5)$$

donde

$$C_1 = \max \left[ 0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}; \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$k$  energía cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ )

$u_i$  componente  $i$  de la velocidad del flujo ( $i = 1, 2, 3$ )( $m/s$ )

$\epsilon$  tasa de disipación de energía cinética turbulenta ( $m^2/s^3$ )

$\mu_t$  viscosidad turbulenta ( $kg/m - s$ )

$G_k$  producción de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media ( $kg/m - s^3$ )

$G_b$  producción de energía cinética turbulenta debido a flotación ( $kg/m - s^3$ )

$Y_M$  contribución de dilatación fluctuante en turbulencia compresible a la tasa global de disipación ( $kg/m - s^3$ )

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$  parámetros del modelo

$\sigma_k$  y  $\sigma_\epsilon$  números de prandtl turbulentos

$S_k$  y  $S_\epsilon$  términos fuente definidos por el usuario

La expresión para calcular la viscosidad turbulenta es:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.6)$$

La diferencia entre el modelo  $k - \epsilon$  Realizable y los modelos Standard y RNG es que  $C_\mu$  ya no es constante, y se calcula como:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (4.7)$$

donde:

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.8)$$

y

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk}\omega_k; \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \epsilon_{ijk}\omega_k$$

donde  $\overline{\Omega_{ij}}$  es el tensor medio de la tasa de rotación visto en un marco de referencia con velocidad angular  $\omega_k$ . Las constantes del modelo  $A_0$  y  $A_s$  están dadas por:

$$A_0 = 4.04; \quad A_s = \sqrt{6}\cos\varphi$$

donde:

$$\varphi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W); \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}; \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

Se puede observar que  $C_\mu$  es una función de la tasa de rotación y de deformación media, de la velocidad angular de sistema de rotación y de los campos de turbulencia ( $ky\epsilon$ ). El término  $-2\epsilon_{ijk}\omega_k$  no está incluido por defecto en el cálculo de  $\tilde{\Omega}_{ij}$ . Este término de rotación extra no es compatible con casos que incluyen mallas deslizables o marcos de referencia múltiple. Las constantes del modelo son:

$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_2 = 1.9 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.2$$

# Capítulo 5

## Aerodinámica de edificios bajos

Para observar y describir el efecto en el sistema de techo de un edificio de baja altura cuando el viento fluye a través de él, se creó un modelo en tres dimensiones de una nave industrial y se emplearon las técnicas de dinámica de fluidos computacional (DFC) en un contexto de ingeniería de viento. La modelación y el análisis se llevaron a cabo en el software ANSYS FLUENT en su ambiente Workbench. Un resumen de los parámetros más importantes empleados en el análisis de los modelos matemáticos se presenta en la Apéndice A.

### 5.1. Descripción del Modelo Matemático en ANSYS FLUENT

En este estudio se analizaron 3 modelos en el módulo ANSYS FLUENT. Se examinó el tipo de techo a dos aguas con pendientes ( $\beta$ ) de  $5^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ . El ancho ( $W$ ) y la longitud ( $L$ ) de los modelos son de  $34\text{ m}$  para ambos casos, siendo una sección cuadrada, con una altura ( $h$ ) de  $6.5\text{ m}$ . La Tabla 5.1 presenta una lista de las configuraciones de los modelos considerados en este estudio. Las direcciones del viento ( $\theta$ ) que fueron examinadas se encuentran en un rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , considerando un intervalo de  $10^\circ$  y tomando en cuenta la dirección del viento de  $45^\circ$ . Una vista de la definición de la dirección del viento, la pendiente del techo y las dimensiones de los modelos se muestran en la Figura 5.1.

Tabla 5.1: Configuraciones de los modelos realizados

Tipo de techo	Pendiente del techo ( $\beta$ )	Dimensiones ( $L \times W \times h$ )	Dirección del viento ( $\theta$ ) <sup>1</sup>	Velocidad media del viento <sup>2</sup>
Dos aguas	$5^\circ$	$34\text{ m} \times 34\text{ m} \times 6.5\text{ m}$	A	B
	$20^\circ$			$60\text{ (m/s)}$
	$30^\circ$			$60\text{ (m/s)}$

<sup>1</sup> Dirección del viento

A:  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ : 11 direcciones

<sup>2</sup> Velocidad del viento

B: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90: 10 velocidades (m/s)

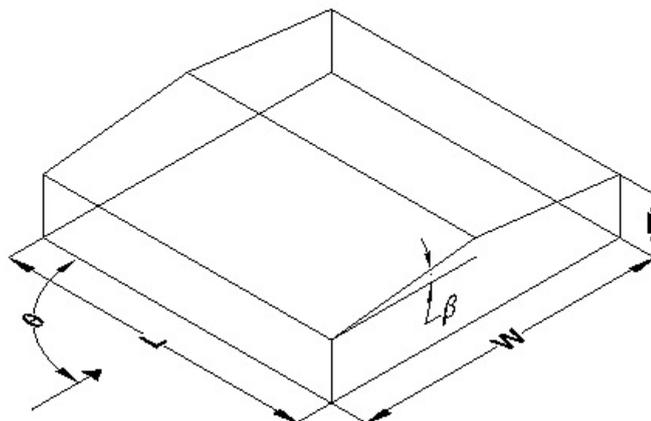


Figura 5.1: Detalle de los modelos realizados

Adicionalmente, el efecto de edificios colindantes fue examinado usando 3 diferentes configuraciones. Cada configuración contiene 9 edificios separados a una distancia  $Sh$  y  $Sv$  horizontal y vertical respectivamente. Las tres configuraciones serán referidas como I, II y III dependiendo del valor de  $Sv$ . Para analizar el efecto de edificios colindantes se consideró 1 edificio principal con una geometría de  $34 \times 34 \times 6.5 \text{ m}$  y 8 edificios colindantes de  $17 \times 17 \times 6.5 \text{ m}$  y  $17 \times 34 \times 6.5 \text{ m}$  ( $L \times W \times h$ ), separados horizontalmente por  $Sh = L/2$  y  $Sv = L, L/2$  y  $L/8$  verticalmente. El edificio principal cuenta con un sistema de techo a dos aguas con una pendiente de techo  $\beta = 5^\circ$ , mientras que los 8 edificios colindantes tienen un sistema de techo plano. Para el análisis se tomó en cuenta la configuración B de las direcciones de viento y una velocidad media de  $60 \text{ m/s}$ , ver Tabla y Figura 5.2.

Tabla 5.2: Configuraciones de los modelos de edificios colindantes realizados

Configuración	$Sv(m)$	$Sh(m)$	Dirección del viento ( $\theta$ ) <sup>1</sup>	Velocidad media del viento
I	2.125	8.5	B	60 (m/s)
II	8.5	8.5		
III	17	8.5		

<sup>1</sup> Dirección del viento

B:  $0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ : 5 direcciones

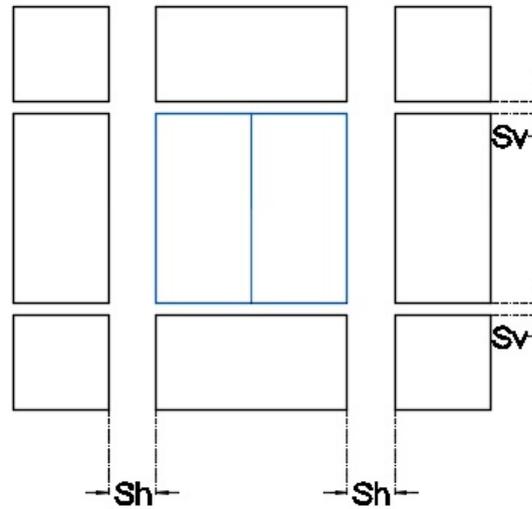


Figura 5.2: Detalles de los modelos de edificios colindantes realizados

Los modelos consideran a la nave industrial como un cuerpo rígido sometido a fuerzas aerodinámicas inducidas por el paso del viento. El dominio del fluido está acotado por las paredes del modelo de la sección de pruebas, en donde se considera que la velocidad del viento es nula (figura 5.3).

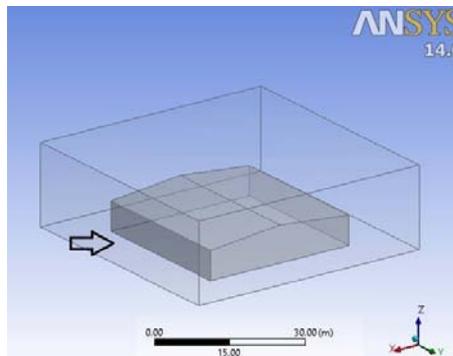


Figura 5.3: Vista tridimensional del modelo de la nave industrial y sección de pruebas

En un análisis de elementos finitos, la selección del tamaño y diseño del mallado es crítico. Es deseable utilizar tantos elementos como sea posible. Sin embargo, tal análisis requerirá un tiempo excesivo de trabajo. En este trabajo, fue seleccionado un adecuado número de elementos basado en estudios de convergencia del análisis con el fin de obtener suficiente precisión de los resultados sin un uso excesivo de tiempo. Para el mallado del modelo de la nave industrial, se tomó en cuenta que en los bordes y esquinas es donde se presentarían las más altas presiones debidas al viento, por ello se tomó en cuenta un tamaño de elemento más pequeño en estas zonas. Se utilizaron tetraedros como tipo de elementos del mallado con un alto nivel de suavizado. En la Figura 5.4, se muestra el mallado del modelo.

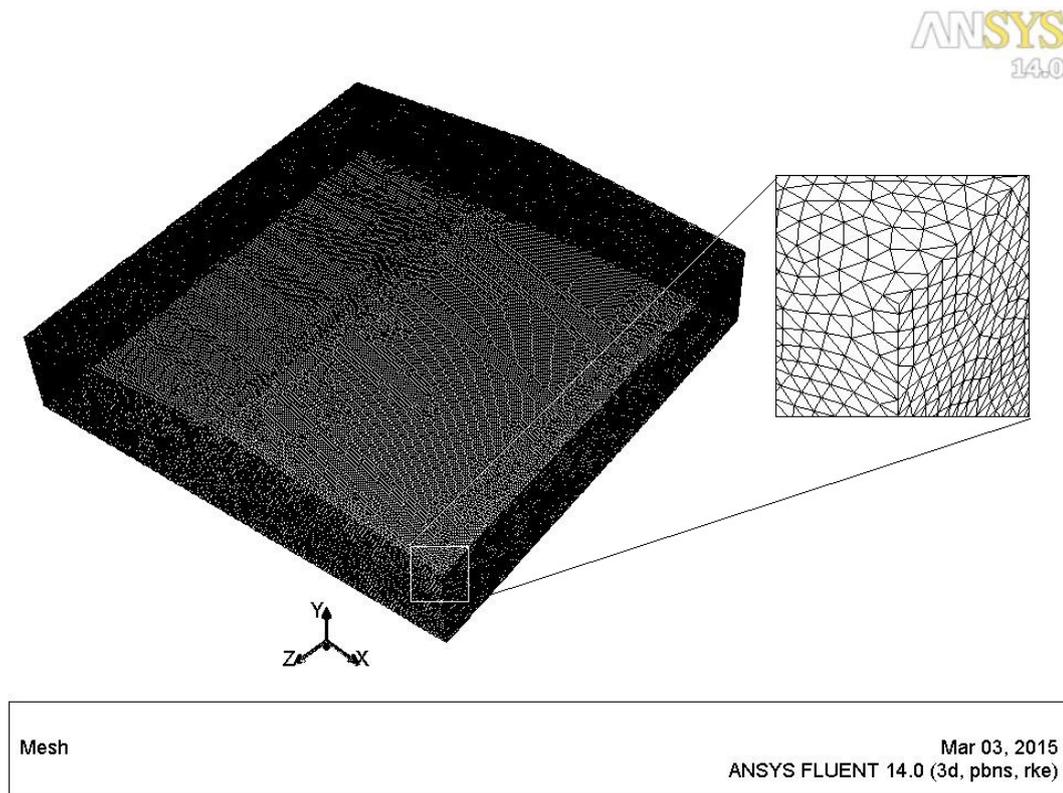


Figura 5.4: Mallado del modelo de la nave industrial

debido a que el objetivo de este trabajo es la comparación entre los diferentes modelos en estudio, esta configuración de mallado se utilizó para todos los modelos de edificios que se analizaron.

## 5.2. Resultados de los análisis

En la Figura 5.5 se muestra cómo el viento pasa a través de la sección de pruebas encontrándose de frente con el modelo en estudio. En esta figura podemos observar las líneas de corriente del viento del análisis realizado con una dirección de entrada de  $30^\circ$  y velocidad media del viento de  $60 \text{ m/s}$ . Se observa que el flujo de aire se acelera cuando el viento se encuentra con cambios en la geometría del modelo creando zonas de baja presión y por lo tanto aumentando la velocidad del viento. En consecuencia de esto, se crea un fenómeno llamado desprendimiento de vórtices, creando presiones negativas (succiones) en dichas zonas. En la Figura 5.6 se muestran la presiones causadas por el paso del viento en un esquema de contornos. Se puede ver que en las zonas donde se presenta el desprendimiento de vórtices es en la zona donde ocurren las succiones.

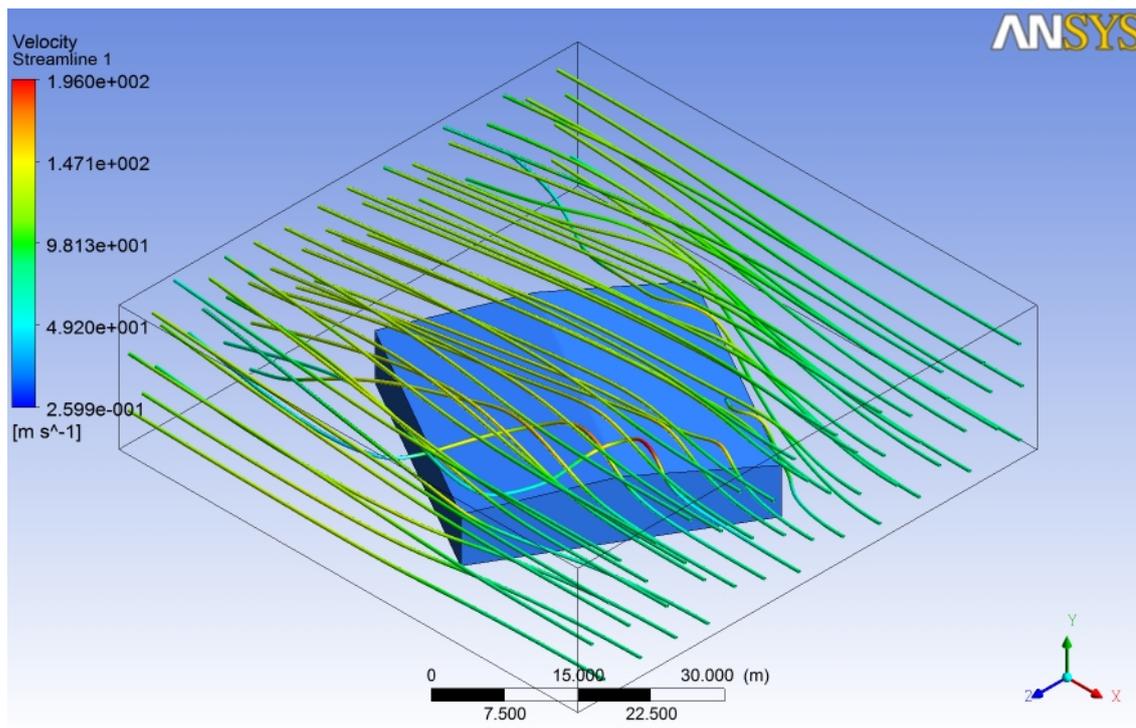


Figura 5.5: Líneas de corriente sobre el modelo

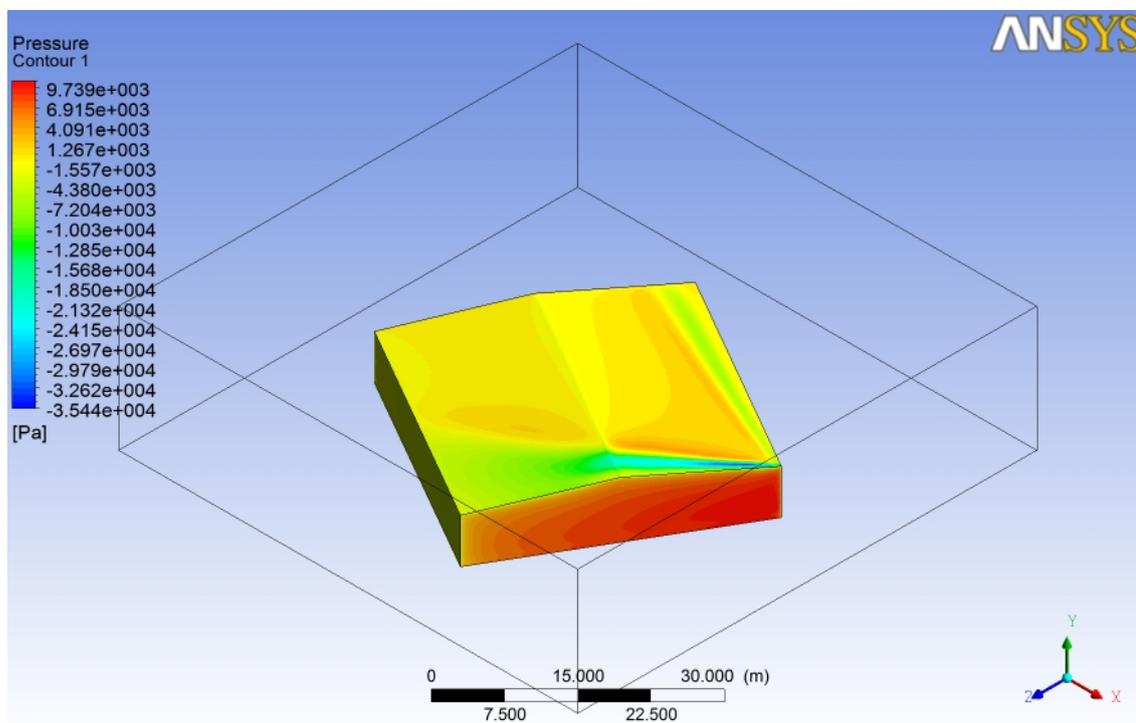


Figura 5.6: Presiones sobre el modelo

En la Figura 5.7 se muestra la variación de las succiones en el sistema de techo con diferentes ángulos de incidencia del viento para el modelo con una pendiente de techo  $\beta=5^\circ$  y una velocidad media del viento de 60 m/s. En esta figura se muestra que las zonas

en donde se presentan las succiones dependen directamente de la dirección de entrada del viento. Se muestra que para direcciones del viento perpendiculares a los muros ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) las succiones se presentan inmediatamente después de pasar por el muro perpendicular a la dirección de entrada del viento. Mientras que para ángulos oblicuos se generan "vórtices de esquina" que generan grandes succiones locales.

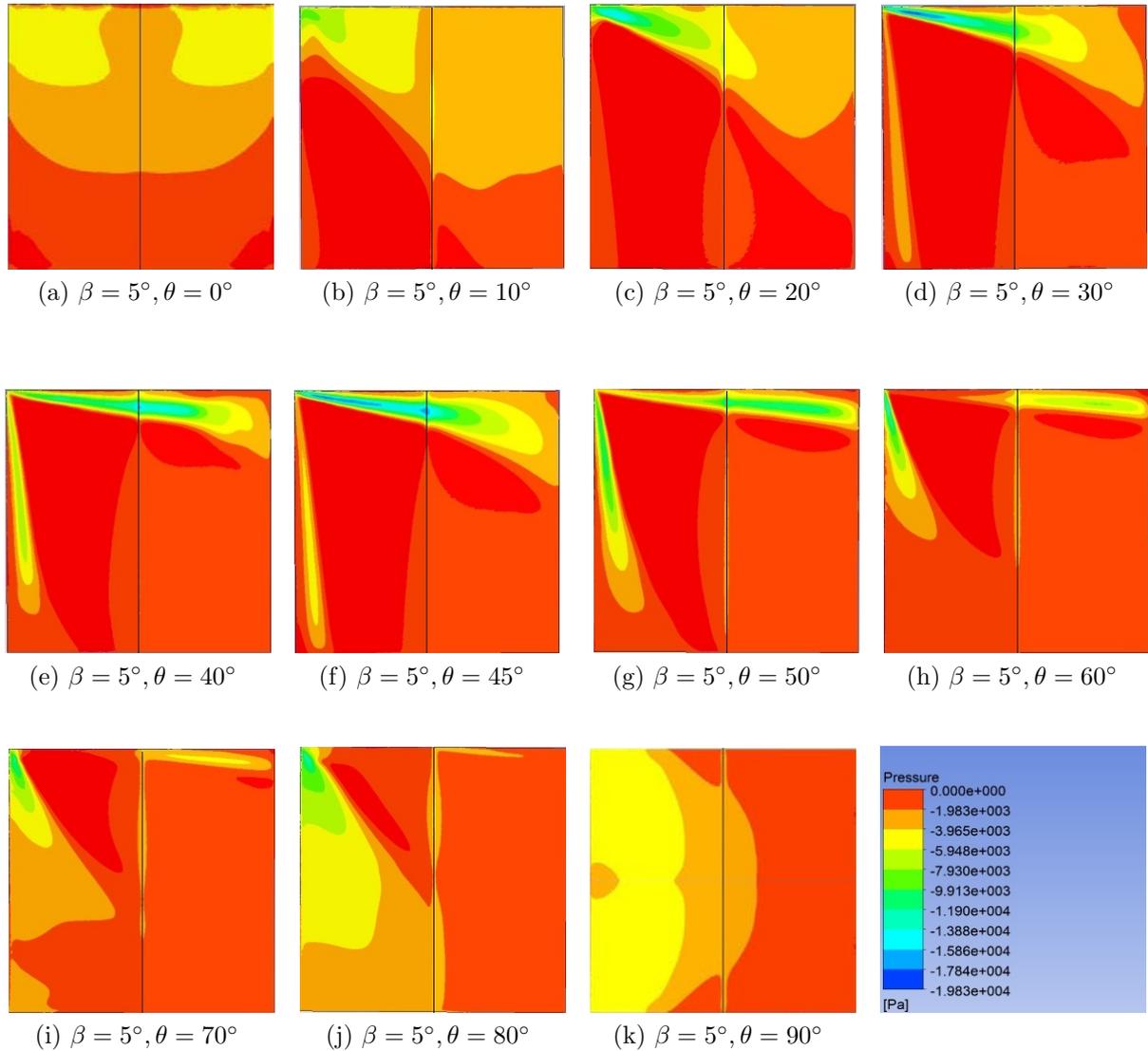


Figura 5.7: Succiones con una velocidad media del viento de 60 m/s, con ángulo de inclinación del techo a dos aguas y dirección del viento  $\beta$  y  $\theta$  respectivamente.

Otros investigadores han estudiado el comportamiento de los coeficientes de presión en paneles individuales en sistemas de techo de casas residenciales de madera, ( por ejemplo **Gavanski, Kordi, Kopp y Vickery 2013**), concluyendo que para sistemas de techo con pendiente relativamente baja ( $\beta < 20^\circ$ ) los coeficientes de presión mínimos (succión) se dan para ángulos oblicuos entre  $45^\circ$  y  $60^\circ$  y que se localizan en la cordillera del sotavento, cerca de la cresta del barlovento. Este comportamiento también se observó en los análisis del presente estudio, que dio como resultado que las succiones más grandes se producen en ángulos oblicuos con un rango de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  de dirección de entrada del viento en la esquina más cercana a la entrada del viento y en la cresta del modelo (figura 5.7 y 5.8).

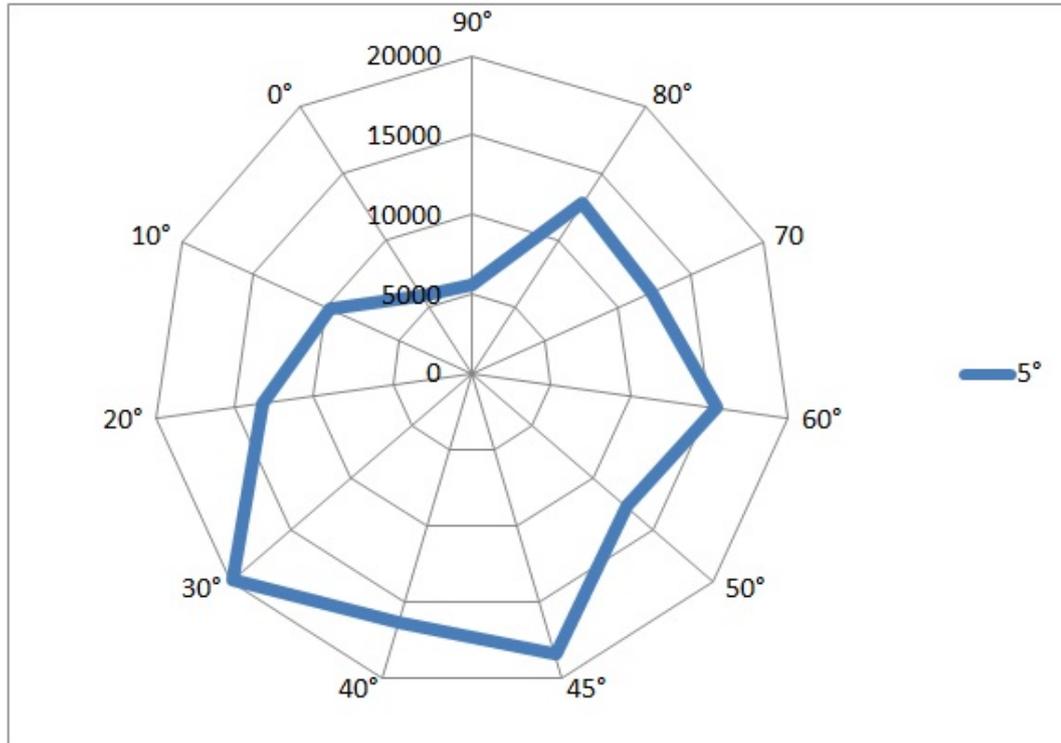


Figura 5.8: Esquema de valores máximos de succione sobre el techo para diferentes direcciones de entrada del viento

SUCCIONES (Pa)											
$\theta$ m/s	90°	80°	70°	60°	50°	45°	40°	30°	20°	10°	0°
10	153	354	341	422	347	503	454	535	421	267	191
20	612	1411	1363	1703	1398	2036	1856	2182	1649	1078	649
30	1377	3160	3012	3847	3172	4554	4121	4897	3858	2445	2155
40	2449	5624	5373	6849	5634	8153	7163	8719	6727	4355	2856
50	3828	9358	8582	10720	8791	12740	11463	13626	10510	7542	4026
60	5513	12778	12329	15426	12780	18510	16326	19825	13190	9774	5817
70	7506	17252	16811	21059	17896	25280	23028	25856	16440	15510	6707
80	10071	23404	23005	27265	22276	33200	28718	35444	21586	20084	9936
90	12413	28749	27573	34461	28403	41480	37432	44219	27100	26135	12056

Figura 5.9: Succiones máximas en el techo para diferentes ángulos de incidencia y velocidad media del viento

En la Figura 5.9 se muestran los resultados de succiones máximas en el sistema de techo para diferentes ángulos de incidencia y velocidad media del viento, donde se muestra que cuando el viento incide con el modelo con un ángulo de 30° se presentan las succiones mayores.

Tomando en cuenta solo el valor máximo de succión de cada análisis para diferentes ángulos de incidencia y velocidades medias del viento con una pendiente del sistema de techo  $\beta=5^\circ$ , se encontraron 3 diferentes familias de comportamiento donde los valores de succión se encuentran en un rango similar. La familia L (bajas succiones) que corresponde

a las direcciones del viento de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , la familia M (medianas succiones), que corresponde a las direcciones del viento de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $80^\circ$  y la familia H (altas succiones) que corresponde a las direcciones del viento  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $60^\circ$ , Ver figura 5.10. De esta forma resulta que las presiones máximas se presentan con ángulos de incidencia de viento oblicuos perteneciendo a la familia de comportamiento H.

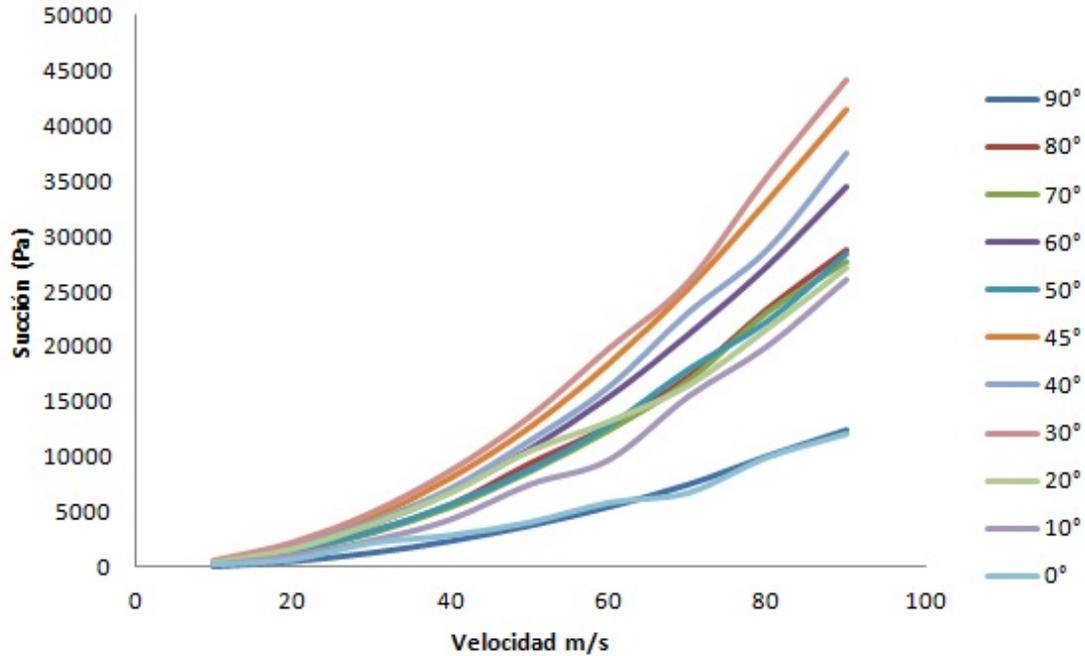


Figura 5.10: Succiones sobre el modelo

La Figura 5.11, muestra la comparación de los resultados de los análisis de distribución de succiones en el sistema de techo para direcciones de viento de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  de los modelos con diferentes pendientes de techo,  $5^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ . Las succiones presentadas en la figura 5.11 están referenciadas a una velocidad media del viento de  $60 \text{ m/s}$ .

Se muestra que las direcciones de viento oblicuas ( $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $45^\circ$ ) causan mayores succiones que las direcciones perpendiculares a los muros ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ), este comportamiento se repite para las tres diferentes pendientes de techo estudiadas. Algunos autores han investigado el efecto que causa el cambio de pendiente del sistema de techo a dos aguas (por ejemplo, **Holmes y Best, 1979; Stathopoulos, 1979; Kanda y Maruta, 1993**), para casa habitación de madera. Estos autores han encontrado que para direcciones de entrada del viento perpendiculares a los muros ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) con pendiente de techo media ( $\beta$  arriba de  $7^\circ$ ), el flujo se separa en el borde superior del muro y vuelve a unirse en el techo del barlovento cerca de la cresta creando succiones en el techo del barlovento y presiones en el techo del sotavento. Este comportamiento también es observado en el presente estudio.

Podemos ver en la Figura 5.11 que la distribución de succiones varía al modificar la pendiente del techo y es más pronunciada para  $\theta=40^\circ$ , donde se nota un cambio más

importante en la distribución de succiones al variar la pendiente del techo. Como ya se mencionó, para pendientes de techo  $\beta=5^\circ$  las succiones máximas se encuentran en la esquina más cercana del lado del barlovento, con un valor de succión máximo de  $19825 \text{ Pa}$  para ángulos oblicuos entre  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . Sin embargo, al incrementar la pendiente de techo a  $\beta=20^\circ$  y  $\beta=30^\circ$ , las succiones en esta esquina comienzan a desaparecer y nuevas zonas de succiones aparecen en la cresta del techo del sotavento, con valores de succión máximos de  $27277 \text{ Pa}$  y  $21748 \text{ Pa}$  para  $\beta=20^\circ$  y  $\beta=30^\circ$  respectivamente, valores mucho mayores comparados con  $\beta=5^\circ$ .

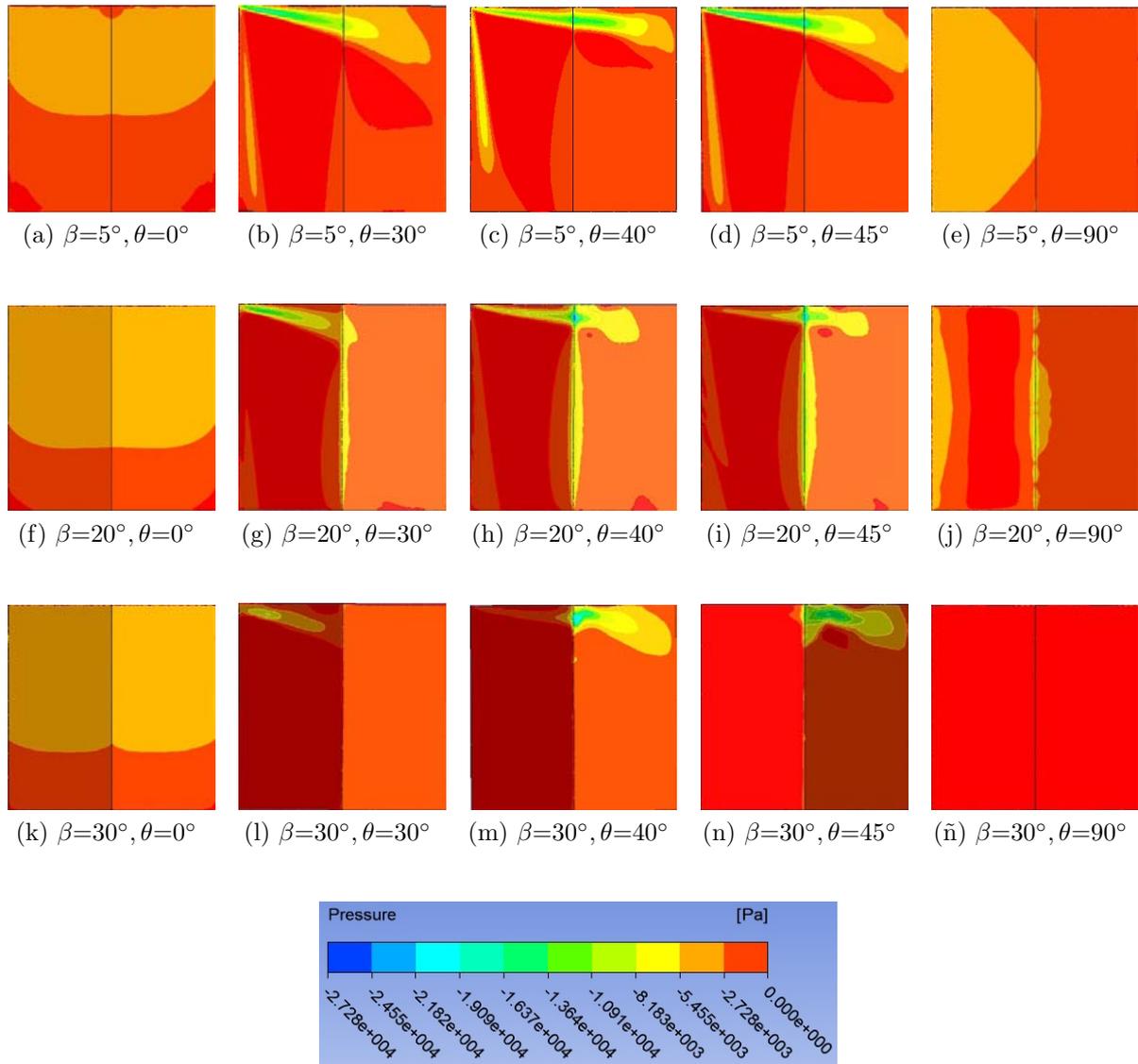


Figura 5.11: Comparación de la distribución de succiones con una velocidad media del viento de  $60 \text{ m/s}$ , con ángulo de inclinación del techo a dos aguas y dirección del viento  $\beta$  y  $\theta$  respectivamente.

Para la dirección de entrada del viento  $\theta=0^\circ$ , el comportamiento de las succiones es similar al aumentar la pendiente de techo, el flujo se separa en el borde superior del muro creando succiones en gran parte del techo. La zona en donde se une el flujo varía al aumentar la pendiente del techo, cuando la pendiente de techo aumenta, disminuyen las zonas de presión

en el techo. Por otra lado, para la dirección de entrada del viento  $\theta=90^\circ$  al aumentar la pendiente de techo disminuyen las zonas de succiones de tal manera que con una pendiente de techo  $\beta=30^\circ$  las succiones son casi despreciables. Para esta pendiente de techo y con esta dirección las presiones son las acciones que gobiernan sobre el techo, pero con valores relativamente bajos.

En la Figura 5.12 se muestran las succiones máximas que se presentan sobre el techo para diferentes ángulos de incidencia del viento y pendientes de techo con una velocidad media del viento de  $60\text{ m/s}$ . Se puede observar que al variar la pendiente del techo de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , las succiones para ángulos de incidencia del viento entre  $50^\circ$  y  $90^\circ$  tienden a disminuir considerablemente mientras que las presiones en estas direcciones aumentan en el techo.

SUCCIONES (Pa)											
$\theta$ $\beta$	$90^\circ$	$80^\circ$	$70^\circ$	$60^\circ$	$50^\circ$	$45^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$20^\circ$	$10^\circ$	$0^\circ$
$5^\circ$	5513	12778	12329	15426	12780	18510	16326	19825	13190	9774	5817
$20^\circ$	5136	8154	14964	18495	22266	25677	27277	15367	11172	4293	5311
$30^\circ$	231	525	641	809	722	17223	21748	8526	9232	4107	5941

Figura 5.12: Succiones máximas para diferentes pendientes de techo

Este comportamiento es debido a que al aumentar la pendiente del techo, se va creando una superficie cada vez más perpendicular al flujo del viento, como un muro de barlovento. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 5.11, para pendiente de techo  $\beta=30^\circ$  las zonas de presiones en el techo son mayores pero también se presentan zonas pequeñas con valores de succión importantes.

La figura 5.13, presenta una comparación entre las succiones y presiones máximas que se generan en los modelos con diferentes ángulos de incidencia del viento con una velocidad media del viento de  $60\text{ m/s}$  para las tres diferentes pendientes de techo. En esta figura se nota claramente que las succiones son las acciones que gobiernan en el sistema de techo con valores de 4 a 5 veces mayores que la mayor presión (en valor absoluto).

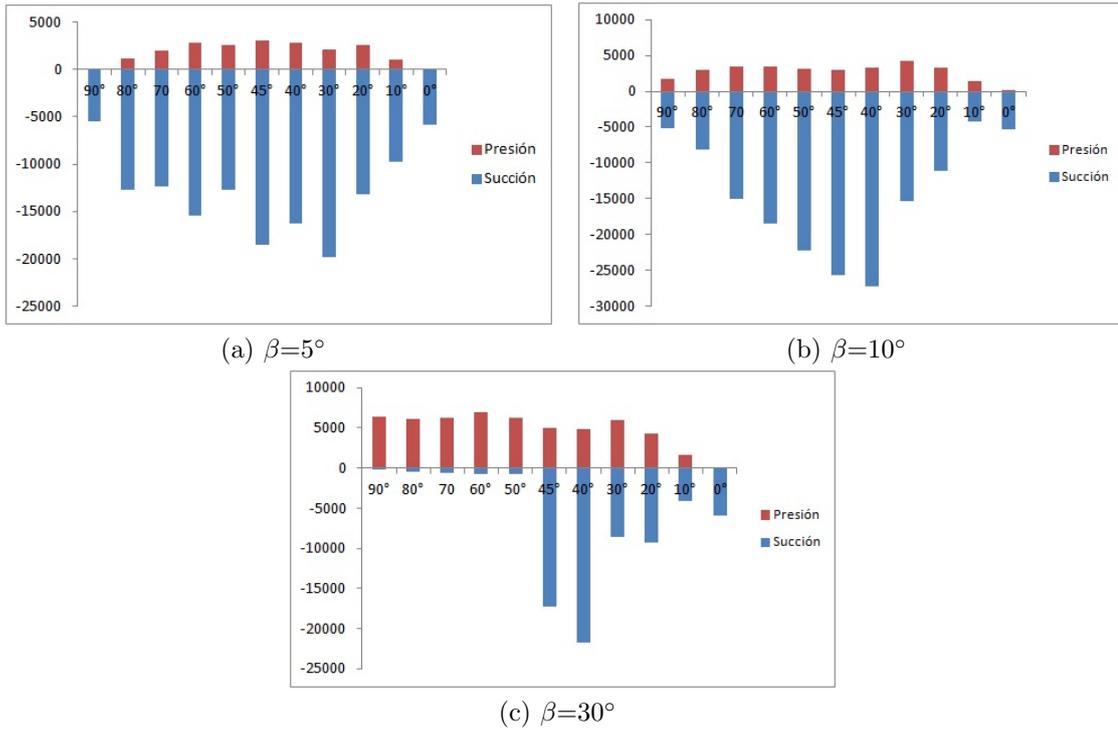


Figura 5.13: Comparación entre las succiones y presiones sobre el techo con una velocidad media del viento de 60 m/s, con ángulo de inclinación del techo a dos aguas y dirección del viento  $\beta$  y  $\theta$  respectivamente.

Para estudiar el efecto que se produce al tener edificios colindantes se hicieron análisis con diferentes configuraciones variando la distancia entre los edificios que rodean a un edificio principal. En la Figura 5.14 se muestran las presiones causadas por el paso del viento entre los edificios colindantes de la configuración III en un esquema de contornos. En esta figura se puede observar que los edificios colindantes sufren grandes presiones causadas por el paso del viento y que en algunas áreas son mayores que las presiones en el edificio principal. También se puede ver en esta figura que en el edificio principal se producen áreas de succiones muy pequeñas en comparación a las áreas de succiones que se presentan en los edificios colindantes.

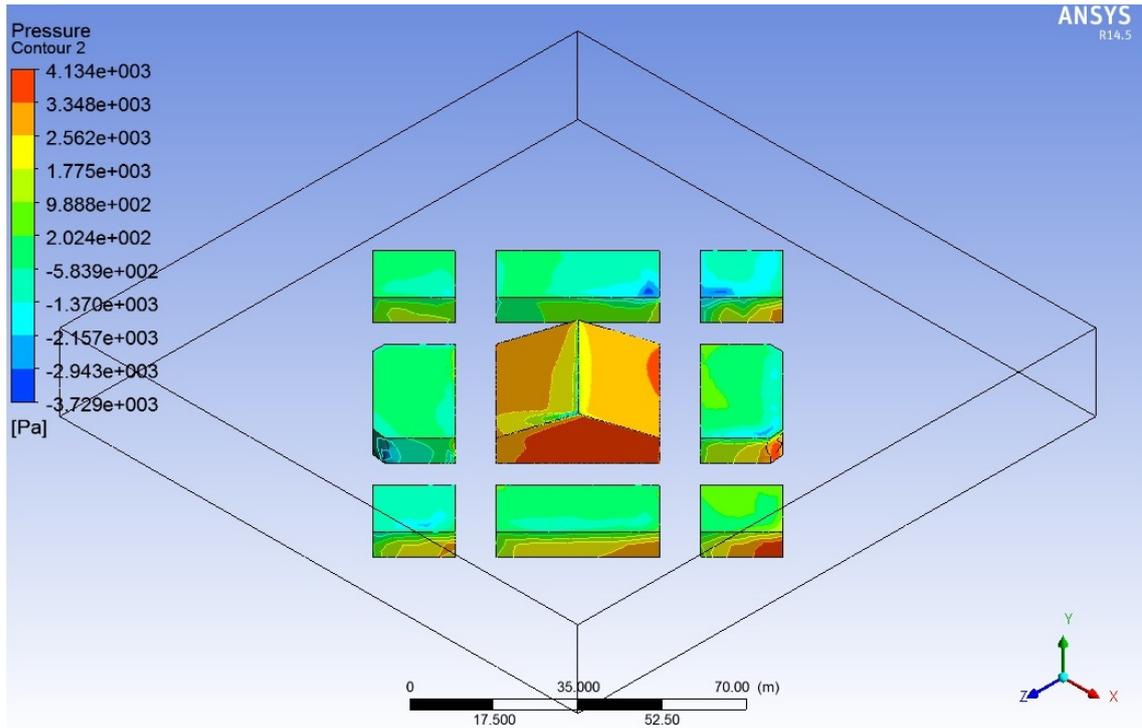
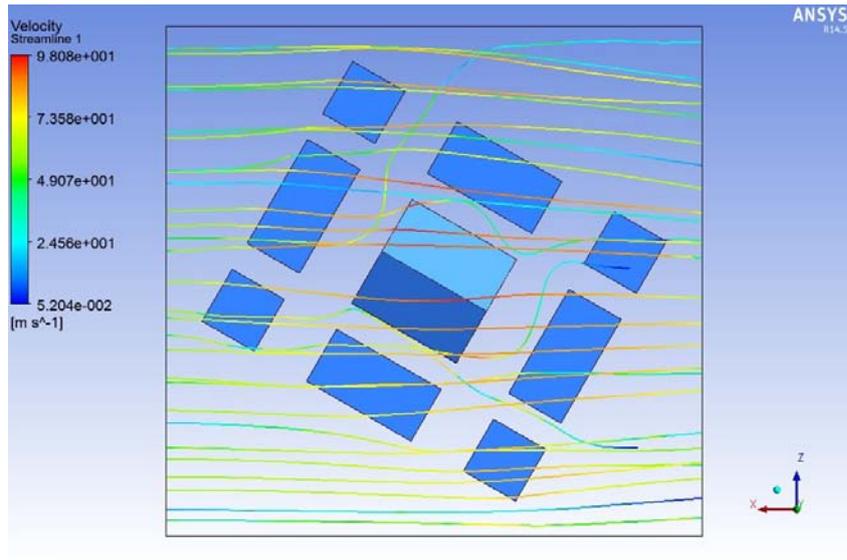


Figura 5.14: Presiones sobre el modelo con edificios colindantes, configuración III

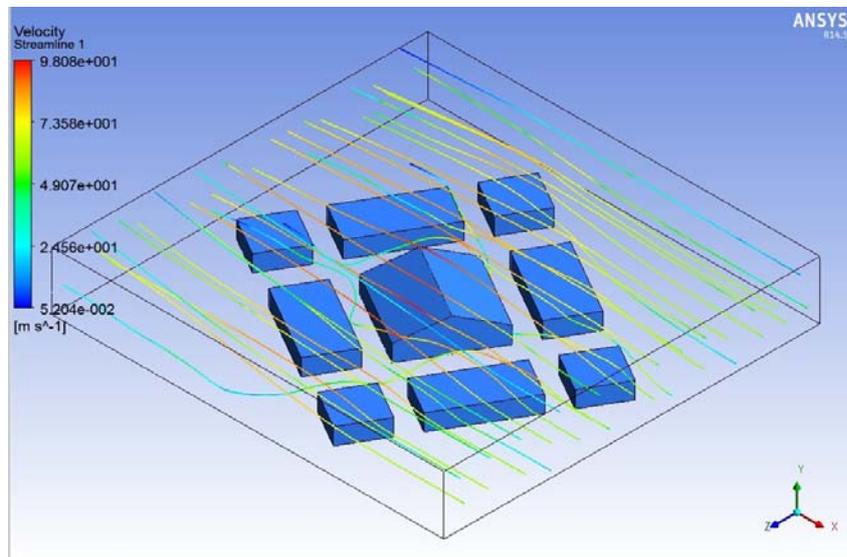
En la Figura 5.15 se muestra la trayectoria del viento a través de los edificios con una dirección de entrada del viento  $\theta=45^\circ$  y una configuración de edificios colindantes III, se nota que la trayectoria del viento cambia bruscamente de dirección cuando se encuentra con los edificios colindantes creando zonas de baja presión y por lo tanto aumentando la velocidad del viento llegando a casi los 100 m/s. En consecuencia, se puede concluir que el flujo a través del modelo se comporta de manera turbulenta creando zonas de succión en los edificios.

Se muestra en la Figura 5.16 la distribución de las succiones en el techo del edificio principal al variar la configuración de edificios colindantes y se compara con una configuración base, que es un análisis de un modelo sin edificios colindantes. Estos modelos están referenciados a una pendiente de techo  $\beta=5^\circ$  y una velocidad media del viento de 60 m/s.

Hay muchas investigaciones que estudian la interacción que existe entre dos o más cuerpos sólidos al ser sometidos por corrientes de fluidos, por ejemplo, en el diseño de presas y canales o en la industria aeronáutica en el diseño de dispositivos de aviones o transbordadores espaciales. En estos estudios ha resultado que puede haber dos tipos de fenómenos en la interacción de los cuerpos, ya sea que entre estos cuerpos se presente una protección o que se intensifiquen las fuerzas entre ellos causadas por el paso del fluido.



(a)



(b)

Figura 5.15: Líneas de corriente a través del modelo con edificios colindantes, configuración III. (a) vista en planta, (b) vista isométrica

En este estudio se presentaron ambos fenómenos para diferentes ángulos de incidencia del viento. Por ejemplo para la entrada del viento de  $\theta=0^\circ$ , el área sometida a succión en el sistema de techo del edificio principal es casi nula para las configuraciones I, II y III y con una reducción en el valor de la succión que puede ser representativa comparada con la configuración base. En cambio para un ángulo de entrada del viento  $\theta=45^\circ$ , el área sometida a succión en el techo aumenta para la configuración I pero el valor máximo de la succión disminuye ligeramente aunque para las configuraciones II y III el valor máximo de la succión resulta ser mayor que la succión de la configuración base. Para una ángulo de entrada del viento de  $\theta=90^\circ$  con las configuraciones I, II y III las áreas sometidas a succión se presentan por todo el borde de la cumbre del edificio a diferencia de la configuración base que se encuentran en el techo del barlovento más cercanas al muro de entrada, esto es debido a que en las configuraciones I, II y III el desprendimiento de vórtices se crea

en los edificios colindantes llegando el flujo al edificio principal separado, por lo tanto afectando solamente la parte más alta del edificio.

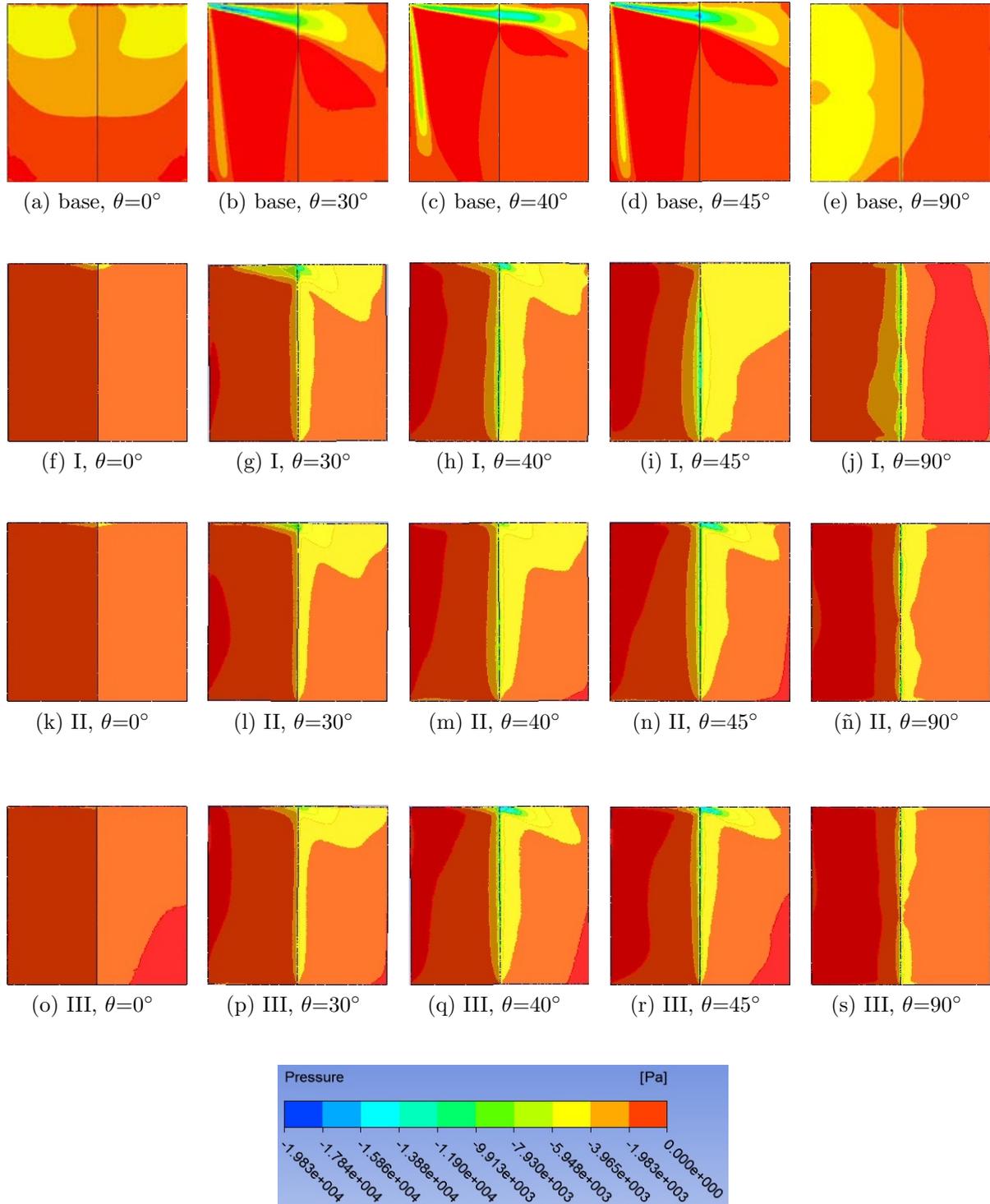


Figura 5.16: Comparación de la distribución de succiones sobre el techo con una velocidad media del viento de 60 m/s, para configuraciones de edificios colindantes I, II y III con diferentes direcciones del viento  $\theta$ .

Para direcciones de viento oblicuas con las tres diferentes configuraciones de edificios colindantes, se nota un cambio en las zonas donde se presentan las succiones. Dichas zonas se trasladan de vórtices en las esquinas hacia la cumbre del edificio dirigiéndose por

todo el borde de la cumbre en las configuraciones con edificios colindantes.

En la Figura 5.17 se muestran los valores máximos de succiones sobre el sistema de techo para diferentes configuraciones de edificios colindantes. Tratándose solamente de valores máximos de succión sobre el techo encontramos que al cambiar la configuración aumentando la separación entre edificios colindantes ocurre una reducción en las succiones para cualquier ángulo de incidencia del viento excepto para la configuración III con ángulo de entrada del viento de  $\theta=45^\circ$  y  $\theta=40^\circ$  donde en estos casos se presenta un aumento en la succión máxima, esto puede ser producto de que en esta configuración existe un mayor espaciamiento entre los edificios y por lo tanto los desprendimientos de vórtices son generados directamente en el edificio principal y no en los edificios colindantes. En la Figura 5.16 (q) y (r) se observa una concentración de esfuerzos en la cumbre creada por dicho fenómeno de desprendimiento de vórtices por la mayor separación que hay entre edificios.

SUCCIONES (Pa)					
$\theta$ c	90°	45°	40°	30°	0°
base	5513	18510	16326	19825	5817
I	14902	16848	15275	14433	6180
II	12693	18254	11743	11586	4588
III	11522	19395	19236	9920	3188

Figura 5.17: Succiones máximas sobre el techo del edificio principal para las configuraciones de edificios colindantes I, II y III.

Con estos resultados de los análisis con edificios colindantes se puede sugerir que para propósitos de diseño no se usen factores de reducción o incremento ya que la variación de los valores de succiones sobre el techo es relativamente baja y por lo tanto los valores de succión con la configuración base sin edificios colindantes puede ser razonable para usarlos en el diseño de sistemas de techo de edificios en regiones con edificios colindantes.

## Capítulo 6

# Comportamiento del sistema de techo con base en perfiles laminados de acero

Los techos de edificios de baja altura son sometidos a intensas presiones externas durante tormentas tropicales. Las cargas en estas áreas pueden ser incrementadas cuando se combinan con presiones internas ocasionadas por la ruptura de algunas zonas de la estructura en el barlovento dando como resultado una mayor succión neta. Por lo tanto, el sistema de techo generalmente experimenta las más grandes presiones de viento en los edificios de baja altura, por esta razón son las áreas más susceptibles a fallar.

Típicamente en México, edificios de baja altura comerciales o industriales tienen techos con cubiertas de láminas de acero fijadas en polines que se encuentran separados entre los 900 y 1800 mm (figura 6.1).



Figura 6.1: Nave industrial típica en México

Las láminas de acero más usadas son corrugadas o acanaladas con diferentes dimensiones y calibres. Por ejemplo, una de las láminas acanaladas más utilizadas es la TR-72 GR33 que es un perfil acanalado de configuración trapezoidal fabricado en planta mediante una roladora estacionaria de rollo de acero que cuenta con un poder cubriente de 72

cm y se puede encontrar con calibres de 22, 24, 26, 28, 30 y 32, lo cual le permite ser más manejable y reducir desperdicios. Esta lámina es una de las más cotizadas dada a su apariencia arquitectónica. Se utiliza en cubiertas y faldones de almacenes y naves industriales, también en tejabanos en patios, cocheras y construcción en general.

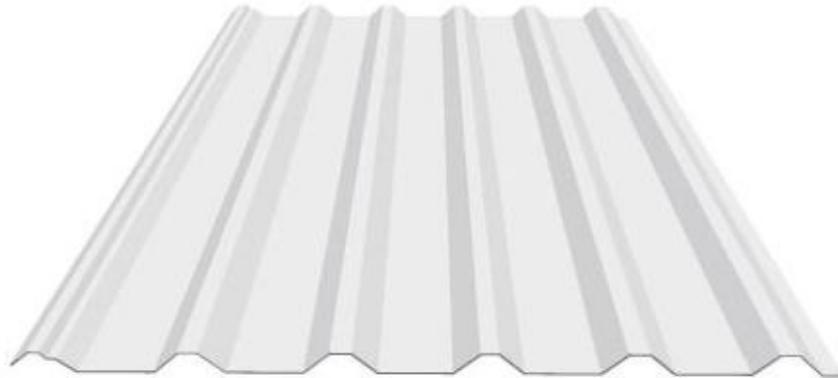


Figura 6.2: Lámina de acero acanalada TR-72 más utilizada en México

GR33 se refiere a acero estructural grado 33 ( $f_y=2320 \text{ kg/cm}^2$  y  $f_u=3162 \text{ kg/cm}^2$ ) y tiene como especificación la A653/A653M-95, la cual cubre a láminas de acero con recubrimiento de zinc (galvanizado) o con aleación de zinc con hierro (galvanizado y endurecido) en longitudes cortas o carretes. El galvanizado se realiza mediante un proceso de inmersión en caliente. Se incluyen varios grados basados en la resistencia por fluencia y baja relajación (figura 6.2).

## 6.1. Descripción del Modelo Matemático en ANSYS MECHANICAL

Un importante objetivo de esta investigación es el desarrollo y estudio de un análisis de elementos finitos de la conexión que existe entre el sistema de techo con la estructura principal del edificio en donde se muestre el comportamiento de la conexión sometida a las succiones debidas a vientos extremos.

En la práctica se usan láminas de acero sujetadas a polines de acero estructural con diferentes separaciones, (ver Figura 6.3) dando como resultado una cubierta de acero con múltiples claros. Como resultado del estudio de la aerodinámica de edificios bajos del capítulo 5, grandes succiones pueden presentarse cerca de las esquinas y en la cresta en edificios con techos a dos aguas. Este modelo numérico considera una lámina acanalada sujeta a dos polines de acero estructural (un claro) utilizando sujetadores autorroscables en cada valle de la lámina, como usualmente se usa en la práctica.



Figura 6.3: Cubierta típica en naves industriales

Para modelar la conexión se utilizaron 3 diferentes elementos, la lámina acanalada TR-72, perfil estructural Montén (polin) y sujetadores autorroscables, las especificaciones de estos tres elementos se muestran en las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6.

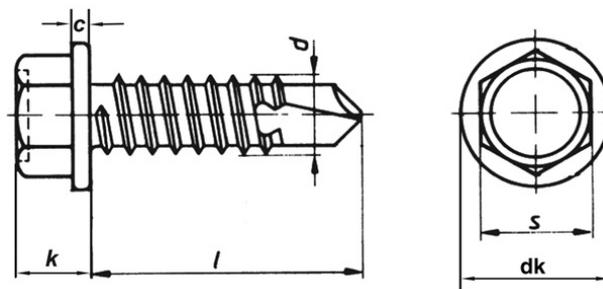


Figura 6.4: Dimensiones del sujetador autorroscable de acero A325  $f_y=6330 \text{ kg/cm}^2$ ,  $d=0.25''$ ,  $l=1.25''$ ,  $k=0.24''$ ,  $c=0.04''$ ,  $s=0.35''$  y  $dk=0.52''$

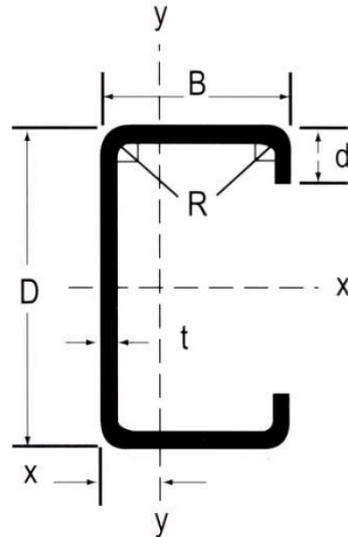


Figura 6.5: Dimensiones del polín monten de acero A36,  $D=203\text{mm}$ ,  $B=76\text{mm}$ ,  $d=19\text{mm}$ ,  $t=1.9\text{mm}$  y  $R=9.5\text{mm}$

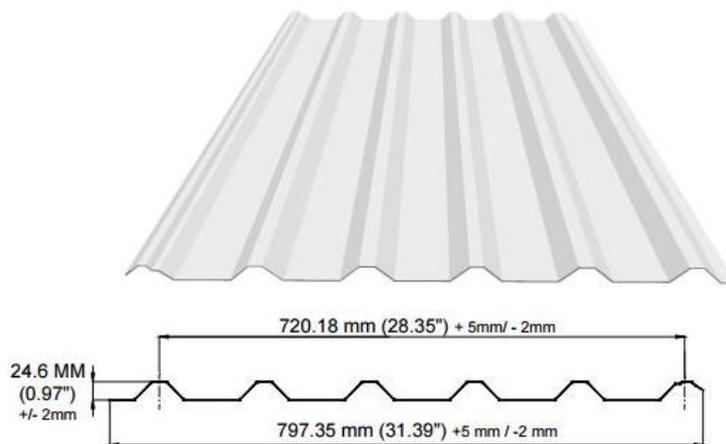


Figura 6.6: Dimensiones de la lámina acanalada TR-72 acero A653 grado 33  $f_y=2320\text{ kg/cm}^2$  y  $f_u=3162\text{ kg/cm}^2$ , calibres 22, 24 y 26

Para estudiar y entender de mejor forma el comportamiento que existe en la conexión de la lámina con la estructura principal, dos diferentes modelos fueron desarrollados en este estudio:

1. Modelo con un solo sujetador (M1S). Este simple modelo fue desarrollado primero para adquirir un entendimiento básico del comportamiento de la conexión cuando se le aplican cargas de succión. Este modelo solo considera una porción de lámina y polín conectadas por un sujetador (ver figura 6.7)(no se darán resultados de este modelo).
2. Modelo con múltiples sujetadores (MMS). Este modelo tiene una lámina conectada por 10 sujetadores hacia dos polines generando un claro entre dichos polines. Este

modelo fue desarrollado para generar un comportamiento más parecido a lo que sucede en la realidad y estudiar de mejor manera el comportamiento de una lámina completa sujeta a la estructura principal (ver figura 6.8 ). Este tipo de modelo es con el que se trabajó en la investigación. Las configuraciones que se tomaron en cuenta de este tipo de modelo se presentan en la tabla 6.1.

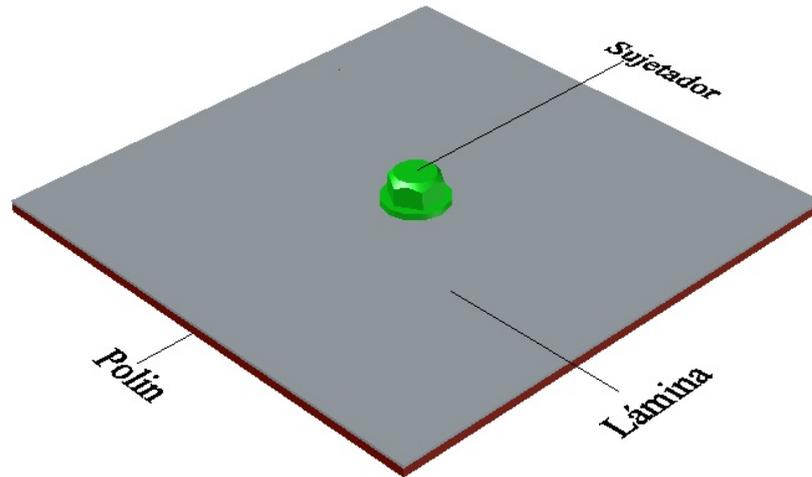


Figura 6.7: Modelo M1S

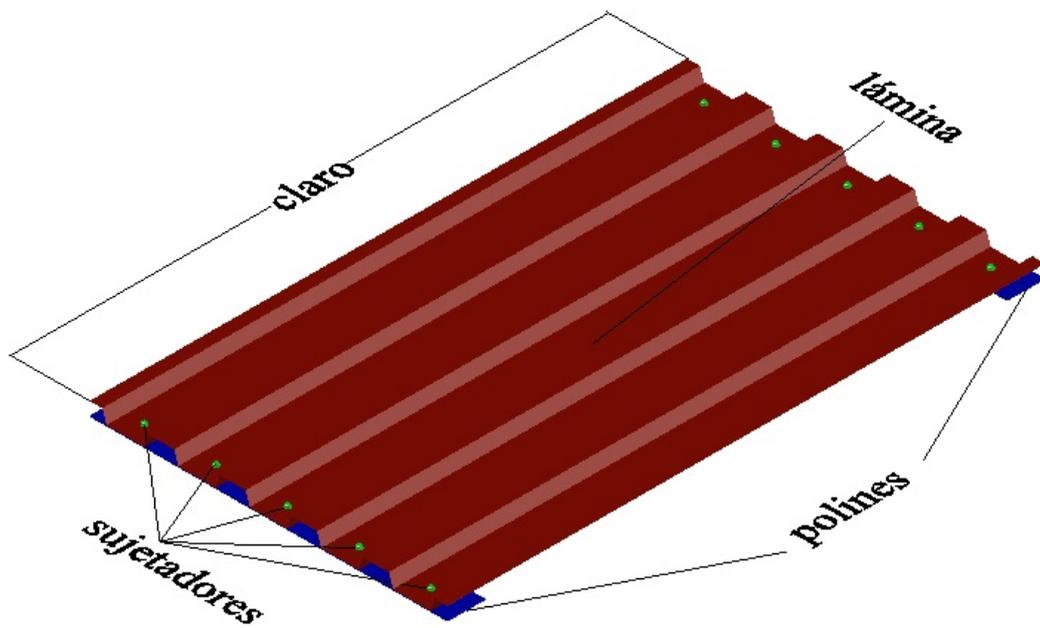


Figura 6.8: Modelo MMS

Tabla 6.1: Configuraciones de los modelos realizados

Prueba No.	Lámina <sup>1</sup>	Calibre	Claro
1	TR-72	22 (0.7595)	1100
2	TR-72	24 (0.5309)	1100
3	TR-72	26 (0.4547)	1100

<sup>1</sup> Material de la lámina: Acero A653 Gr33  $f_y=2320$  kg/cm<sup>2</sup> y  $f_u=3162$  kg/cm<sup>2</sup>

\*Nota: números entre paréntesis y claros en mm

### 6.1.1. Mallado de los elementos

Como se mencionó en el capítulo 5, la selección de las características del mallado de los modelos es crítica. Detalles del mallado de los modelos se mencionan a continuación.

Para el mallado de los modelos se tomaron en cuenta varias consideraciones, una de ellas es que se supuso que se encontrarían grandes concentraciones de esfuerzos cerca de los orificios de los sujetadores por lo que un mallado más fino fue considerado alrededor de los orificios de la lámina y del polín para los dos modelos desarrollados. Otra consideración fue que en el modelo MMS se utilizó un mallado fino en el centro del claro de la lámina ya que en esta parte es donde se esperaban que ocurrieran las mayores deformaciones. En los sujetadores por ser elementos pequeños respecto al tamaño de la lámina y el polín en el modelo MMS, el tamaño del mallado es relativamente pequeño comparado con el tamaño del mallado del polín y la lámina.

Hablando en términos más específicos, para el modelo MMS el tamaño de los elementos del mallado cercanos a los orificios de los sujetadores en los polines y lámina son de 10 mm mientras que el tamaño de los elementos de los sujetadores son en promedio de 2 mm. En la lámina y en los polines el tamaño del mallado lejos de los orificios es de alrededor de los 25 mm.

En la figura 6.9 se muestra esquemáticamente el mallado de los elementos del modelo MMS.

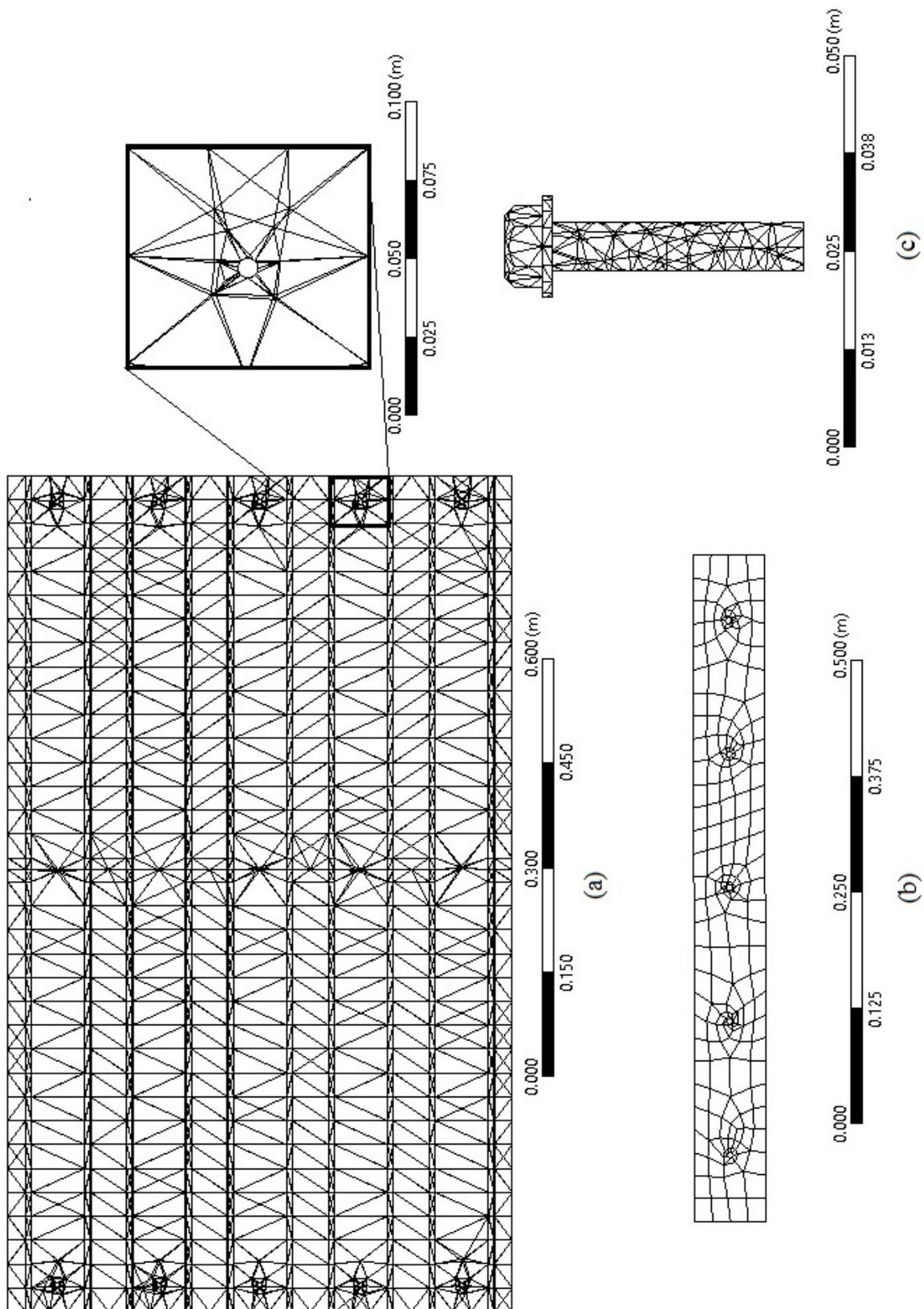


Figura 6.9: Mallado del modelo MMS

### 6.1.2. Propiedades de los materiales

La librería de materiales en ANSYS Mechanical permite modelar muchos materiales para fines ingenieriles incluidos metales y plásticos. El usuario puede seleccionar cualquier número de diferentes materiales para la simulación. Además este software permite agregar cualquier material con las propiedades que se deseen por medio del editor de materiales. En este modelo, diferentes elementos están asociados con diferentes materiales mediante la asignación de las propiedades de los materiales deseados.

En este estudio se necesitaron 3 diferentes tipos de materiales, acero estructural A36 para los polines, acero estructural grado 33 (A653/A653M-95) para la lámina y acero estructural A325 para los sujetadores (ver figura 6.10). En todos los casos se tomó en cuenta el comportamiento no lineal para los análisis.

Las propiedades de los 3 materiales utilizados se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Propiedades de los materiales utilizados

Acero	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de poisson	Límite de fluencia (Pa)
A36	200,000	0.3	2.5 E+08
A653	200,000	0.3	2.27 E+08
A325	200,000	0.3	6.3 E+08

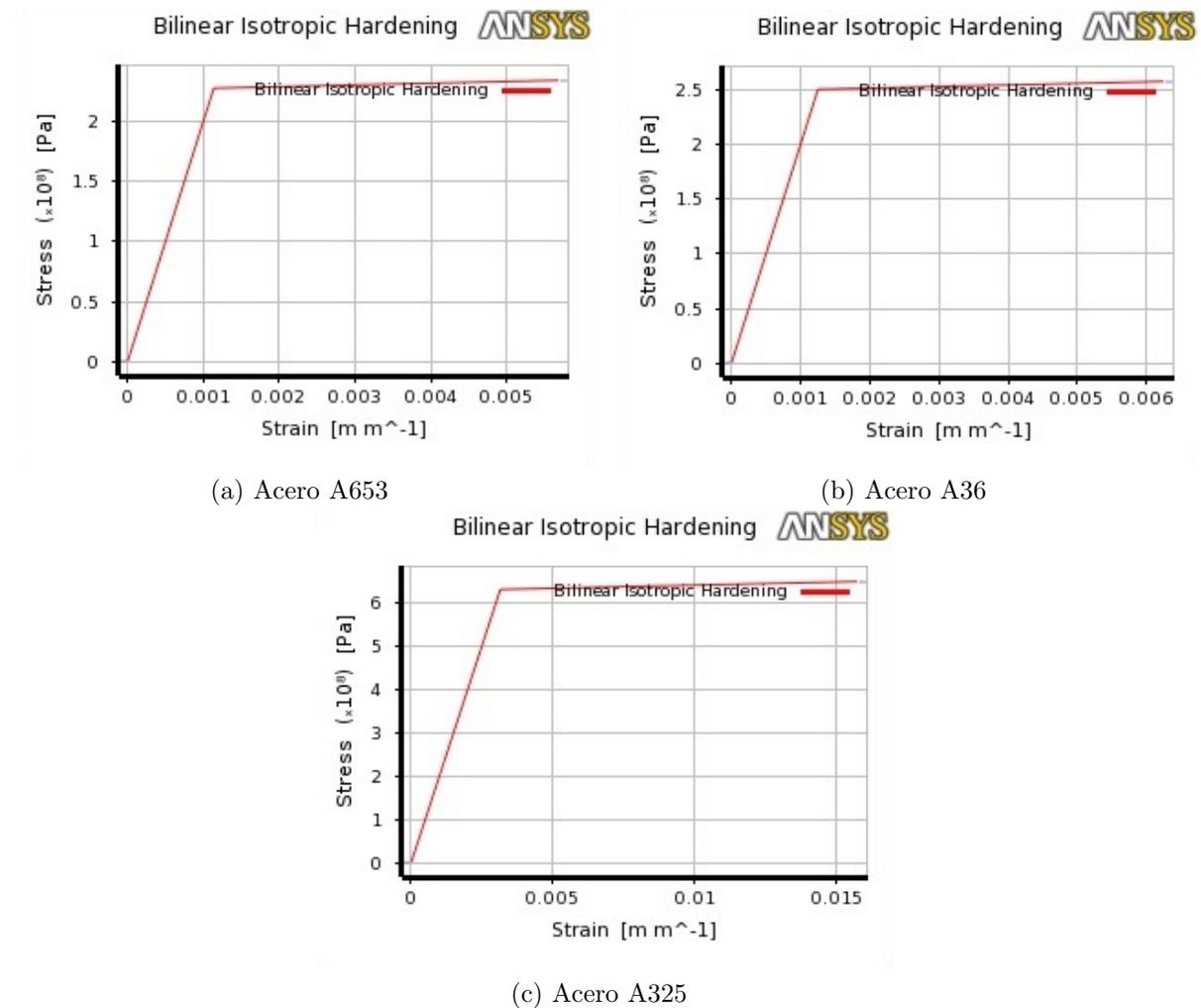


Figura 6.10: Propiedades de los materiales utilizados

### 6.1.3. Cargas y condiciones de apoyo

La intensidad de una prueba de presiones de viento debe de ser replicar los efectos reales de las cargas de viento en componentes de edificios bajo condiciones controladas que el componente podría experimentar en un evento con vientos extremos. También debe de ser posible repetirlo bajo las mismas condiciones en cada prueba, de modo que comparaciones razonables se puedan hacer en el desempeño de cualquier sistema de techo o muro. Por esta razón se ha desarrollado un simple protocolo de pruebas de presiones estáticas uniformes de viento basado en el ASTM E330-02, procedimiento B (ASTM 2004b). Estas pruebas asumen que las cargas de viento pueden ser modeladas como presiones pseudo-estáticas en un edificio rígido.

El método ASTM E330-02 describe la determinación del desempeño estructural de ventanas puertas muros entre otros componentes bajo diferencias de presiones estáticas uniformes de viento usando una cámara de pruebas. Para el propósito de esta investigación se usó como referencia este protocolo en los análisis de elementos finitos en ANSYS Mechanical. Se tomó en cuenta el procedimiento step-and-hold, usando mesetas de presión de 10 segundos, presión inicial diferente de 0 e incrementos de presión de 5750 Pa hasta

llegar al estado límite de falla (ver figura 6.11). El estado límite de falla se define en la sección 6.1.4.

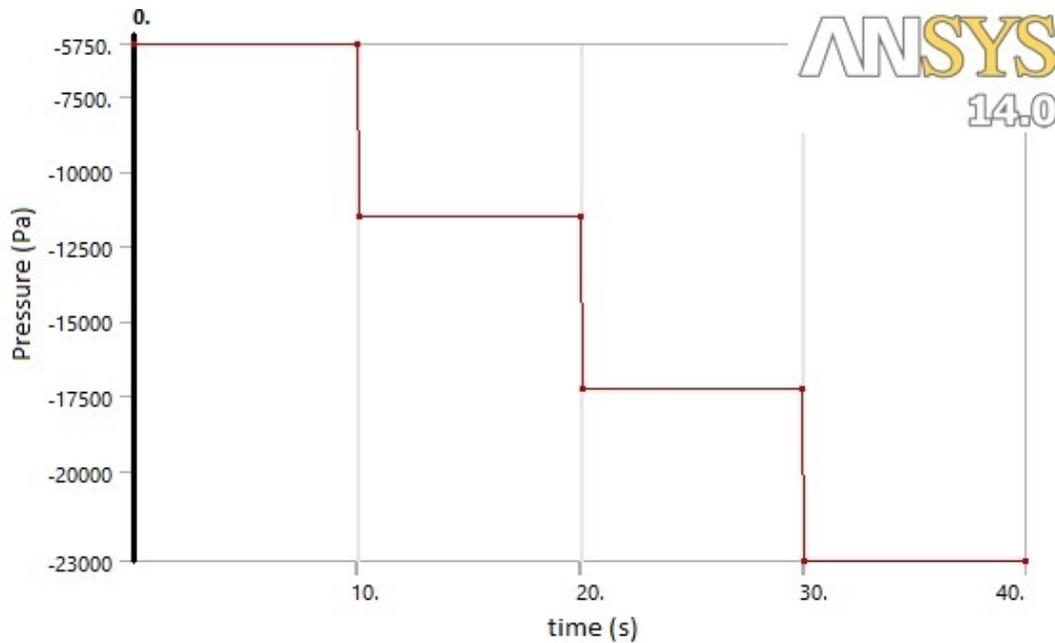


Figura 6.11: Aplicación de las cargas sobre el modelo

ANSYS Mechanical permite la aplicación de cargas de presión en los elementos. La succión estática del viento se representó como una carga uniformemente distribuida mediante una superficie sobre la lámina. En la figura 6.12 se muestra una representación de la deformada del modelo y la aplicación de las cargas.

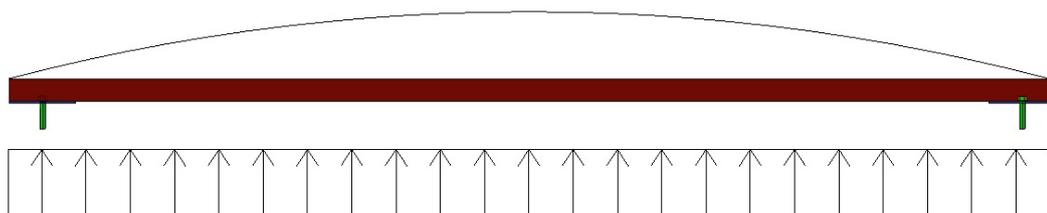


Figura 6.12: Deformada y aplicación de las cargas sobre el modelo

Las condiciones de apoyo para el modelo MMS se pueden observar en la figura 6.13. La lámina está simplemente apoyada sobre dos polines empotrados y estos elementos están conectados mediante sujetadores. Para modelar adecuadamente el comportamiento de la conexión de los elementos se tomaron en cuenta condiciones de contacto entre los elementos, por ejemplo el contacto entre el sujetador y la lámina es de tipo friccional.

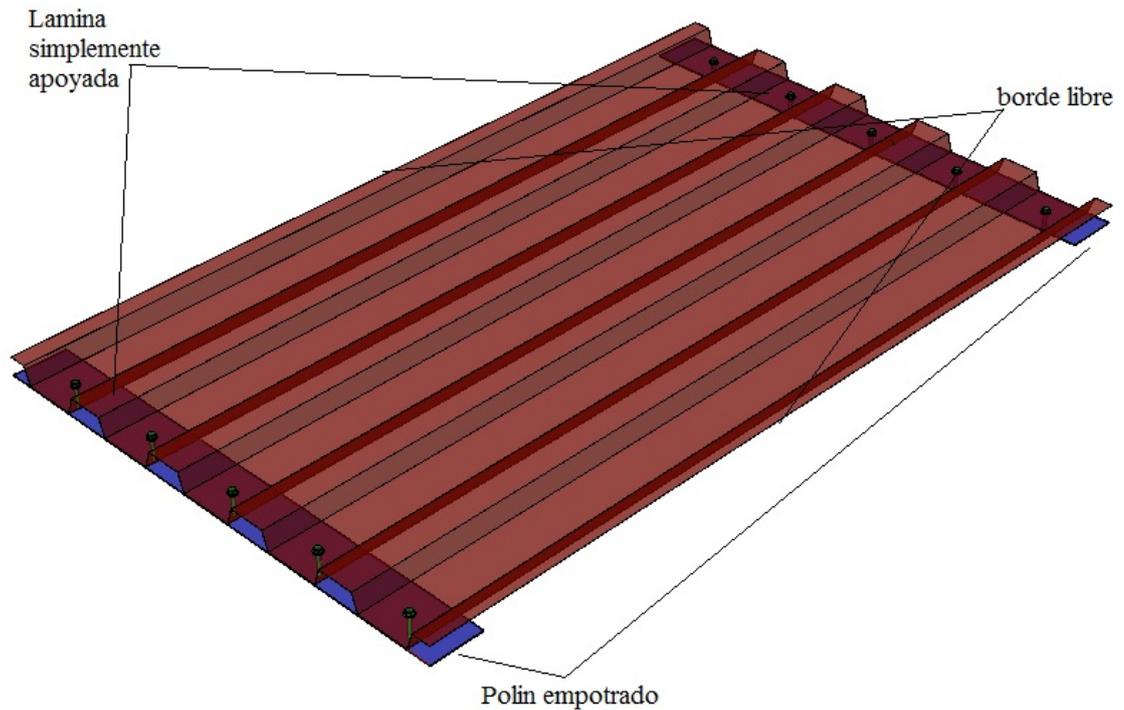


Figura 6.13: Condiciones de apoyo del modelo MMS

La cabeza del sujetador puede afectar la localización de las deformaciones y crear concentraciones de esfuerzos alrededor del orificio en la lámina. Por esta razón se modeló el contacto entre la lámina de acero el polín y el sujetador. Para esto se utilizó la opción de contactos contact-tarjet de ANSYS Mechanical. Esta opción une las superficies de contacto para modelar de manera adecuada el comportamiento entre los elementos y como consecuencia eliminar discontinuidades severas. Tres diferentes tipos de superficies de contacto se utilizaron en este estudio, friccional, unido y sin fricción. Para el contacto entre la superficie del sujetador, el polín y lámina se utilizó el tipo friccional para que el sujetador actuara de la forma más adecuada a la realidad. El contacto entre la lámina y el polín se consideró sin fricción, esto con el fin de simular que la lámina estuviera simplemente apoyada sobre el polín y por último, el contacto entre la cabeza del sujetador con la lámina se consideró del tipo unido para que no hubiera discontinuidades al momento de aplicar la carga de succión sobre el modelo. (ver figura 6.14).

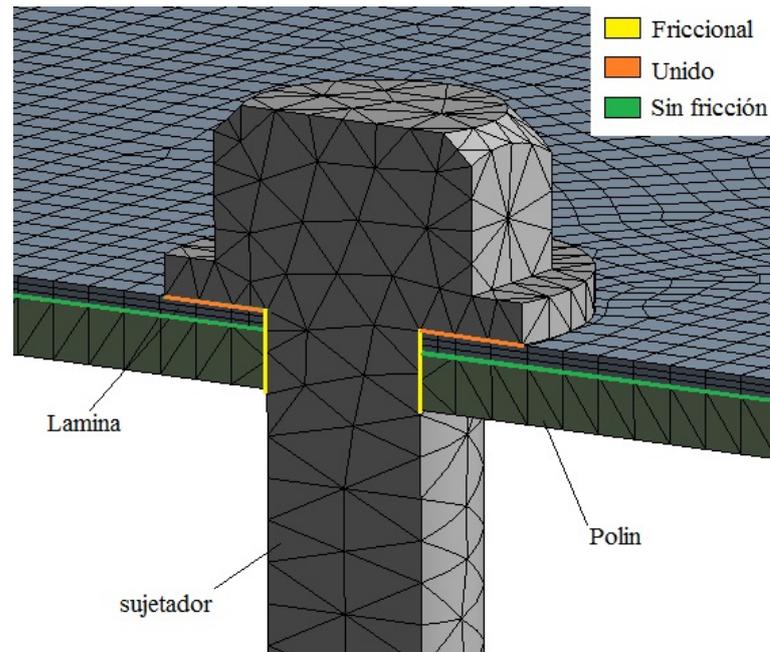


Figura 6.14: Elementos en contacto

El mallado de los elementos tiene un papel muy importante al utilizar la herramienta de superficies de contactos. Para utilizar dicha herramienta se tiene que considerar una superficie tipo contact y otra tipo tarjet. Un problema común que surge al modelar superficies de contacto es que la superficie contact puede penetrar en la superficie tarjet. Esto se puede evitar si se usa un mallado fino en estas superficies. Sin embargo, un mallado fino resultaría en mayor número de nodos y elementos por lo tanto un incremento en el tiempo de análisis. Cuando se usa esta herramienta de superficies de contacto, es importante seleccionar las superficies contact y tarjet correctamente para lograr modelar de mejor forma posible el contacto entre elementos. En esta simulación la superficie de la lámina en contacto con el sujetador y el polin fue seleccionada como tarjet con un mallado más fino ya que este elemento es más flexible que los otros. ANSYS Mechanical exige que la superficie tarjet tenga una mallado más fino que la superficie contact, de esta manera la penetración de un elemento a otro es mínima.

#### 6.1.4. Criterio de falla

La falla debida a tracción local en láminas de acero corrugado son iniciadas por una fractura transversal en el borde de los orificios de los sujetadores (Mahaarachchi 2003). Un análisis de elementos finitos no puede predecir este tipo de falla sin el uso apropiado de un criterio de falla. A pesar de que el análisis de elementos finitos confirma la presencia de grandes deformaciones, no puede predecir la falla por tracción ya que se asume que el material tiene un comportamiento perfectamente elasto-plástico con infinita ductilidad. Por lo tanto, se adoptó un criterio de falla para los modelos que se utilizaron.

La American Society for Testing Materials (A 653/A 653M-09, Standard specification

for steel sheet, zinc-coated (galvanized) or zinc-iron alloy-coated (galvannealed) by the hot-dip process) estandariza que el acero A653 grado 33 tiene una deformación unitaria mínima de 20 %. Ensayos de láminas de .42 mm de acero G550 a tracción han mostrado que la deformación última varía de 2 % a 10 %. Sin embargo se concluyó que la falla asociada a tracción local en el borde de los orificios de los sujetadores se presenta cuando la deformación es mayor o igual al 60 % de la máxima deformación unitaria (Maharajchi 2003). La misma propuesta fue utilizada en los modelos usados en este capítulo. Se adoptó que la falla ocurre cuando se presente el 60 % de la deformación máxima del material A653 grado 33 en el borde de los orificios, es decir 12 % de deformación unitaria.

## 6.2. Resultados del análisis

El método utilizado para los análisis fue estático no lineal en ANSYS Mechanical. también se incluyeron los efectos de grandes deformaciones y fluencia de los materiales para investigar el comportamiento de las láminas de acero. Además, este análisis realiza la solución de las ecuaciones no lineales por medio del método de Newton-Raphson.

Durante los análisis se observó que el comportamiento de los modelos de conexiones que se probaron bajo succiones de viento es complejo. Se presentan grandes distorsiones en la sección transversal de la lámina desde estados tempranos de carga, seguido por la presencia de grandes deformaciones y esfuerzos alrededor de los orificios de los sujetadores. Los polines por ser elementos más rígidos, presentan pequeñas deformaciones que se pueden despreciar. Los esfuerzos y deformaciones en los sujetadores son grandes en comparación con los que se presentan en la lámina pero no llegan a los límites de resistencia del material. Por esta razón se optó por estudiar más a fondo el comportamiento de las láminas ya que por ser elementos menos rígidos experimentan mayores esfuerzos y deformaciones. Los resultados del análisis muestran grandes deformaciones en la lámina, esto causa deformaciones locales alrededor de los orificios de los sujetadores (ver figuras 6.15, 6.16 y 6.17).

En las figuras 6.18 y 6.19 se muestran los resultados obtenidos del análisis del modelo con la lámina calibre 24 con 1100 mm de claro entre los polines. Como se mencionó en la sección 6.1.4, el punto de falla se tomó en cuenta cuando la deformación unitaria en los bordes de los orificios de los sujetadores alcanzaba un valor de 60 % de la deformación unitaria última del material, en este caso, el límite de falla es de .12 m/m.

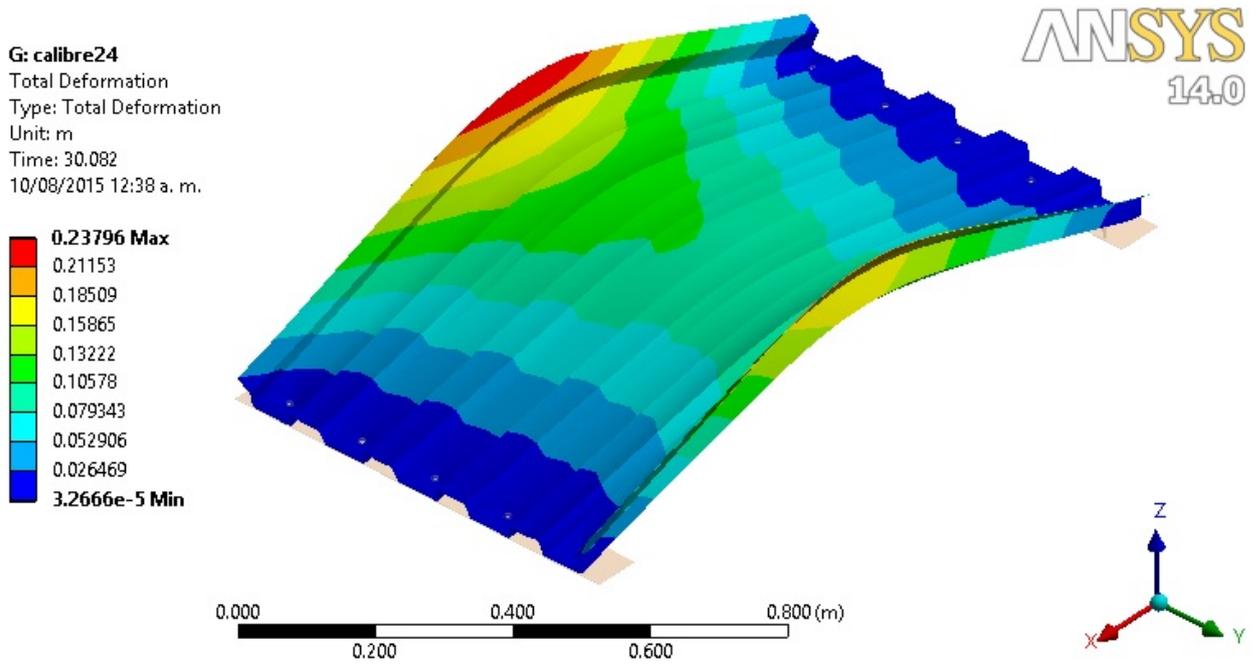


Figura 6.15: Vista isométrica de deformaciones en la lámina

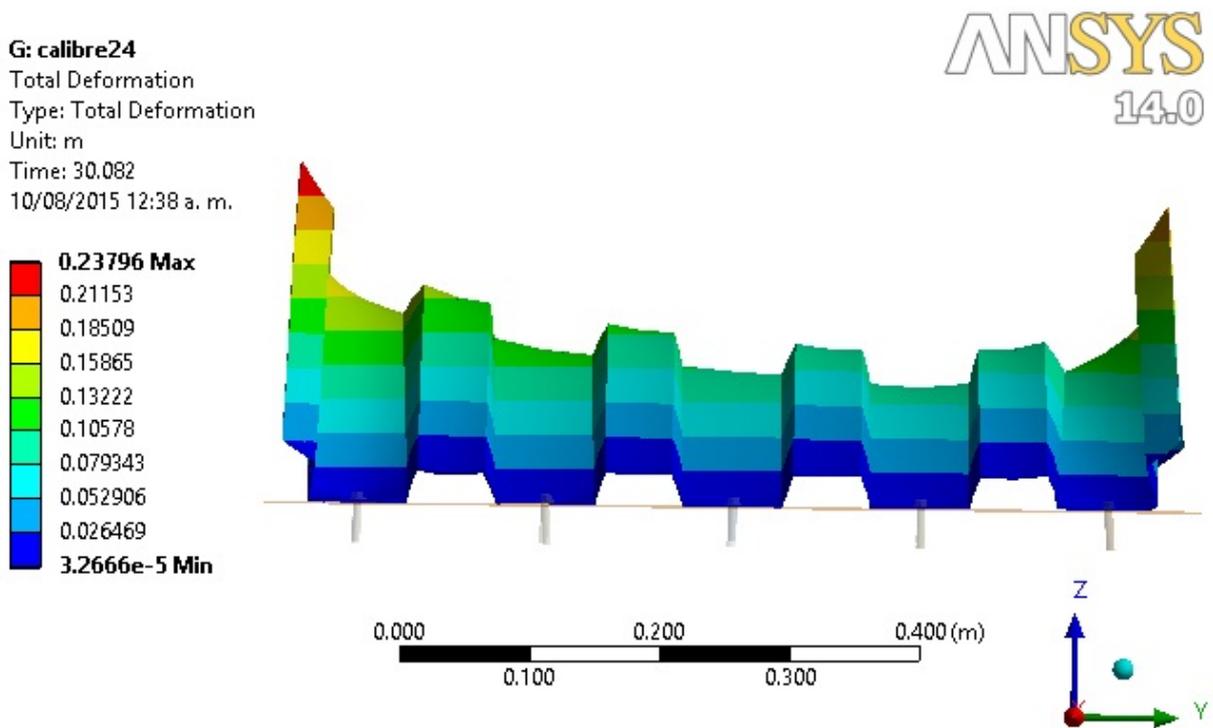


Figura 6.16: Vista transversal de deformaciones en lámina

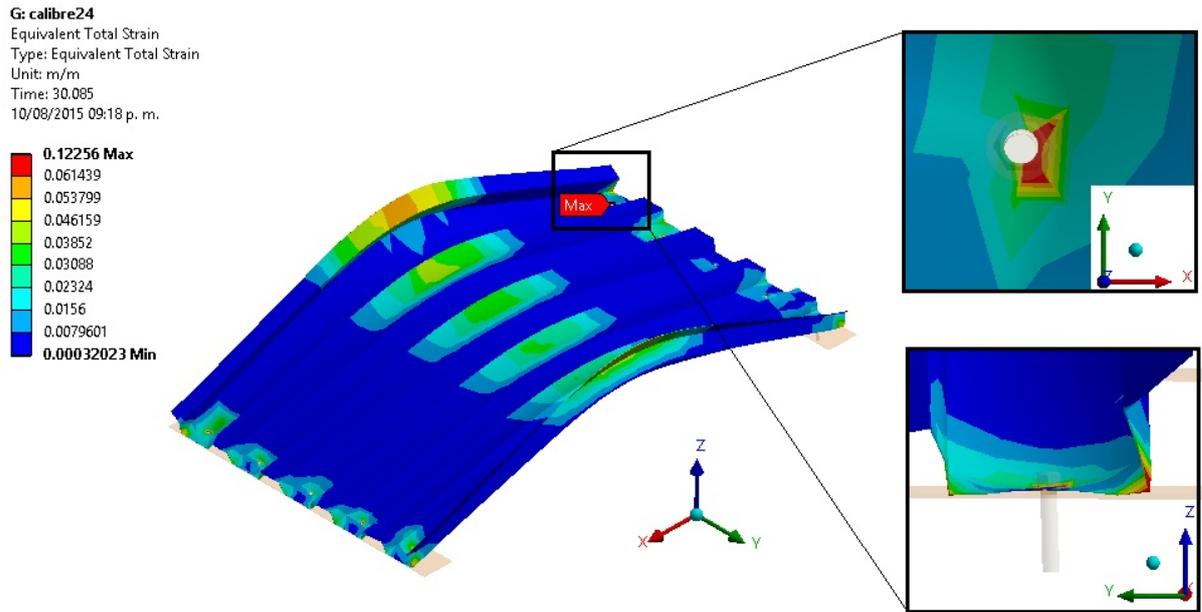


Figura 6.17: Detalle de deformaciones unitarias en la lámina

El análisis revela que la lámina calibre 24 falla cuando la presión alcanza un valor de 21965 Pa. En este momento, se logra alcanzar una deflexión en el centro del claro de alrededor de .10 m. Es posible que al alcanzarse este nivel de deformaciones en el borde del orificio del sujetador en conjunto con la deflexión en el centro del claro se llegue a presentar una falla por desprendimiento de la lámina.

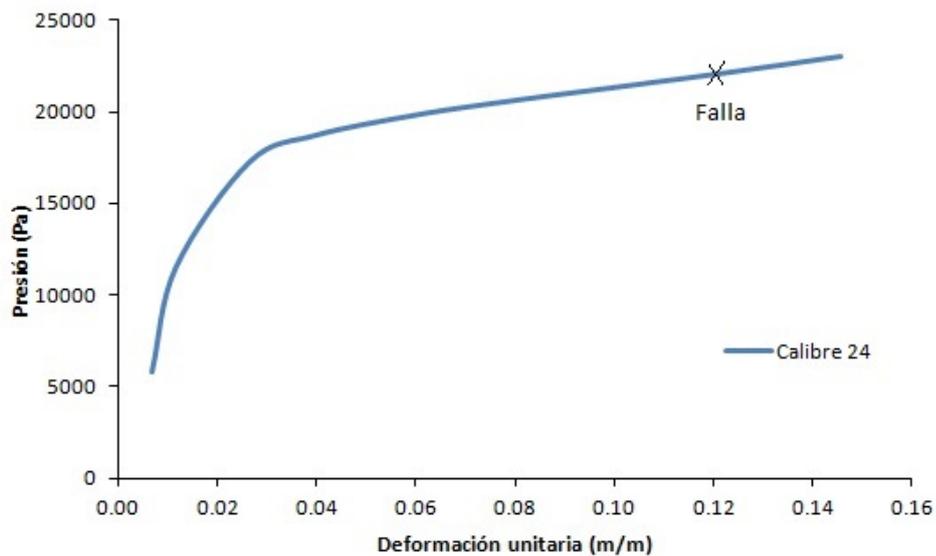


Figura 6.18: Gráfica deformación unitaria vs presión calibre 24 hasta la falla.

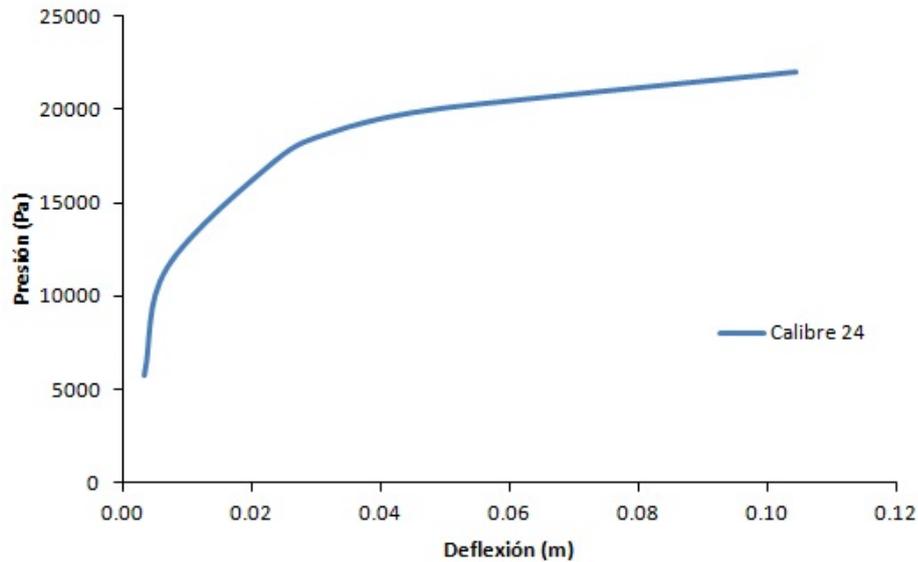


Figura 6.19: Gráfica deflexión-presión lamina calibre 24

### 6.2.1. Efecto del espesor de la lámina

También se realizaron análisis para investigar los efectos del espesor en la carga última de la lámina. Las figuras 6.20 y 6.21 muestran las deformaciones unitarias y deflexiones en el centro del claro de tres espesores de lámina diferentes, calibre 22 (0.7595 mm), calibre 24 (0.5309 mm) y calibre 26 (0.4557 mm). Los resultados indican que al incrementar el espesor de la lamina aumenta significativamente la carga de falla. La carga última de la lámina calibre 24 fue de 21965 Pa, mientras que en las láminas calibre 22 y 26 fueron de 24063 Pa y 18800 Pa, respectivamente.

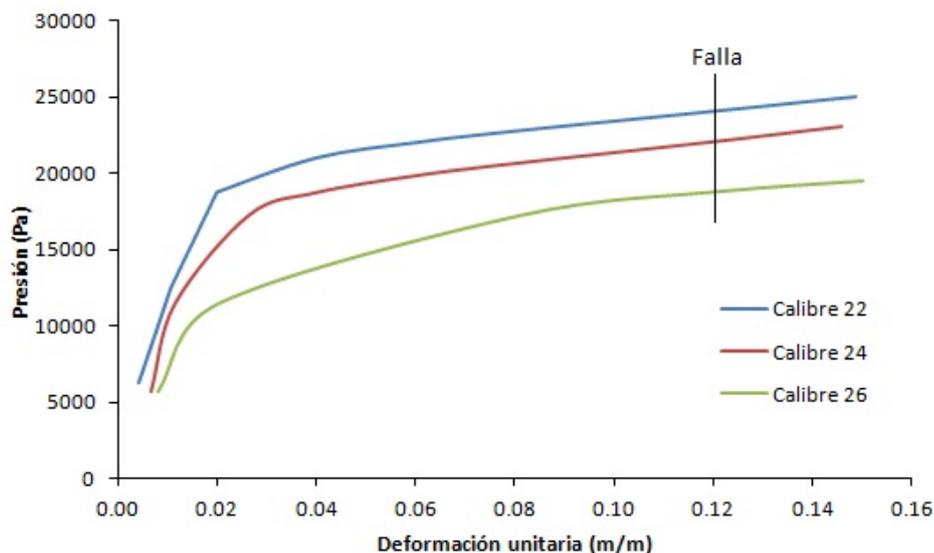


Figura 6.20: Gráfica deformación unitaria vs presión para diferentes espesores.

Además, se muestra en la figura 6.21 que al aumentar el espesor, la lámina puede llegar a tener deflexiones en el centro del claro más grandes antes de llegar a fallar. La lámina calibre 24 llega a la falla con una deflexión en el centro del claro de 0.11 m, mientras que en las láminas calibre 22 y 26 llegan a un valor de 0.14 m y 0.07 m respectivamente.

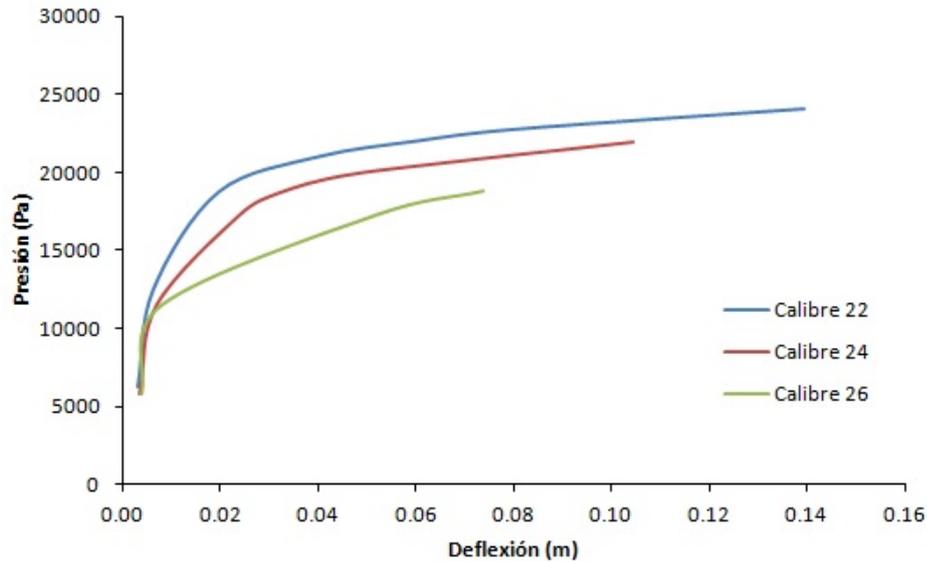


Figura 6.21: Gráfica deflexión vs presión para diferentes espesores.

### 6.3. Método para determinar la resistencia de desprendimiento en láminas de acero

La resistencia de láminas de acero conectadas con sujetadores es de gran importancia para el diseño de sistemas de techo con perfiles laminados de acero. Investigaciones anteriores se ha centrado en el uso de métodos experimentales para desarrollar fórmulas empíricas para calcular la resistencia de estos elementos. Actualmente el American Iron and Steel Institute (AISI, 1989, 1992) propone métodos de diseño para una gama de conexiones fijadas mecánicamente con pernos y tornillos en láminas de acero bajo diferentes tipos de carga. La resistencia al desprendimiento de la lámina es calculada con la fuerza resultante en los sujetadores con la siguiente fórmula:

$$F_{ov} = 1.5tdf_u \quad (6.1)$$

donde:

$t, d$  = espesor de la lámina de acero y diámetro mayor de la cabeza del sujetador.

$f_u$  = esfuerzo de fluencia del acero de la lámina.

Para validar los resultados obtenidos en los análisis, se comparó la fuerza en los sujetadores obtenida de los análisis de elementos finitos (AEF) con la calculada con la ecuación 6.1. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Comparación entre la fuerza en los sujetadores obtenida del AEF y Ec. 6.1

Calibre	Análisis Elementos finitos	Ec. 6.1	AEF/Ec 6.1
22	2054.48	2282.43	0.900
24	1675.2	1595.45	1.049
26	1397.6	1366.45	1.022

La fuerza última en los sujetadores que resulta del análisis de elementos finitos se acercan bastante a los valores calculados con la ecuación 6.1. Sin embargo para la lámina calibre 22 los valores difieren un poco más que en láminas calibre 24 y 26. Por lo tanto, podemos decir que esta ecuación es lo bastante acertada para validar los modelos que se analizaron en esta investigación.

# Capítulo 7

## Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de techo

Como se mencionó en el capítulo 3, varios huracanes atraviesan vastas zonas de las costas del Océano Pacífico y golfo de México. El huracán Wilma en 2005 es catalogado como el desastre natural más costoso en la historia de México, con pérdidas totales estimadas en alrededor de 7.5 mil mdd. Dentro de este panorama de pérdidas materiales, las construcciones para finalidades industriales constituyen una clase de gran importancia, porque al ser afectadas no permiten la continuidad de los procesos industriales que se llevan a cabo en ellas, lo que se traduce en pérdidas reales que exceden muchas veces el valor de la construcción. De acuerdo con información histórica, las edificaciones industriales metálicas han resultado bastante afectadas durante estos eventos meteorológicos y con pérdidas económicas considerables debido a los daños en la estructura, material resguardado dentro de la edificación y al cierre de establecimientos.

En un análisis de fragilidad se determina la probabilidad condicional de que una construcción (o un elemento estructural) experimente o exceda un estado límite predeterminado, dada la ocurrencia de una demanda en particular. Teniendo en cuenta esta definición, por ejemplo, si  $P(C/v)$  representa la probabilidad de falla de un componente estructural para la velocidad de viento  $v$  (probabilidad de que los esfuerzos generados por el viento excedan la resistencia del componente), la fragilidad de la cubierta estará entonces definida como  $F(C/v)=1-P(C/v)$ .

### 7.1. Metodologías para la estimación de daño

En general, los métodos para realizar predicción de daños en construcciones sometidas a acciones externas pueden ser cualitativos o cuantitativos. Las predicciones de daños en forma cualitativa describen los niveles de daño probables asociados a diferentes categorías de edificios y/o intensidades de viento. Un ejemplo claro de este método es la escala Saffir-Simpson, en la cual se proponen cinco categorías de daño en estructuras y edificaciones que dependen de la velocidad del viento. Los métodos cuantitativos consideran características

propias de la estructura que son esenciales para la predicción confiable de daños. Para esto se pueden utilizar por ejemplo matrices de daños basadas en la opinión de expertos para obtener la correlación entre el daño y las acciones externas.

Muchos autores han desarrollado metodologías para estimar daños en componentes estructurales, entre ellos, Unanwa (2000), que desarrolló el concepto de bandas de daño, aplicándolo a edificaciones industriales, residenciales, comerciales e institucionales. Una banda de ancho está limitada por dos curvas de fragilidad las cuales representan los umbrales de daño superior e inferior para determinadas intensidades de viento. Spaks (1994) concluyó que una vez se presenta el arrancamiento de cubiertas, la magnitud de las pérdidas pueden llegar a ser del orden del 80 % del reclamo total a la compañía aseguradora. Li y Ellingwood (2005) desarrollaron una metodología de evaluación de riesgos con un enfoque probabilístico, usando un análisis de confiabilidad de primer orden para calcular la probabilidad de falla de componente que son vitales para mantener la integridad del exterior de la edificación y minimizar pérdidas económicas. Los autores definieron como estado límite de desempeño de la edificación, la ruptura de uno de los componentes del exterior de la edificación.

## 7.2. Metodología utilizada

Para obtener el daño esperado del sistema de techo del modelo de nave industrial en estudio ante diferentes velocidades del viento, se llevó a cabo un procedimiento similar al sugerido por el Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales en América Latina. Aplicando la ecuación 7.1 se puede obtener el valor del daño,  $\beta$ , esperado para velocidad de viento,  $I$ .

$$E(\beta|I) = 1 - \exp\left(\ln\left[0.5\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^\rho\right]\right) \quad (7.1)$$

En donde:

$E(\beta|I)$  = Valor de daño esperado ante una intensidad.

$\gamma$  = Succión producida por la velocidad de viento

$\bar{\gamma}$  = succión correspondiente al 50 % de la succión máxima resistente de la lámina.

$\rho$  = Parámetro que describe el comportamiento estructural. Este valor se tomó igual a 10.

Los valores de  $\gamma$  son las succiones máximas en el techo para diferentes ángulos de incidencia y velocidad de viento que resultaron del análisis del modelo de nave industrial a dos aguas con pendiente de techo de 5° (ver figura 5.9). La succión máxima resistente se tomó como la carga última resultante de los análisis del capítulo 6.1.4, donde se tomó en cuenta que las láminas fallaron cuando alcanzaron una deformación unitaria en los bordes de los orificios de los sujetadores de 12 %. Esta metodología se efectuó para los distintos calibres de lámina incluidos en el análisis.

En la tabla 7.1 se presentan los datos de presiones máximas sobre el techo del modelo de nave industrial para una incidencia de viento de  $45^\circ$ , así como los valores de daño esperado de la lámina calibre 24 obtenidos con la ecuación 7.1. La carga última de la lámina calibre 24 es de 21965 Pa, por lo tanto el valor de  $\bar{\gamma}=10982.5$  Pa. De igual manera en la figura 7.1 se representa la curva obtenida con la ecuación de daño esperado.

Tabla 7.1: Daño esperado en lámina calibre 24 para viento a  $45^\circ$ .

Velocidad (m/s)	Succión (Pa)	$E(\beta I)$
10	503	0.000
20	2036	0.000
30	4554	0.000
40	8153	0.035
50	12740	0.953
60	18510	1.000
70	25280	1.000
80	33200	1.000
90	41480	1.000

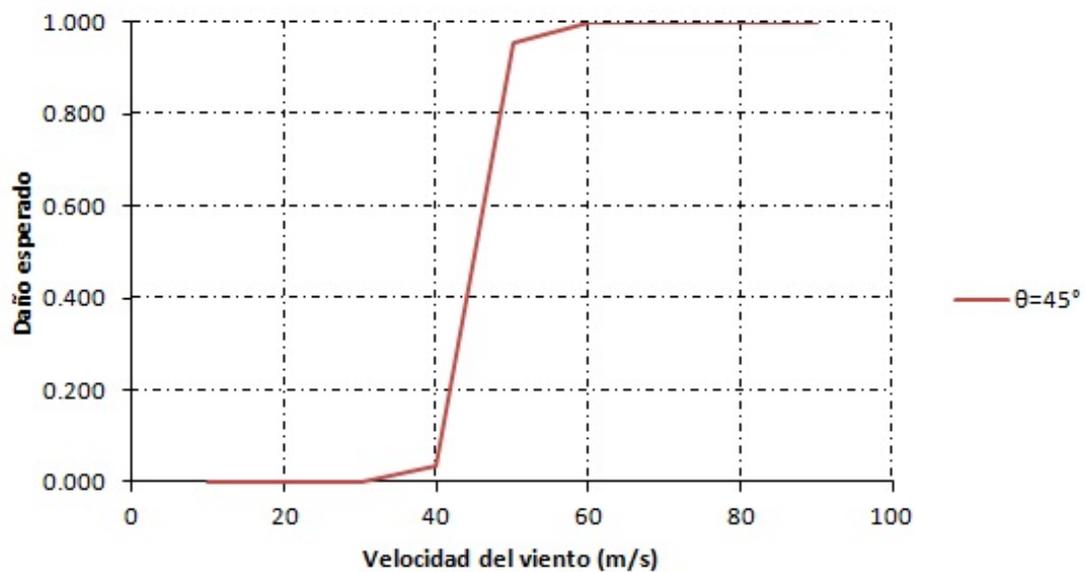


Figura 7.1: Curva de daño esperado para lámina calibre 24 para un ángulo de incidencia de viento de  $45^\circ$

Se puede observar que el resultado obtenido con la ecuación 7.1 representa con claridad el daño esperado en el sistema de techo al ser sometido a velocidades de viento y que la lámina calibre 24 comienza a fallar cuando la velocidad del viento tiene un valor de alrededor de 50 m/s con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ .

### 7.3. Curvas de daño esperado

En la figura 7.2 se presentan las curvas de daño esperado obtenidas para la lámina calibre 22 para diferentes ángulos de incidencia del viento. De igual manera en las figuras 7.3 y 7.4 se presentan para las láminas calibre 24 y 26, respectivamente.

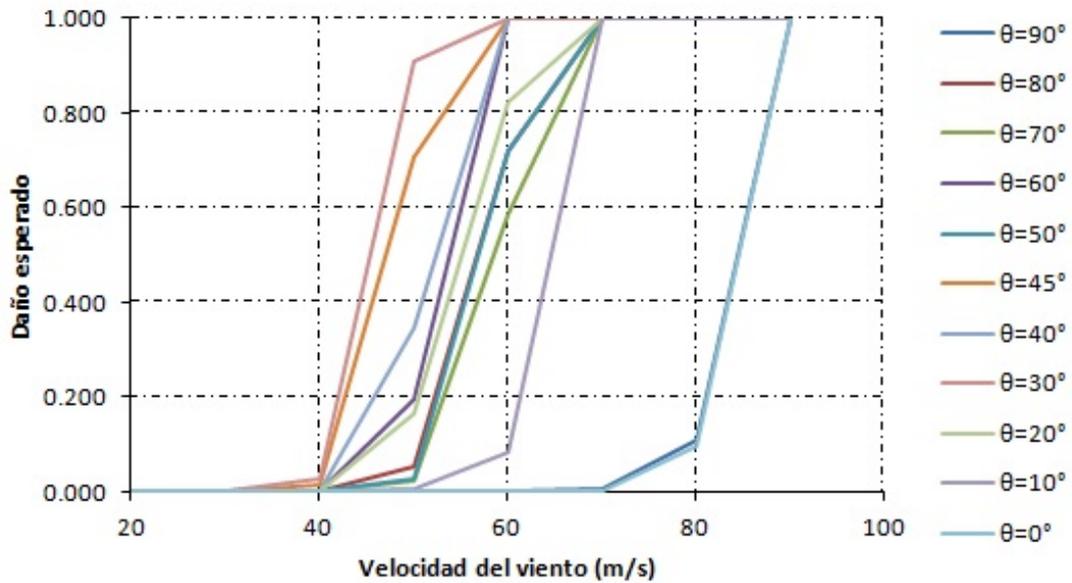


Figura 7.2: Curvas de daño esperado para lámina calibre 22

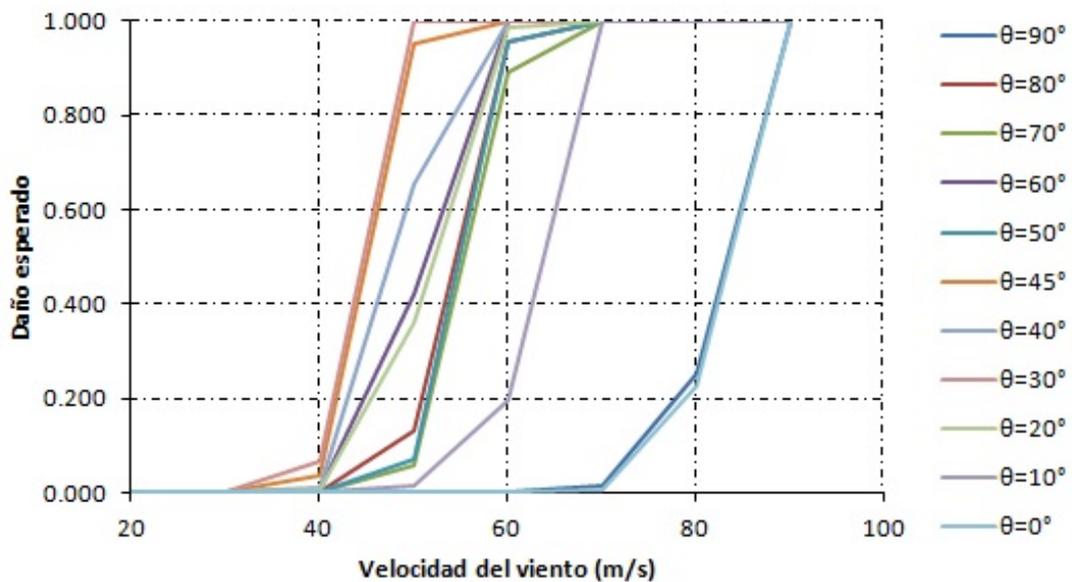


Figura 7.3: Curvas de daño esperado para lámina calibre 24

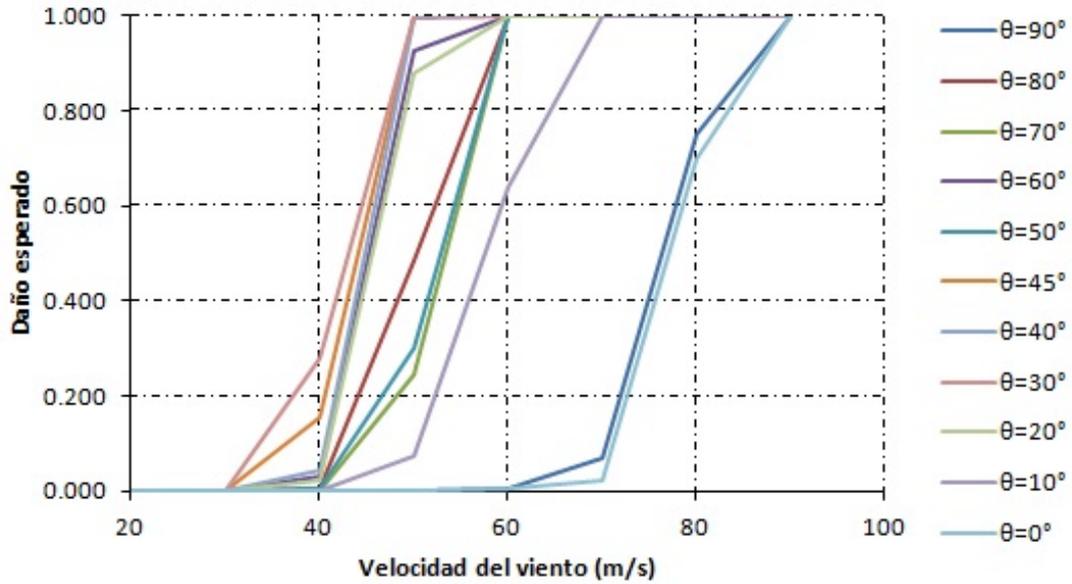


Figura 7.4: Curvas de daño esperado para lámina calibre 26

Se realizó el promedio de las curvas de cada lámina para obtener aquella que describa el comportamiento estructural de cada lámina. En la figura 7.5 se presenta el promedio de las curvas de cada calibre.

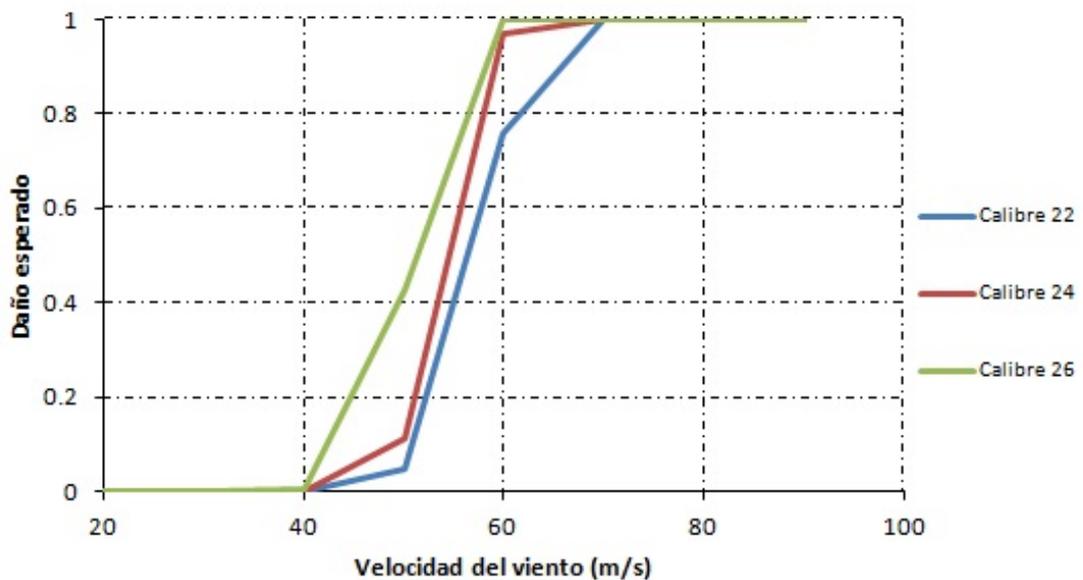


Figura 7.5: Promedio de curvas de daño esperado

## 7.4. Interpretación y comparación de resultados

En esta investigación se consideró que el sistema de techo es uno de los componente más vulnerables bajo la acción de vientos intensos. Las curvas de daño esperado que resultaron del análisis nos dan una idea de que tan frágil son las configuraciones típicas usadas en las conexiones del sistema de techo de naves industriales en México. Se consideró el sistema de techo con conexiones atornilladas en los valles de la lámina metálica de calibres 22, 24 y 26.

Para la estimación de daños, la metodología de trabajo ha seguido las siguientes etapas:

- Establecer el tipo de edificación en estudio.
- Generar las demandas mediante simulación en ANSYS FLUENT.
- Evaluar las capacidades resistentes del modelo de conexión en ANSYS Mechanical, definiendo un criterio de falla.
- Obtener las curvas de daño esperado.

En general al variar el calibre de las láminas de acero se nota un cambio minúsculo en el daño esperado. Es de gran importancia dejar claro que el ángulo de incidencia del viento crítico, es decir, con el cual llega a fallar más rápidamente la lámina es de 30°. Podemos tomar como referencia dicho valor para comparar los tres diferentes calibres de lámina.

Durante este proceso se observó un buen comportamiento en las láminas de acero estudiadas. Sin embargo, los daños observados con una velocidad de viento de alrededor de 60 m/s pueden llegar a ser críticos. Para la lámina calibre 22, el 36 % de las direcciones de viento llega a al estado límite de falla con 60 m/s, es decir con ángulos de incidencia de viento de 30°, 45°, 60° y 40°. Para la lámina calibre 24 el 45 % de las direcciones de viento llegan al estado límite de falla con velocidad de 60 m/s pero el 80 % de las direcciones llegan al estado límite de falla a los 70 m/s. Por otro lado para la lámina calibre 26 solo el 27 % de las direcciones de incidencia del viento no llegan al límite de falla con 60 m/s.

Al comparar las curvas de daño esperado promedio de cada lámina, se observa que las láminas con calibre 22 y 24 llegan al estado límite de falla con una velocidad de viento de 70 m/s, pero la lámina calibre 24 llega a casi el 100 % de su capacidad con una velocidad de viento de 60 m/s teniendo un comportamiento semejante a la lámina calibre 26.

En la figura 7.6 se muestra una comparación de las curvas de daño esperado promedio de los tres diferentes tipos de lámina en función de la escala de Saffir-Simpson de huracanes. Se percibe que con vientos de un huracán categoría 3, las láminas de acero pueden presentar un gran umbral de daño que va del 10 % en la lámina más delgada hasta el 95 % en la lámina más gruesa.

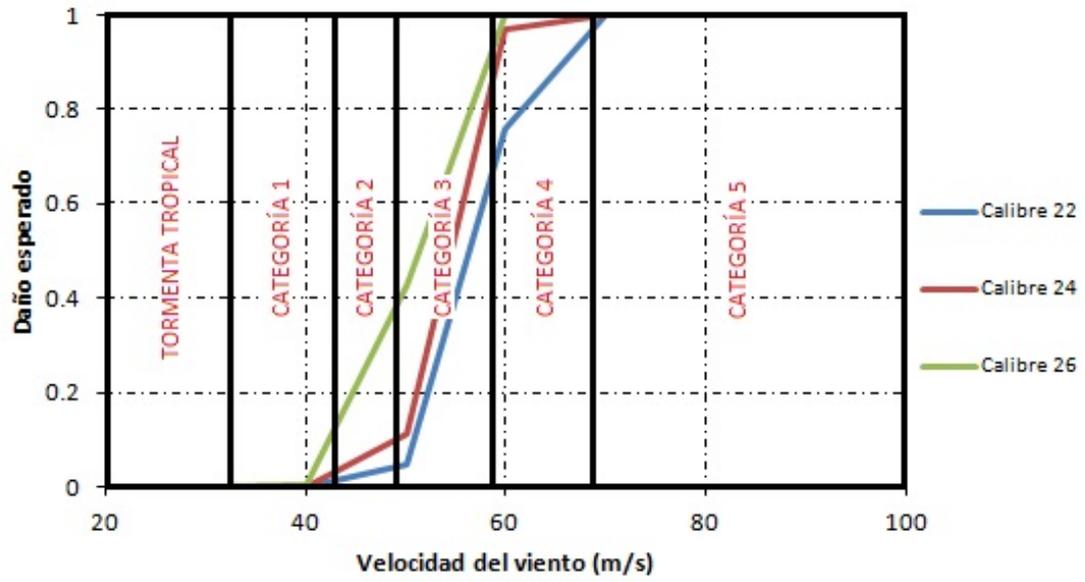


Figura 7.6: Curvas de daño esperado en función de la escala Saffir-Simpson de huracanes

# Capítulo 8

## Conclusiones

### 8.1. Amenaza meteorológica en México

México se encuentra entre los 15 países con mayor población absoluta expuesta al peligro de ciclones tropicales, en los últimos años se registraron un total de 92 ciclones tropicales que afectaron directamente las costas mexicanas. Un poco más del 30% de estos fenómenos meteorológicos dejaron daños severos a las poblaciones cercanas a las costas. Aunque el periodo de retorno de estos eventos sea relativamente alto, la magnitud de las velocidades de viento que se presentan durante su existencia supera a las velocidades de diseño especificadas en los reglamentos.

Tan solo en 15 años los vientos sostenidos en huracanes han superado 8 veces las velocidades regionales especificadas en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de diseño por viento, correspondiente a las de un periodo de retorno de 50 años donde el valor máximo es de 232 km/h. Por lo tanto es indispensable definir una velocidad de diseño óptima que permita el funcionamiento de estructuras después de un evento natural de estas magnitudes.

### 8.2. Aerodinámica de edificios analizados

Para estudiar el movimiento de flujos de aire y su efecto sobre naves industriales se llevó a cabo un estudio de dinámica de fluidos computacional en donde se caracterizó al viento como un fluido turbulento en un estado estacionario.

Se analizaron tres modelos de naves industriales con diferentes pendientes de techo, 5°, 20° y 30°. Adicionalmente, el efecto de edificios colindantes fue examinado usando tres diferentes configuraciones, cada configuración tenía un patrón de separación entre edificios colindantes. Las direcciones de viento que fueron examinadas se encuentran en un intervalo de 0° a 90°, a cada 10°, tomando en cuenta la dirección de viento de 45°. Encontrando las siguientes conclusiones:

- Las fuerzas más grandes sobre el modelo de nave industrial se presentan en forma de succiones en el techo que dependen directamente de la dirección de incidencia de viento.
- Las succiones más grandes se producen en ángulos oblicuos en un rango de 30° a 50° de dirección de incidencia de viento en la esquina más cercana a la entrada del viento y en la cresta del techo. Esto debido al fenómeno de desprendimiento de vórtices creado por el cambio brusco en la geometría del modelo.
- Al variar la pendiente del techo en el modelo se encontró que las zonas de succiones máximas cambian de posición. Para pendiente de techo de 5°, las zonas de succiones se encuentran en la esquina más cercana a la entrada del flujo de aire, mientras que al aumentar la pendiente de techo a 20° y 30° las zonas de succiones máximas se trasladan hacia la cresta del techo con valores de succiones mayores.
- También se encontró que al aumentar la pendiente de techo las zonas de succión se transforman a zonas de presión. Esto es debido a que al aumentar la pendiente de techo se va creando una superficie cada vez mas perpendicular al flujo de viento pareciéndose a un muro de barlovento.
- Independientemente de la pendiente del techo, las succiones son las acciones que gobiernan en el sistema de techo con valores de 4 a 5 veces mayores que la mayor presión hablando en términos de valor absoluto.
- Al estudiar la interacción de edificios colindantes se presentaron dos fenómenos, protección y intensificación de las succiones sobre los modelos. Aún con estos resultados se puede sugerir que para propósitos de diseño no se usen factores de reducción o incremento ya que la variación de los valores de succión sobre el techo es relativamente baja.

### 8.3. Comportamiento de modelos de conexión de sistemas de techo analizados

En esta investigación se desarrollaron modelos avanzados de elementos finitos de conexiones de sistema de techo basados en perfiles de láminas de acero acanaladas sujetadas mediante tornillos autotaladrantes. En estos análisis se incluyó lo siguiente: Un comportamiento de tres dimensiones de la lámina de acero bajo cargas de succión de viento, contacto perfecto entre los elementos (sujetadores, polines y lámina), se incluyó la medición de grandes concentraciones de esfuerzos y deformaciones alrededor de los orificios de los sujetadores y un criterio de falla preciso en donde se menciona que se adquirió como límite de falla cuando se alcanzaba una deformación unitaria en la lámina alrededor de los orificios de los sujetadores de 12%.

Tres diferentes modelos fueron investigados con diferentes espesores de lámina, calibre 22, 24 y 26. Del análisis de estos modelos se encontró que se presentaron grandes distorsiones en la sección transversal de la lámina desde estados tempranos de carga, seguida por la presencia de grandes deformaciones y esfuerzos alrededor de los orificios de los sujetadores. Se concluyó que los elementos que experimentaron mayores deformaciones son las láminas, al ser elementos más frágiles.

Al incrementar el valor del espesor de lámina resultó que aumenta significativamente la carga de falla. La carga de falla de la lámina calibre 24 fue de 21965 Pa, mientras que en las láminas calibre 22 y 26 fueron de 24063 Pa y 18800 Pa respectivamente. Además de aumentar la carga de falla en la lámina, se observó que también aumenta la deflexión máxima en el centro del claro, con valores de 0.14, 0.11 y 0.07 m para calibres 22, 24 y 26, respectivamente.

Estos análisis de elementos finitos fueron validados comparando la fuerza resultante de los sujetadores en el momento de falla de los análisis contra los calculados con la ecuación 6.1 propuesta por el American Iron and Steel Institute (AISI 1989, 1992). Una gran correlación de resultados fue lograda para cada modelo de lámina de acero estudiado. Los análisis de elementos finitos mostraron que el criterio de falla adoptado predice la falla por desprendimiento de la lámina con bastante precisión.

## 8.4. Evaluación de daños

Para investigar la vulnerabilidad de sistemas de techo de naves industriales bajo cargas de viento, se adoptó una metodología basada en la realización de curvas de daño esperado. Se estudió el daño esperado en sistemas de techo de naves industriales con diferentes espesores de lámina de acero bajo cargas de viento con diferentes ángulos de incidencia.

Durante este proceso se observó un buen comportamiento en general en las láminas de acero estudiadas. Sin embargo, para ángulos de incidencia del viento oblicuos y velocidades de viento de alrededor de 60 m/s, el daño es crítico, alcanzando la falla es decir el 100 % de daño.

Para hacer una comparación entre los calibres de lámina, se hicieron curvas promedio de daño esperado. Se concluye que al variar el calibre hay un cambio minúsculo en el daño esperado, por ejemplo en 60 m/s, el daño esperado para láminas fue de 0.78, 0.98 y 1.00 para láminas calibre 22, 24 y 26 respectivamente.

Se finaliza esta sección con una comparación de estas curvas de daño esperado promedio en función de la escala Saffir-Simpson de huracanes, en donde se percibió que con vientos de huracán categoría 3, las láminas pueden presentar grandes daños que pueden alcanzar valores de hasta 95 %, concluyendo que en México por ser un país que al año el 30 % de

los fenómenos meteorológicos son de categoría mayor o igual a 2, este tipo de sistemas de techo a base de láminas acanaladas son muy vulnerables cuando se presenten dichos fenómenos meteorológicos.

# Referencias

- [1] ASTM E330-02, Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference.
- [2] ASTM A653/A 653M-09, Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process.
- [3] BAGYALAKSHMI SHANMUGAM, 2011, Probabilistic Assessment of Roof Uplift Capacities in Low-Rise Residential Construction, a Dissertation Presented to the Graduate School of Clemson University.
- [4] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008).
- [5] COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), Análisis de la Temporada de Ciclones Tropicales.
- [6] CONSORCIO EVALUACIÓN DE RIESGOS NATURALES - AMERICA LATINA - , Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección.
- [7] DAVID PREVATT, KENNETH M. HILL, PETER DATIN, GREGORY A. KOPP, Revisiting Wind Uplift Testing of Wood Roof Sheathing Interpretation of Static and Dynamic Test Results.
- [8] DHAMMIKA MAHAARACHCHI, MAHEN MAHENDRAN (2009), A Strain Criterion for Pull-Through Failures in Crest-fixed Steel Claddings.
- [9] DHAMMIKA MAHAARACHCHI, MAHEN MAHENDRAN (2009), Wind Uplift Strength of Trapezoidal Steel Cladding with Closely Spaced Ribs.
- [10] DHAMMIKA MAHAARACHCHI, MAHEN MAHENDRAN (2004), Finite Element Analysis and Design of Crest-Fixed Trapezoidal Steel Cladding with Wide Pans Subject to Pull-Through Failures.
- [11] ERI GAVANSKI, BAHAREH KORDI, GREGORY A. KOPP, PETER J. VICKERY (2013), Wind Loads on Roof Sheathing of Houses.
- [12] GREGORY A. KOPP, JEONG HEE OH, DIANA R. INCULET (2008), Wind-Induced Internal Pressures in Houses.

- 
- [13] HENDERSON, DAVID JAMES (2010), Response of Pierced Fixed Metal Roof Cladding to Fluctuating Wind Loads. PhD Thesis, James Cook University.
- [14] HENDERSON DAVID J., MURRAY J. MORRISON, GREGORY A. KOPP (2013), Response of Toe-Nailed, Roof-to-Wall Connections to Extreme Wind Loads in a Full-Scale, Timber-Framed, Hip Roof.
- [15] HENDERSON DAVID, CURTIS WILLIAMS, ERI GAVANSKI, GREGORY A. KOPP(2013), Failure Mechanisms of Roof Sheathing Under Fluctuating Wind Loads.
- [16] JANCAUSKAS E.D., M. MAHENDRAN, G.R. WALKER (2005), Computer Simulation of the Fatigue Behaviour of Roof Cladding During the Passage of a Tropical Cyclone.
- [17] KENNETH M. HILL (2009), Development of Time-Varying Wind Uplift Test Protocols for Residential Wood Roof Sheathing Panles.
- [18] LUIS YAMIN, FRANCIS GHESQUIERE, OMAR CARDONA, MARIO ORDAZ (2013), Modelación Probabilística para la Gestión del Riesgo de Desastre, El caso de Bogotá Colombia.
- [19] MAHENDRAN M. (2008), Computer Simulation of the Fatigue Behaviour of Roof Cladding During the Passage of a Tropical Cyclone.
- [20] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), predicts near-normal or above-normal Eastern Pacific hurricane season.
- [21] POZOS ESTRADA A ET AL. (2015), El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California, Capítulo 6, Series de Investigación del IIUNAM. En prensa.
- [22] WEIXIAN HE, 2010, Numerical Assessment of Roof Panel Uplift Capacity under Wind Load, Department of Civil and Environmental Engineering Graduate Program in Engineering Science, The University of Western Ontario London, Ontario, Canada.
- [23] WEIXIAN HE, 2010, Probabilistic Characterization of Roof Panel Upliftcapacity Under Wind Loading, Department of Civil and Environmental Engineering Graduate Program in Engineering Science, The University of Western Ontario London, Ontario, Canada.
- [24] YUE LI, BRUCE R. ELLINGWOOD (2005), Hurricane Damage to Residential Construction in the US: Importance of Uncertainty Modeling in Risk Assessment, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.