



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – ESTRUCTURAS**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CUBIERTAS TIPO SSR EN NAVES
INDUSTRIALES E IMPACTO ECONÓMICO DERIVADO DE SU FALLA ANTE EVENTOS
DE VIENTOS EXTREMOS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

EDGAR ALBERTO ACOSTA BEJARANO

TUTOR PRINCIPAL

**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA
INSTITUTO DE INGENIERIA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto

Secretario: Dr. Gómez Martínez Roberto

1^{er}. Vocal: Dr. Pozos Estrada Adrián

2^{do}. Vocal: Dr. Díaz López Orlando Javier

3^{er}. Vocal: Dr. Héctor Guerrero Bobadilla

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pozos Estrada

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Adrián Pozos Estrada', with a stylized flourish at the end.

FIRMA

Agradecimientos

A DIOS por la vida.

A mi familia por su apoyo en cada momento y alentarme a seguir adelante y alcanzar mis metas.

A Maria por acompañarme en esta etapa de vida, alentarme a seguir adelante y ser mi apoyo en todo momento.

A mi tutor Dr. Adrián Pozos, por todas sus enseñanzas, su tiempo, apoyo y conocimientos que me ha compartido para culminar este trabajo.

A los sinodales Dr. Roberto Gómez, Dr. Orlando López, Dr. Héctor Guerrero, Dr. José Escobar, por tomarse el tiempo para la revisión de este documento y extender sus recomendaciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de cumplir una meta y me abrió sus puertas para realizar mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Resumen

En años recientes se ha observado que los fenómenos naturales como los huracanes son cada vez más agresivos, frecuentes y de mayor duración, debido al impacto de la actividad humana en el ambiente. Prueba de ello es el huracán Wilma (2005) que golpeó la Península de Yucatán, Cuba y la parte sur de la península estadounidense de la Florida. Se estima que este evento afectó a al menos 540,000 personas y generó pérdidas económicas de más de 18,700 millones de pesos.

El 14 de septiembre de 2014 el huracán Odile tocó tierra en la península de Baja California con vientos sostenidos de 205 km/h catalogándolo como categoría 3 en la escala Saffir-Simpson. Este fenómeno causó daños de tal magnitud que la población quedó sin energía eléctrica y sin abastecimiento de agua por varios días. Hubo 10,978 viviendas y 923 escuelas dañadas. Se evacuaron 38,000 turistas. El impacto económico directo del evento se estimó en 24,000 millones de pesos, de los cuales el 8.1% correspondió al sector industrial.

En años recientes se ha observado un incremento en el uso de sistemas de cubiertas tipo SSR (Seaming Standing Roof – Cubierta de chapa vertical) sobre todo en la proyección de naves industriales, ya que sus ventajas frente a otros sistemas de cubierta se aprecian más que nada en el aspecto económico. Sin embargo, los fabricantes de este tipo de sistema no esclarecen cuál es la capacidad del sistema ante los efectos del viento. Para estos sistemas, la succión es el aspecto más peligroso ante un huracán, pues dado el aumento en el uso del sistema, es necesario caracterizar el comportamiento del sistema ante este tipo de fenómenos.

El impacto económico derivado de la falla del sistema de cubierta en naves industriales representa, en algunos casos, un valor mayor que el costo de la nave en sí. Por ello se considera fundamental el estimar la capacidad de este sistema para generar un análisis y contar con elementos de decisión sobre aplicar un refuerzo a la cubierta y la ubicación de éste, dependiendo de algunos factores como, costo e importancia de los contenidos, costos por reparaciones, periodos de paro laboral, entre otros.

Abstract

In recent years, natural phenomena such as hurricanes have been observed to be increasingly aggressive, frequent and of longer duration, due to the impact of human activity on the environment. Proof of this is Hurricane Wilma (2005), which hit the Yucatan Peninsula, Cuba, and the southern part of the U.S. peninsula of Florida. It is estimated that this event affected at least 540,000 people and generated economic losses of more than 18.7 billion pesos.

On September 14, 2014, hurricane Odile made landfall on the Baja California peninsula with sustained winds of 205 km/h, classifying it as category 3 on the Saffir-Simpson scale. This phenomenon caused damages of such magnitude that the population was left without electricity and water supply for several days. There were 10,978 homes and 923 schools damaged. 38,000 tourists were evacuated. The direct economic impact of the event was estimated at 24 billion pesos, of which 8.1% corresponds to the industrial sector.

In recent years there has been an increase in the use of SSR (Seaming Standing Roof) type roofing systems, especially in the design of industrial buildings since their advantages over other roofing systems can be seen more than anything else in the economic aspect. However, the manufacturers of this type of system do not clarify which is the capacity of the system against the effects of wind, being suction the most dangerous aspect before a hurricane, because given the increase in the use of the system, it is necessary to characterize the behavior of the system before this type of phenomenon.

The economic impact derived from the failure of the roof system in industrial buildings represents, in some cases, a value greater than the cost of the building itself, therefore it is considered essential to estimate the capacity of this system to generate an analysis and have the ability to decide on the application of a reinforcement to the roof and its location, depending on some factors such as cost and importance of the contents, repair costs, periods of work stoppage, among others.

Índice

Capítulo 1	1
1.1. Revisión de la literatura y antecedentes	2
1.1.1. Ingeniería de viento	2
1.1.2. Naves Industriales	5
1.1.3. Estudios experimentales en sistemas de cubierta SSR e impacto del viento en estructuras industriales	9
1.1.3.1. Modos de falla comunes en naves industriales	13
1.1.3.2. Sistema de cubierta SSR	2
1.2. Problemática	4
1.3. Justificación	5
1.4. Alcance	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivo Secundario	6
Capítulo 2	7
2.1. Fenómenos meteorológicos	8
2.1.1. Ciclones Tropicales	8
2.1.2. Tornados	11
2.1.3. México ante fenómenos meteorológicos	13
2.1.4. Análisis histórico de huracanes en México	15
2.2. Modelado Numérico	19
2.2.1. Método de Elementos Finitos	19
2.2.2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	21
Capítulo 3	24
3.1. Modelos de Prueba	25
3.1.1. Descripción del sitio	25
3.1.2. Sistema de cubierta	26
3.1.2.1. Modelo 1 – Simplificado	27
3.1.2.2. Modelo 2 – Modelo basado en ASTM E1592	33
3.1.2.3. Criterio de aceptación	36
3.1.3. Distribución de presiones	39

Capítulo 4.....	42
4.1. Resultados.....	43
4.1.1. Sistema de cubierta	43
4.1.1.1. Modelo 1 – Simplificado	43
4.1.1.2. Modelo 2 – Modelo basado en ASTM E1592	45
4.1.2. Distribución de Presiones y velocidades.....	60
4.2. Análisis de costos	68
Capítulo 5.....	80
5.1. Conclusiones	81
5.1.1. Sistema de Cubierta.....	81
5.1.2. Distribución de presiones y velocidades	82
5.1.3. Análisis de costos.....	83
5.1.4. Recomendaciones	83
Bibliografía.....	84

Índice de figuras

Figura 1 - Casa redonda (imagen captada de Wind Engineering – past, present, and future, Baker 2007).	2
Figura 2 - Catedral de colonia (derecha) y catedral de San Vito (izquierda), (https://shortest.link/49JY)...	3
Figura 3 - Puente Tay colapsado (imagen captada de Wind Engineering – past, present, and future, Baker 2007).	3
Figura 4 - Elementos de una nave industrial modificada (imagen captada de Metal Building Systems – Design and Specifications)	5
Figura 5 – Nave industrial Siglo XVIII (Historic England 2011)	6
Figura 6 – Tipos de Nave Industrial (https://shortest.link/49K2)	7
Figura 7 - Configuración de marcos para naves industriales (MBMA);	8
Figura 8 - Distribución de Paneles en Cubierta (imagen captada de Ginger y Letchford, 1995)	10
Figura 9 - Geometría de Edificios de Baja Altura (imagen captada de Goliber 2009).	11
Figura 10 - Modelado de Resortes para Rigideces (imagen captada de El Damatty ,2003).	11
Figura 11 - Falla en Cubierta Metálica por carga de Succión	13
Figura 12 - Falla en la edificación industrial debido a la pérdida de cubierta ligera con lamina de bajo calibre	1
Figura 13 - Falla en la edificación debido al fallo de los miembros estructurales de cubierta (polines)	1
Figura 14 - Falla en la edificación debido a la edad y efectos de intemperismo, así como anclaje insuficiente para resistir fuerzas de levantamiento	1
Figura 15 - Falla en la edificación en la cimentación y arrancamiento de anclajes	1
Figura 16 - Configuración del Panel de Cubierta (MBMA).	2
Figura 17 - Panel KR-18 y Clip de Sujeción Estándar (TERNIUM)	3
Figura 18 - Distribución Porcentual de Daños y Pérdidas por Tipo de Fenómeno en 2020 (CENAPRED)	4
Figura 19 - Estructura de un Huracán (https://shortest.link/3YDt)	8
Figura 20 - Tornados por estados en México (CENAPRED)	14
Figura 21 - Ciclones Tropicales del Pacífico, DT = Depresión tropical; TT = Tormenta tropical; H1 = huracán categoría 1; H2 = Huaracan categoría 2; H3 = Huracán categoría 3; H4 = Huracán categoría 4; H5 = Huracán categoría 5	15
Figura 22 - Ciclones Tropicales del Atlántico, DT = Depresión tropical; TT = Tormenta tropical; H1 = huracán categoría 1; H2 = Huaracan categoría 2; H3 = Huracán categoría 3; H4 = Huracán categoría 4; H5 = Huracán categoría 5	16
Figura 23 - Trayectoria del huracán Odile (NOAA)	17
Figura 24 - Método de Elementos Finitos (MEF) (https://shortest.link/3YDu).	20
Figura 25 - Diversas aplicaciones de CFD (https://shortest.link/49Kc).	22
Figura 26 - Distribución Industrial de la ciudad (Google maps)	25
Figura 27 - Configuración típica de nave industrial (Google maps)	26
Figura 28 – Elementos de cubierta (ACEROMART)	27
Figura 29 - Curva Esfuerzo-Deformación (ANSYS)	29
Figura 30 - Contactos en el modelo M1	30
Figura 31 - Geometría del Modelo 1	30
Figure 32 - Prueba de carga Modelo 1	31

Figura 33 - Mallado de elementos	32
Figura 34 - Geometría del Modelo 2.....	34
Figura 35 - Prueba de carga E1592	34
Figura 36 - Prueba de carga reducida	35
Figura 37 - Rotación en conexión del clip	36
Figura 38 - Ubicación de clips de sujeción	38
Figura 39 - Modelo de Nave industrial.....	39
Figura 40 - Mallado de modelo de presiones	40
Figura 41 - Modelo con edificaciones colindantes (vista en planta).....	41
Figura 42 - Deformación total del modelo1.....	43
Figura 43 - Deformación del clip	44
Figura 44 - Deformación total del sistema: (a) Deformación bajo succión de 800 Pa.; (b) Deformación bajo succión de 1200 Pa.; (c) Deformación bajo succión de 1600 Pa.; (d) Deformación bajo succión de 1600 Pa.; (e) Deformación bajo succión de 2400 Pa.; (f) Deformación bajo succión de 2800 Pa.	47
Figura 45 – Deformación sobre el eje X.	48
Figura 46 - Presión vs. Deformación total.....	48
Figura 47 - Comparación de deformaciones: (a) Estudio de El Damatty et al., 2003; (b) Este estudio.	49
Figura 48 - Rotaciones en conexión clip 9; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	51
Figura 49 - Rotaciones en conexión clip 10; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	52
Figura 50 – Rotaciones en conexión clip 15; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	54
Figura 51 - Rotaciones en conexión clip 16; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	55
Figura 52 – Rotaciones en conexión clip 21; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	56
Figura 53 - Rotaciones en conexión clip 22; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.....	58
Figura 54 - Presión vs deformación total del clip 9,15 y 21. Punto de falla indicado por figura de estrella.	58
Figura 55 - Presión vs deformación total del clip 10, 16 y 22. Punto de falla indicado por figura de estrella.	59
Figura 56 - Líneas de corriente para cubierta con 5% de pendiente	60
Figura 57 - Velocidad máxima alcanzada por el fluido	61
Figura 58 - Comparación de velocidades máximas.....	62
Figura 59 - Comparación de velocidades máximas.....	63
Figura 60 - Presiones en cubierta.....	64
Figura 61 - presiones a distintos ángulos de ataque.....	65
Figura 62 - Presiones de cubierta de 3%.....	66
Figura 63 - Presiones de cubierta de 5%.....	67
Figura 64 - Presiones de cubierta de 7%.....	67
Figura 65 - RMD vs velocidad de viento.....	70
Figura 66 - RMD para pendiente del 3%	71

Figura 67 - RMD para pendiente del 5%	72
Figura 68 - RMD para pendiente del 7%	72
Figura 69 - Funciones de pérdida de HAZUS-MH.....	73
Figura 70 - Modificación a la función de cubierta	74
Figura 71 - Funciones de pérdida HAZUS-MH.....	75
Figura 72 - RMD para 25 m/s	78
Figura 73 - Curvas de daño de distintos componentes.....	78

Índice de tablas

Tabla 1 - Escala Saffir-Simpson (ASCE 7-16).....	10
Tabla 2 - - Escala Fujita Mejorada (ASCE 7-16)	12
Tabla 3 - Daños y pérdidas estimas por el CENAPRED para el ciclón tropical Odile.....	18
Tabla 4 - Características de modelos	40
Tabla 5 - Dimensiones.....	41
Tabla 6 - RMD para ángulo de 40°	70
Tabla 7 - Radio de costo de componentes (RS MEANS).....	75

Capítulo 1

En este capítulo se presenta una breve descripción de la ingeniería de viento y su desarrollo a lo largo de la historia, así como una breve descripción de las naves industriales e investigaciones realizadas en el ámbito del desempeño de cubiertas SSR y distribución de presiones en cubiertas bajo distintas configuraciones disponibles en países extranjeros.

1.1. Revisión de la literatura y antecedentes

1.1.1. Ingeniería de viento.

La Ingeniería de Viento es una ciencia que reúne varios campos del conocimiento como son: clima, capa límite atmosférica, energía eólica, dispersión, aerodinámica y respuesta estructural. El desarrollo de esta ciencia en México, a lo largo de los años ha sido lento, debido a la falta de apoyo para su desarrollo.

El inicio formal de los estudios del viento es un suceso relativamente nuevo, sin embargo, se ha observado, en ciertas zonas de Europa, que los antiguos pobladores poseían cierto conocimiento sobre como el viento afectaba sus estructuras, pues, en la edad del hierro, en la costa atlántica de Europa, se desarrolló un estilo particular de estructura conocido como casa redonda (*figura 1*), de planta circular y techo cónico. Ahora se sabe que esta geometría en específico experimenta menores cargas por viento que una geometría rectangular.



Figura 1 - Casa redonda (imagen captada de Wind Engineering – past, present, and future, Baker 2007)

En décadas pasadas, se presentó la necesidad de construir estructuras cada vez de mayor altura, generalmente con fines religiosos, en las que las cubiertas eran dañadas por las ráfagas de viento presentes a grandes alturas donde no existían obstáculos, debido a esto, la geometría de las cubiertas cambió a una forma cónica, pues habían aprendido que esta geometría era efectiva contra los fuertes vientos y se crearon torres en forma de agujas por toda Europa, ejemplo de ello son edificios que podemos ver actualmente como la catedral de Colonia en Alemania o la catedral de San Vito en Praga, Republica Checa (*figura 2*), ambas estructuras construidas con fines religiosos como se mencionó anteriormente.



Figura 2 - Catedral de colonia (derecha) y catedral de San Vito (izquierda), (<https://shortest.link/49JY>)

Con el paso de los años, se encontraron formas de aprovechar las corrientes de viento a través de molinos, los cuales basaban su diseño en los molinos de agua. Estos fueron introducidos por primera vez en el año 950, utilizados para moler grano, bombeo de agua, etc.

Durante la revolución industrial, hubo un desarrollo intelectual derivado del significativo decaimiento del impacto religioso en la sociedad. Es en esta época, cuando los efectos de las cargas de viento tomaron importancia en los sistemas de transporte. En el ámbito naval, el almirante Beaufort creó en 1808 la conocida escala de Beaufort, que permito dar información meteorológica razonablemente precisa a flotas militares y mercantes.

Los primeros puentes se construyeron para mejorar comunicaciones, pero estos sufrieron los efectos adversos al viento debido a oscilaciones aeroelásticas, el más famoso de ellos fue el puente Tay en 1879 (*figura 3*).

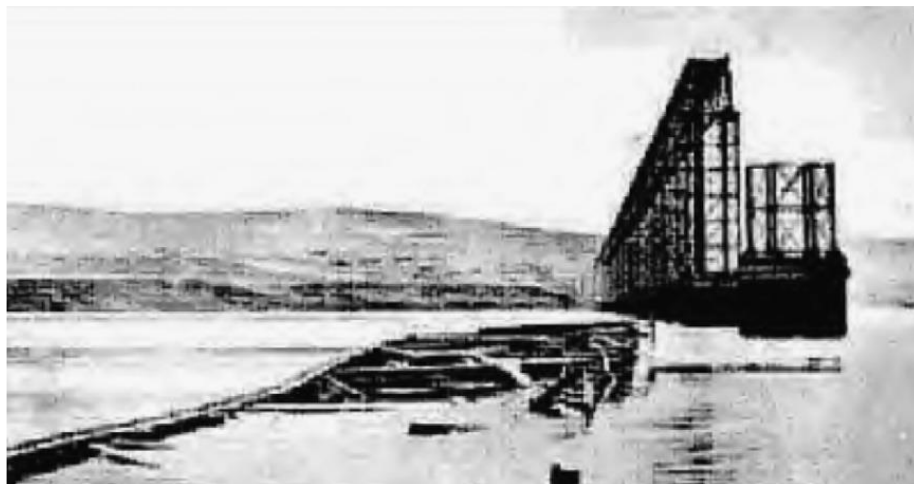


Figura 3 - Puente Tay colapsado (imagen captada de *Wind Engineering – past, present, and future*, Baker 2007).

A principios del siglo XX, los principales avances en la Ingeniería de Viento se llevaron a cabo con fines militares, ejemplo de ello fueron los estudios sobre dispersión atmosférica desarrollados en Portón Town en el Reino Unido con fines de conocer el impacto de una guerra química. En la misma época se construyeron edificios cada vez más grandes y puentes de mayor longitud, es en este ámbito donde se llevaron a cabo mediciones a gran escala de ráfagas de viento, en este periodo se desarrolló el nacimiento de la teoría estadística de la turbulencia, el primer túnel de viento para investigaciones y códigos de construcción para considerar cargas ambientales como las de viento en el Reino Unido.

En épocas recientes, las aportaciones de Alan G. Davenport fueron muy importantes, como el desarrollo de la cadena de carga de viento, que proporciono un marco conceptual para estudiar los efectos del viento en estructuras.

1.1.2. Naves Industriales.

Las naves industriales son generalmente clasificadas como edificaciones de baja altura debido a que la gran mayoría de estas no suelen rebasar los 12m en su punto más alto, sin embargo, existen sus excepciones. El uso principal de este tipo de estructuras son la producción industrial, pues en ella se instalan grandes cantidades de maquinaria las cuales requieren suficiente espacio para ser operadas correctamente. La estructuración de este tipo de edificaciones suele basarse en una estructura esquelética a base elementos de acero estructural con cubiertas metálicas o de otros materiales ligeros y muros perimetrales de lámina metálica (figura 4).

Los primeros edificios industriales, eran a menudo a escala doméstica y tuvieron lugar alrededor de las ciudades en los siglos XVIII y XIX. Debido a que se desarrollaba la evolución industrial, surgió la necesidad de albergar maquinaria y un gran número de trabajadores para realizar todos los procesos relacionados a la producción de ciertos productos como la fundición de hierro y el procesado de textiles.

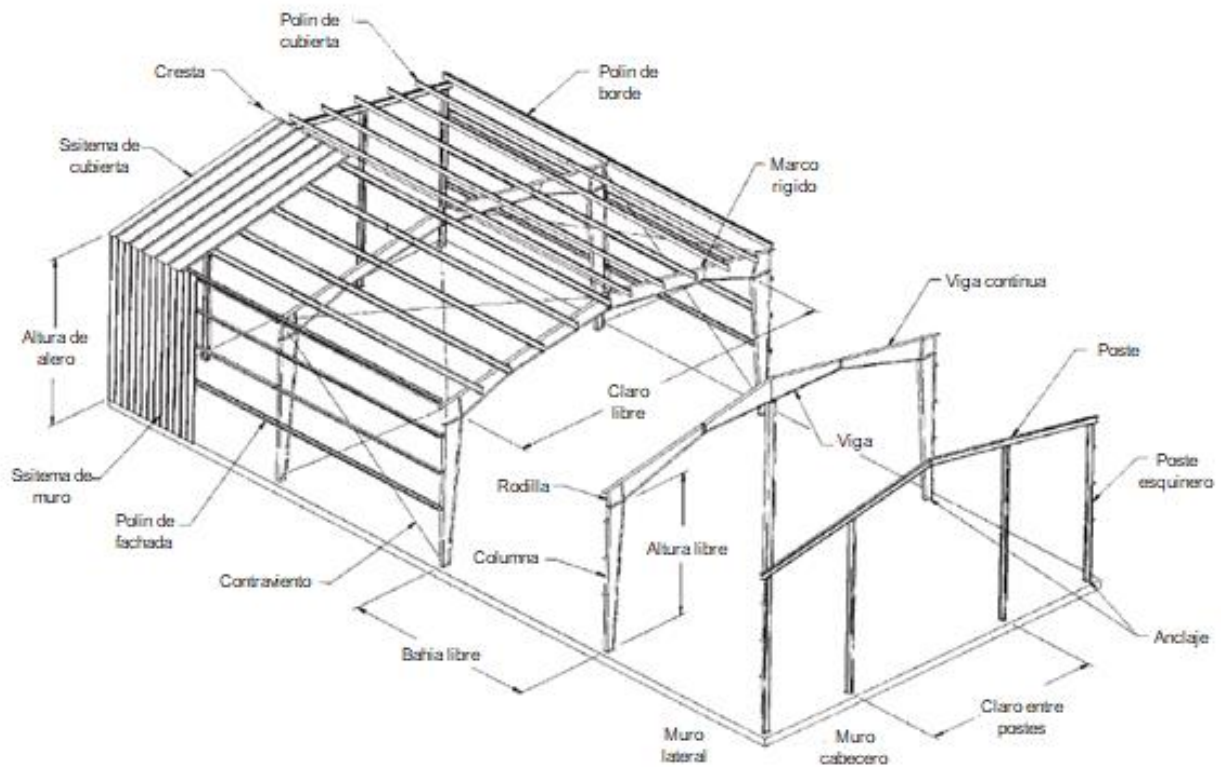


Figura 4 - Elementos de una nave industrial modificada (imagen captada de Metal Building Systems – Design and Specifications)

Las primeras naves industriales se basaron en diseños funcionales donde se observaban paredes largas a base de mampostería sin ningún tipo de acabados (*figura 5*).



Figura 5 – Nave industrial Siglo XVIII (Historic England 2011)

Con el desarrollo de la tecnología y la aparición de nuevos materiales de construcción, fue posible la construcción de diseños más eficientes, creando estructuras a base de esqueletos de hierro fundido. Esto hizo posible aumentar el número de pisos y ampliar los claros. La aparición de cubiertas ligeras a base de armaduras metálicas permitió generar estructuras con menos columnas, las cuales se distribuían para no interferir con la maquinaria en interior.

La línea de diseño de las naves industriales modernas sigue las reglas generales observadas desde las primeras edificaciones, generar grandes espacios interiores con la finalidad de instalar el equipo necesario y el personal suficiente, estructuras de un nivel son el tipo más común y constituyen el 75-80% del total de la construcción industrial equipados con grúas de varios tramos y de planta rectangular, con tragaluz para proporcionar iluminación natural y sistemas de ventilación. Las edificaciones industriales modernas contemplan varios sistemas estructurales, como los siguientes (*figura 6*):

- Estructuras de Acero: Simplifican el proceso y tiempos de construcción. Adecuada para generar espacios amplios e iluminados (*figura 6a*).
- Concreto Prefabricado: Alternativa adecuada para fines de almacenamiento (*figura 6b*).
- Concreto “In Situ”: Su ventaja más importante es su economía, pero en contraparte, la iluminación es escasa (*figura 6c*).
- Estructuras Mixtas: se utiliza acero como concreto en su construcción, puede ofrecer los beneficios de uno u otro elemento, dependiendo de las proporciones de estos (*figura 6d*).



(c)



(b)



(c)



(d)

Figura 6 – Tipos de Nave Industrial (<https://shortest.link/49K2>)

Hoy en día, las naves industriales dominan el mercado de la construcción de baja altura no-residenciales. De acuerdo con Metal Building Manufacturers Association MBMA, (2018) representan el 65% de las construcciones nuevas de estructuras de 1 y 2 niveles con áreas superiores a los 13,000 m².

En cuanto a la configuración de los marcos metálicos para los sistemas de naves industriales, los más comunes se basan en columnas y vigas a base de perfiles IPR (W), o bien, vigas a base de armaduras metálicas ligeras, en la *figura 7* se presentan distintas configuraciones de marcos.

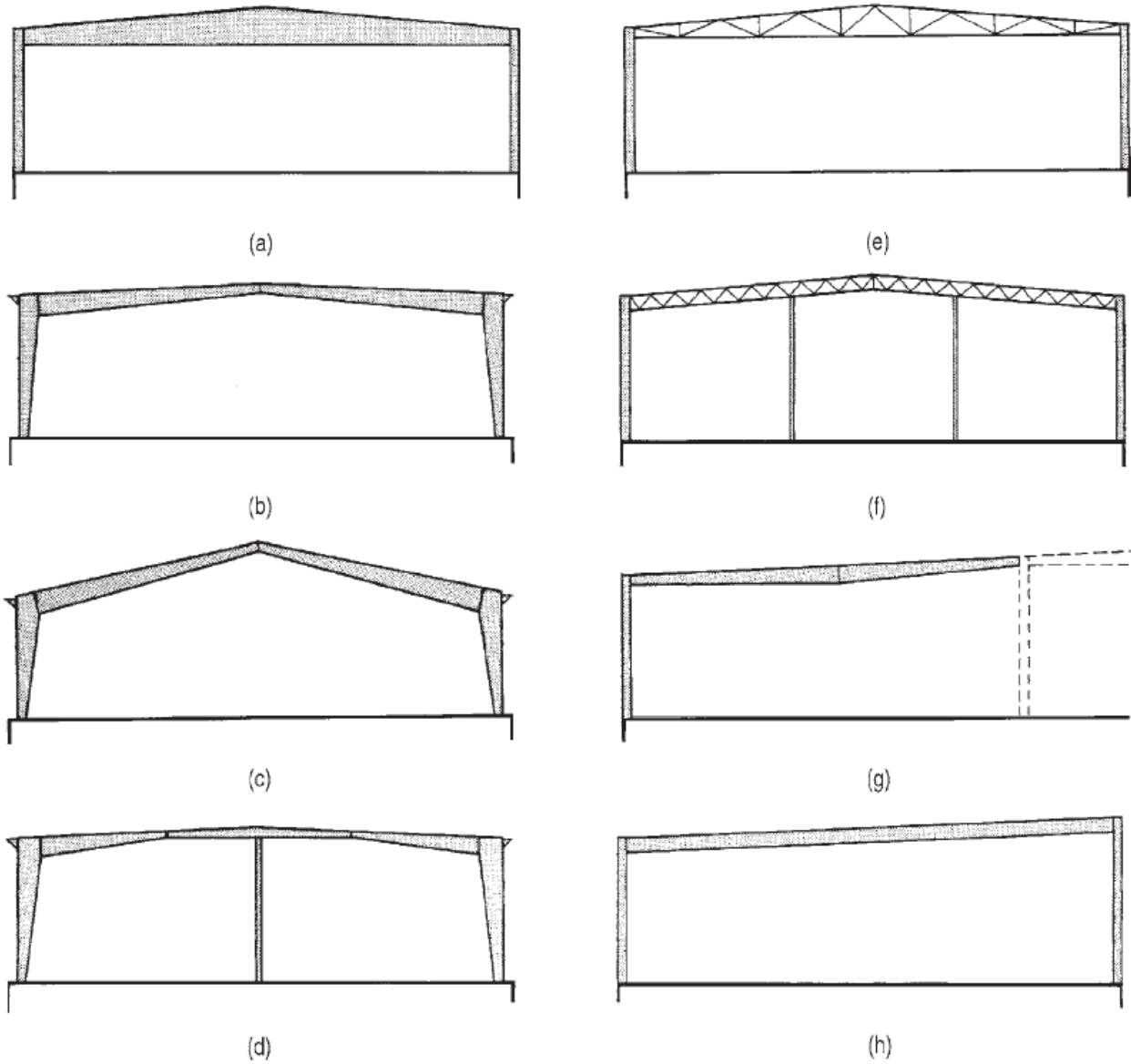


Figura 7 - Configuración de marcos para naves industriales (MBMA);

(a) Marco rígido con viga de sección variable;

(b) Marco rígido con viga y columna de sección variable;

(c) Marco rígido con viga y columna de sección variable y cubierta pronunciada;

(d) Marco rígido de secciones variables con múltiples claros;

(e) Marco rígido con armadura;

(f) Marco rígido con armadura continua;

(g) Marco rígido con viga de sección variable en pendiente única (h) Marco rígido con perfil simples.

1.1.3. Estudios experimentales en sistemas de cubierta SSR e impacto del viento en estructuras industriales.

Perry et al., (1990) Realizo una investigación sobre el desempeño de las estructuras metálicas de baja altura después de eventos de vientos extremos, describió el desempeño de estas como pobre bajo el efecto de tornados en algunas zonas de Estados Unidos, sin embargo, el patrón de daño presentó algunas anomalías, donde algunas edificaciones resultaron levemente dañadas mientras que otras fueron totalmente destruidas. El gran cuerpo de información generado de las investigaciones posteriores al desastre indica claramente que el argumento de que edificaciones bien diseñadas son capaces de mantenerse en pie bajo las presiones generadas por un tornado con daños mínimos es un mito.

Bajo el impacto de los huracanes Elena (1985), Frederic (1979) y Camille (1969) se generó la oportunidad de estudiar el desempeño de edificaciones de acero bajo efectos cercanos a unas velocidades de viento de diseño. Se observó que mientras la cubierta mantenga su capacidad impermeable, los daños al edificio y los costos por interrupción de actividades son mínimos.

Gavansky et al., (2013) Realizaron pruebas de túnel de viento en edificaciones de baja altura con el fin de observar la distribución de presiones. Realizaron 34 modelos a escala 1:50 variando la pendiente de cubierta (β) y la velocidad del viento. El largo y ancho de 9m y 10m respectivamente con alturas de 3.6m (1 nivel), 6.7m (2 niveles) y 9.1m (3 niveles). Todos los modelos contaban con un parapeto de 0.5m alrededor del perímetro.

En sus resultados observaron que la dirección del viento paralela a la cresta (0° y 10°) causan grandes magnitudes del coeficiente máximo de presión del panel de revestimiento para techos a dos aguas. En cambio, cuando el viento golpea en dirección oblicua, se generan los conocidos vórtices de esquina, lo que conduce a grandes succiones locales. Cuando el ángulo de incidencia es perpendicular a la cumbrera para pendientes de cubierta intermedia, el viento se separa del borde de ataque y se vuelve a unir en el techo de barlovento y luego se separa nuevamente en la cumbrera. Para pendientes relativamente pronunciadas, la sección de barlovento tiene presiones positivas y el flujo se separa en la línea de la cumbrera sin volver a unirse en la cubierta en sotavento, esto genera succiones relativamente uniformes en la cara de sotavento. Las presiones mayores se observaron bajo un ángulo de ataque oblicuo con una pendiente de cubierta baja de 30° .

Se observó que existe un efecto de protección debido a construcciones circundantes cuando estas estructuras protegen las direcciones críticas de ataque del viento. Los autores concluyeron que:

Los parámetros más importantes que afectan las cargas del viento son el terreno y la forma de la cubierta, las cargas son mucho más bajas para cubierta en zonas suburbanas y con cubiertas a cuatro aguas. Además, para techos a dos aguas, hay relativamente poca variación causada por la pendiente de la cubierta o la altura del parapeto. Las direcciones críticas que se observaron fueron las paralelas a la cumbrera, siendo las zonas adyacentes a los extremos los que experimentaron mayores cargas. Esto para grandes pendientes de cubierta. También, para pendientes más bajas, los vientos oblicuos causan grandes cargas a lo largo de la cumbrera, particularmente cerca de los bordes.

Ginger y Letchford (1995) Estudiaron las presiones medias presentadas en estructuras cerradas de baja altura basado en un modelo 1:100 en pruebas de túnel de viento. La geometría del modelo fue de 300x300mm de ancho y largo; con 100mm de altura. Se instrumentó la cubierta con medidores de presión distribuidos uniformemente en 6 paneles de 100x150mm como se muestra en la *figura 8*. En los resultados se observó que la presión media, máxima y mínima se presentaron con los coeficientes de presión de -0.29, 0.64 y -1.16 para ángulos de ataque $\beta=345^\circ$, 285° y 75° para el panel de esquina.

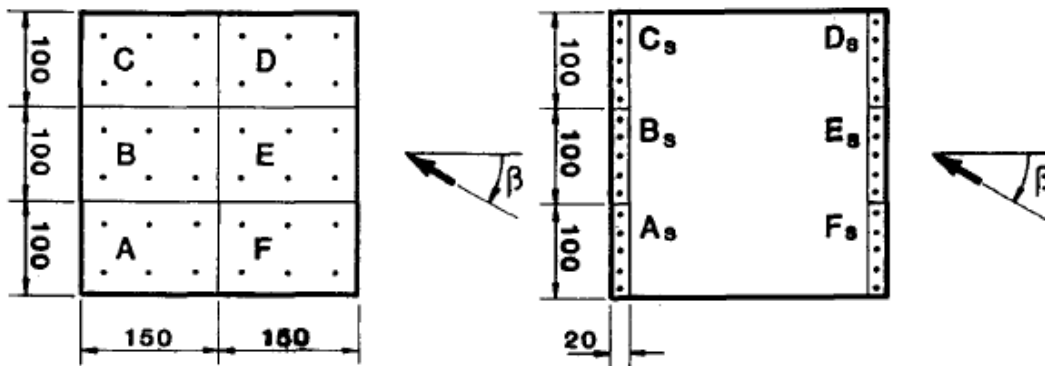


Figura 8 - Distribución de Paneles en Cubierta (imagen captada de Ginger y Letchford, 1995)

Goliber (2009) Estudió la distribución de presiones en cubiertas de edificios de baja altura presentados en la *figura 9*, utilizando diferentes configuraciones de cubierta y transductores de presión bajo ángulos de ataque de viento de 0° y 45° .



Figura 9 - Geometría de Edificios de Baja Altura (imagen captada de Goliber 2009).

Sus resultados concluyen que hay cierta simetría en los coeficientes de presión observados para ángulos de 0 y 90. Como era esperado, los coeficientes de presión mayores son negativos, demostrando que las fuerzas de succión son significativas. Las regiones de presiones críticas fueron cercanas a los bordes, esquinas y crestas.

El Damatty et al., (2003) Realizaron una serie de estudios para entender el comportamiento de los elementos de cubiertas tipo SSR bajo los efectos de succión, comparando los resultados obtenidos en trabajos previos en túnel de viento con modelos de elementos finitos.

Utilizaron un sistema de resortes continuos para simular las componentes de rigidez horizontal (K_x) y la componente de rigidez rotacional (K_θ) para el engargolado del panel metálico. Para la rigidez vertical se utilizó un modelo de elemento finito discreto (K_v) presentados en la figura 10.

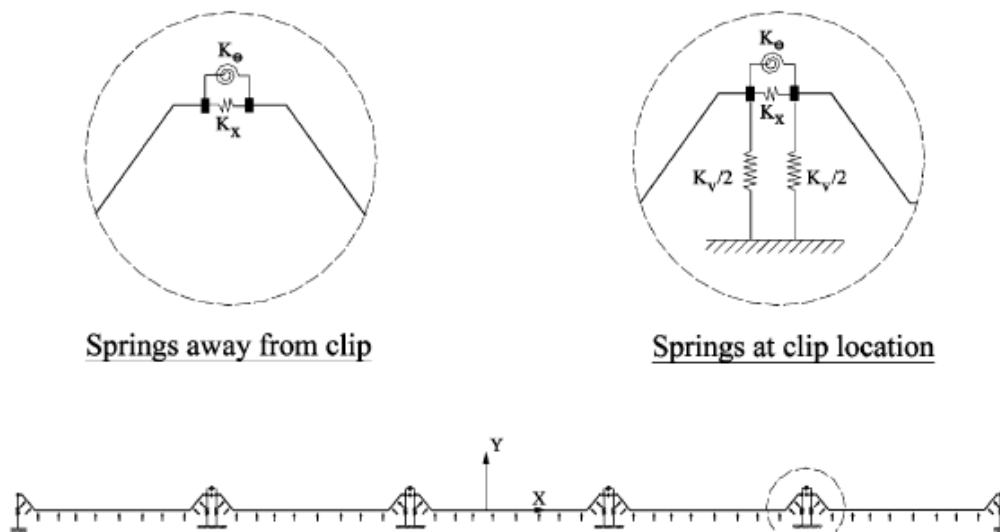


Figura 10 - Modelado de Resortes para Rigideces (imagen captada de El Damatty, 2003).

Los resultados obtenidos mostraron que, a altos niveles de presión, el comportamiento del clip y el engargolado tiende a volverse no lineal debido a los bajos espesores de los elementos. De acuerdo con lo observado, el comportamiento es lineal hasta los 2000 Pa.

El incremento en la presión conlleva a que el sistema de sujeción se separe del panel metálico, lo que se traduce en la falla de la cubierta.

Los resultados obtenidos por el método de elementos finitos coinciden con lo observado en las pruebas de túnel de viento, por lo que la prueba de elementos finitos genera resultados confiables.

Pravatt (1995) Realizaron pruebas de rendimiento a cubiertas SSR bajo los efectos de fuerzas de succión. Utilizaron modelos de pruebas en base de 5 paneles calibre 24 de 7.77m de longitud y 0.61m de ancho con costillas trapezoidales, colocados dentro de una cabina de presión y sujetos por 30 clips. Siguieron el procedimiento de prueba bajo señalado en ASTM E1592-94. Observaron que las grandes deformaciones se presentan una vez alcanzados valores de succión de 1.2-1.4 kPa y la carga última se estima en 2.4 kPa debido a que algunos elementos alcanzaron el esfuerzo de fluencia y las deformaciones eran excesivas.

1.1.3.1. Modos de falla comunes en naves industriales.

Las cubiertas metálicas son esencialmente sensibles a los efectos de fatiga producidos por diversos eventos que se presentan en la naturaleza como es la lluvia, el granizo y ante los eventos de vientos extremos como huracanes y tornados. Dentro de estos eventos se presentan esfuerzos de fatiga generalmente en las zonas de conexiones de los miembros de la cubierta que sufren un efecto de carga y descarga en lapsos de tiempo muy corto debido a las ráfagas de viento ocasionadas por el fenómeno, sin embargo; aunque los efectos de fatiga en las conexiones generan problemas que pueden llevar a la cubierta a la falla, no son los únicos a tener en cuenta, pues se ha observado que existen diversos modos de falla de cubiertas metálicas frente a esta clase de eventos, como se observa en la *figura 11* donde la cubierta metálica falla por efecto de succión tras un huracán.



Figura 11 - Falla en Cubierta Metálica por carga de Succión

La resistencia a la tracción de los pernos es un aspecto importante sobre todo en las zonas de borde de las cubiertas metálicas, pues se ha registrado que tras el paso de una tormenta severa o huracán esta es la zona más dañada. Si la construcción es antigua y no presenta un mantenimiento adecuado y constante, la acumulación de ciclos de carga y descarga debilitan las conexiones, haciéndola más susceptible a fallar.

En las siguientes figuras se muestran algunas fallas típicas observadas cubiertas en edificios industriales.



Figura 12 - Falla en la edificación industrial debido a la pérdida de cubierta ligera con lamina de bajo calibre



Figura 14 - Falla en la edificación debido a la edad y efectos de intemperismo, así como anclaje insuficiente para resistir fuerzas de levantamiento



Figura 13 - Falla en la edificación debido al fallo de los miembros estructurales de cubierta (polines)



Figura 15 - Falla en la edificación en la cimentación y arrancamiento de anclajes

1.1.3.2. Sistema de cubierta SSR

El sistema de cubierta tipo SSR (Seaming Standig Roof) o conocido en México como cubierta estructural KR-18, es un sistema de cubierta a base de sujetadores ocultos que sujetan el panel con un sistema de engargolado con diferentes configuraciones mostradas en la *figura 16*, al estar los sujetadores ocultos de la vista pareciera no estar unida al sistema por lo que también se le conoce como sistema de cubierta flotante. Es uno de los sistemas de cubierta más duraderos y resistentes a los efectos de la intemperie. El sistema presenta ciertas ventajas y desventajas comparados con otros sistemas de cubiertas que se mencionan a continuación.

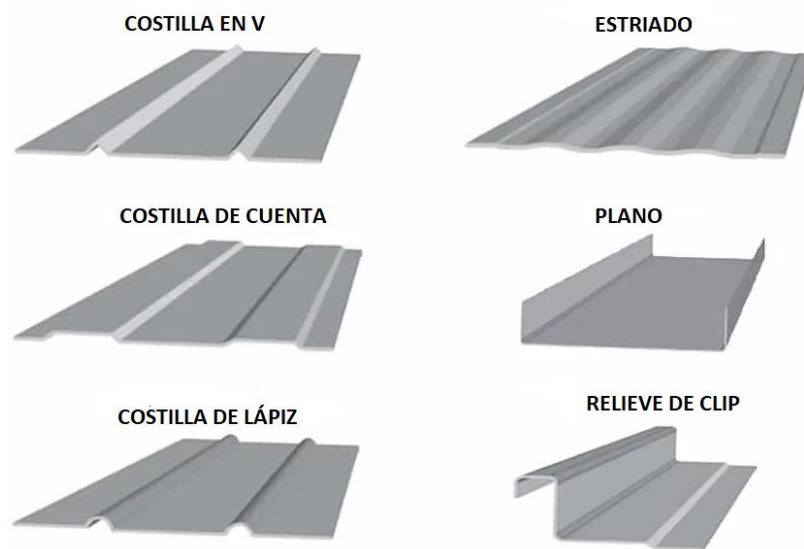


Figura 16 - Configuración del Panel de Cubierta (MBMA).

Ventajas:

- Al estar los sujetadores ocultos, estos no se ven afectados por los efectos de la radiación solar, viento y otros factores que podrían afectar su capacidad con el paso del tiempo, además de presentar una mejor estética.
- Los paneles al ser laminados in situ se adaptan a las longitudes necesarias para el proyecto, evitando los traslapes.
- No se generan perforaciones en el panel de cubierta, por lo que el sistema se considera impermeable.
- El sistema permite un desplazamiento limitado del panel con ciertos tipos de sujetadores (sujetadores térmicos o móviles) por lo que los efectos de la dilatación térmica no representan un gran impacto.

Desventajas:

- Mayor costo que in sistema convencional de lámina acanalada.
- Requiere mano de obra con la experiencia necesaria para su correcta instalación y manufactura, lo que encarece su uso.
- Las reparaciones pueden ser complicadas debido a que puede ser necesario reemplazar el panel completo.

El sistema SSR se presenta en distintas configuraciones geométricas del panel, distintos tipos de clips y distintas configuraciones de sujeción, sin embargo, en México sólo se comercializa un tipo de panel y dos tipos de clips de sujeción, el clip estándar y los clips térmicos o móviles, que permiten el desplazamiento longitudinal mínimo del panel para considerar los efectos de dilatación térmica, ambos bajo un sistema de engargolado a 90° o 180°, siendo el más común el clip estándar a 90° (*figura 17*).

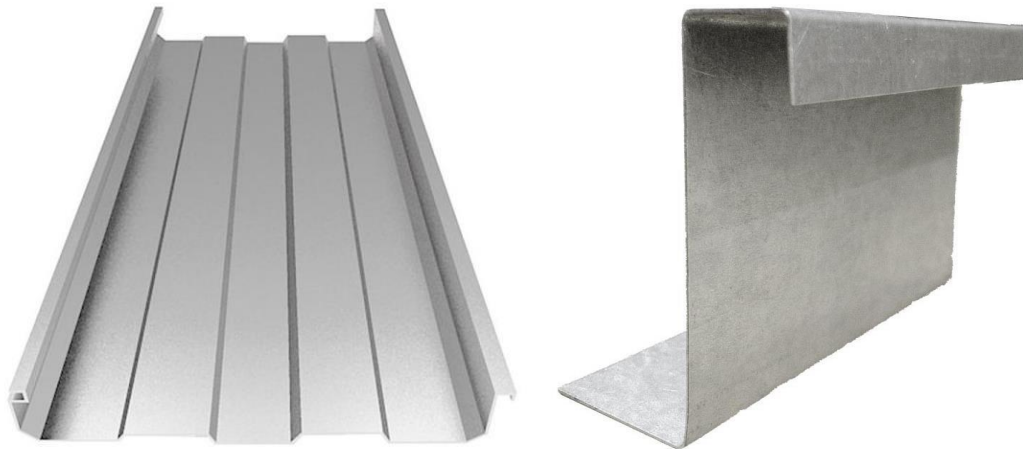


Figura 17 - Panel KR-18 y Clip de Sujeción Estándar (TERNIUM)

El daño observado en este tipo cubiertas industriales como consecuencia de los vientos extremos provocados por un huracán generalmente se derivan de la capacidad insuficiente del sistema ante los efectos de succión, donde el daño principal se centra en los clips de sujeción, desde donde se inicia una pequeña falla en una zona de la cubierta y al verse superada la capacidad resistente de los elementos de sujeción se inicia un efecto en cadena que va dañando otras zonas de la cubierta hasta ser lo suficientemente grande para comprometer la integridad de la estructura completa.

1.2. Problemática

La posición geográfica de nuestro país hace a las estructuras especialmente vulnerable al ataque de eventos hidrometeorológicos como lo son los huracanes. Este tipo de fenómenos se presentan anualmente dejando una gran cantidad de daños en las zonas costeras entre ellas pérdidas de infraestructura e incluso pérdidas humanas. De acuerdo con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en 2020 el 83.4% de los daños y pérdidas reportadas fueron de origen hidrometeorológicos (*figura 18*).

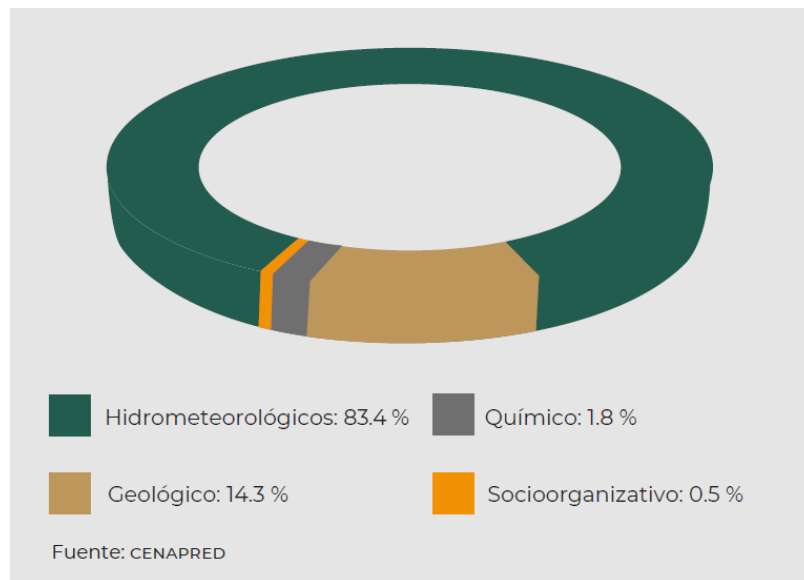


Figura 18 - Distribución Porcentual de Daños y Pérdidas por Tipo de Fenómeno en 2020 (CENAPRED)

A lo largo de los años se ha observado que tras el paso de un huracán o tornado, los sistemas de cubierta a base del sistema SSR se ven comprometidos debido a su especial configuración y su falla conduce a grandes pérdidas, tanto económicas como materiales. Derivado de diferentes estudios se ha establecido un punto de capacidad para este tipo de panel, sin embargo, estos estudios han sido realizados en países extranjeros, donde las condiciones del entorno varían con respecto a las nuestras. En México se han realizado pocas o nulas investigaciones sobre el tema, a pesar de que el sistema es ampliamente usado en la rama de la construcción industrial.

Tomando en cuenta que el sistema está basado en paneles metálicos que cubren una gran longitud, una pequeña falla ocasionada por succiones en una zona determinada puede extenderse y dañar grandes áreas de cubierta, donde puede generarse penetración de agua dañando los contenidos y, dado que, algunas edificaciones pueden guarecer contenidos que superen varias veces el costo de la nave industrial, conduce a que el impacto económico sea una consideración muy importante.

1.3. Justificación

Debido al gran uso que se tiene en el país de cubierta tipo SSR en la construcción industrial y comercial, es de gran importancia conocer a fondo el comportamiento que pueda llegar a presentarse bajo un evento hidrometeorológico como los son los huracanes, aunado a esto, México cuenta con una gran extensión de zonas costeras donde se encuentran algunas ciudades de gran importancia con una gran extensión de zonas industriales y comerciales como lo son Mazatlán, San José del Cabo, Manzanillo, etc., que cuentan con una gran cantidad de edificaciones destinadas a uso comercial e industrial.

Este trabajo es necesario para complementar los criterios de diseño de estructuras de baja altura, específicamente en el aspecto de cubiertas industriales y con esto minimizar las pérdidas humanas y el impacto económico.

1.4. Alcance

El estudio se centra en el análisis del comportamiento de cubiertas KR-18 con clip fijo a 90° con pendientes de cubierta de 3,5 y 7% bajo los efectos de cargas de succión que pueden presentarse en un huracán, empleando métodos computacionales como análisis por elementos finitos y dinámica de fluidos computacional.

Con el fin de obtener mejores resultados se realiza la evaluación de succiones en la zona de cubierta bajo el efecto de diferentes velocidades de viento y con diferentes ángulos de ataque.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Estudiar el comportamiento del clip de sujeción y los paneles metálicos de la cubierta tipo SSR ante cargas de succión. Para los análisis se emplean modelos de elementos finitos. Los efectos de las cargas del viento, como la succión son provocados por ráfagas de viento a grandes velocidades como las observadas en un huracán.

1.5.2. Objetivo Secundario

- Identificar las zonas de concentración de succiones en una cubierta a dos aguas de una nave industrial.
- Establecer la relación que existe entre el porcentaje de daño en cubierta con el impacto económico generado por daños a la estructura y pérdida de contenidos.

Capítulo 2

En este capítulo se presenta una descripción de los fenómenos meteorológicos que producen vientos de altas velocidades y los huracanes que más impacto han generado en el país en cuanto al rubro económico, así como, una introducción al método de los elementos finitos y la Dinámica de Fluidos Computaciones (CFD – Computational Fluid Dynamics).

2.1. Fenómenos meteorológicos

2.1.1. Ciclones Tropicales

Los ciclones tropicales son una de las mayores amenazas para la vida y los bienes, incluso en sus primeras fases de desarrollo conllevan diferentes peligros que, individualmente, pueden afectar de forma significativa las zonas de impacto, como las mareas de tempestad, las inundaciones, los vientos extremos, los tornados y los rayos. Cuando se combinan, estos peligros interactúan entre sí y aumentan considerablemente la posibilidad de causar pérdida de vidas y daños materiales. En los últimos 50 años, un total de 1942 desastres han sido atribuidos a ciclones

Un ciclón tropical es una tormenta de rápida rotación que se origina en los océanos tropicales entre las latitudes de 5° a 15° , de donde se extrae la energía necesaria para desarrollarse. Tiene un centro de baja presión y nubes que se desplazan en espiral hacia la pared que rodea el “ojo” como se observa en la *figura 19*, la parte central del sistema donde no hay nubes las condiciones meteorológicas son por lo general tranquilas. Su diámetro suele ser de unos 200 a 500 km, pero puede alcanzar hasta los 1000 km. Los ciclones tropicales generan vientos muy violentos, lluvias torrenciales, olas altas y, en algunos casos, mareas de tempestad e inundaciones costeras muy destructivas. Los vientos soplan en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur. En interés de la seguridad pública, se da nombre a los ciclones tropicales que alcanzan cierta intensidad.

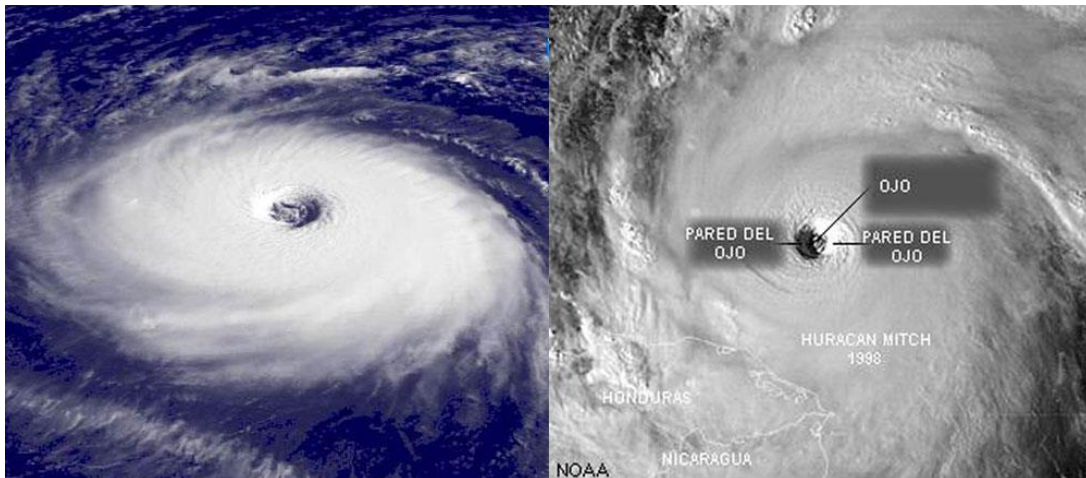


Figura 19 - Estructura de un Huracán (<https://shortest.link/3YDt>)

A este fenómeno meteorológico se le denomina de diferente manera según el lugar en donde se produce.

- En el mar Caribe, el golfo de México, el Océano Atlántico Norte y el Océano Pacífico Oriental y central, se le conoce como “Huracán”.
- En el Pacífico Norte Occidental, se llama “Tifón”.
- En la Bahía de Bengala y el mar Arábigo, se denomina “Ciclón”.
- En el suroeste del Pacífico y el sureste del Océano Índico, se le llama “Ciclón Tropical Severo”.
- En el suroeste del Océano Índico, recibe el nombre de “Ciclón Tropical”.

La evolución de un ciclón tropical se puede llegar a desarrollar en cuatro etapas:

Perturbación Tropical: Zona de inestabilidad atmosférica asociada a la existencia de un área de baja presión, la cual propicia la generación incipiente de vientos convergentes, cuya organización eventual provoca el desarrollo de una depresión tropical.

Depresión Tropical: Los vientos se incrementan en la superficie, producto de la existencia de una zona de baja presión. Dichos vientos alcanzan una velocidad sostenida menor o igual a 62 km/h.

Tormenta tropical: El incremento continuo de los vientos provoca que éstos alcancen velocidades sostenidas entre los 63 y 118 km/h.

Huracán: es un ciclón tropical en el cual los vientos máximos sostenidos alcanzan o superan los 119 km/h. En esta etapa el ciclón se clasifica por medio de la escala Saffir-Simpson como indica la *tabla 1*.

Tabla 1 - Escala Saffir-Simpson (ASCE 7-16)

Escala (categoría)	Presión Central (milibaress)	Marea (Metros)	Vientos km/h (m/s)	Daños materiales potenciales
1	Mayor a 980	1.2 - 1.5	119 - 153 (33 - 43)	Daños a casas móviles, árboles y arbustos. Algunos daños a señalizaciones débiles. Daños menores por inundaciones costeras. Daños leves en muelles e insignificativos en edificios.
2	965 - 979	1.6 - 2.4	154 - 177 (44 - 49)	Daños a puertas, ventanas y algunos techos de construcciones. Daño considerable a arbustos y árboles, con algunos árboles caídos. Daño considerable a casas móviles, a señalizaciones débiles y a muelles. Las zonas costeras se pueden inundar de 2 a 4 horas antes de la llegada del centro del ciclón.
3	945 - 964	2.5 - 3.6	178 - 209 (50 - 58)	Se puede presentar daño estructural a construcciones. Daño a árboles y arbustos con árboles grandes caídos. Casas móviles y señalizaciones débiles son destruidas. Las zonas costeras se pueden inundar de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del fenómeno.
4	920 - 944	3.7 - 5.5	210 - 249 (59 - 69)	Daño estructural más extenso a construcciones, con techos débiles completamente dañados. Arbustos, árboles y señalizaciones totalmente arrancados. Destrucción completa de casas móviles. Daño extenso en puertas y ventanas. Zonas costeras inundadas de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del ciclón.
5	Menor a 920	Mayor a 5.5	mayor a 249 (>69)	Daño total a techos de construcciones. Fallas totales en los suministros de energía. Todos los árboles, arbustos y señalizaciones arrancadas. Destrucción total de casas móviles. Daño severo a puertas y ventanas. Zonas costeras pueden ser inundadas de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del ciclón.

2.1.2. *Tornados*

Un tornado es un remolino de aire en forma de embudo que se genera desde una nube tipo mammatus, que a su vez cuelga de una cumulonimbus, y se extiende hasta tocar el suelo. Nacen de tormentas eléctricas que suelen ir acompañadas de granizo. Gira tan violentamente que sus fuertes vientos pueden arrancar árboles y postes de luz, destruir viviendas e incluso volcar vehículos pesados y mover objetos de gran tamaño. Tienen vientos de entre 65 y 180 (km/h), en casos más extremos alcanzan los 400 km/h y recorren varios kilómetros antes de disiparse.

Los tornados son de los fenómenos meteorológicos más violentos que se desarrollan en la atmósfera. A pesar de su breve duración, por los daños que generan, se pueden considerar de los más intensos y destructivos

Las condiciones para más propicias para la formación de estos eventos meteorológicos ocurren cuando las masas de aire frío de origen polar chocan con las masas de aire caliente y húmedo provenientes del mar. Debido a la colisión de las masas de aire a diferentes temperaturas, se genera una gran inestabilidad, provocado por un fuerte descenso de la presión en el centro del fenómeno y fuertes vientos circulando en forma ciclónica alrededor de este.

Existen dos tipos de tornados:

1. Los que se forman a partir de una súper celda de tormenta. De este tipo son los tornados más intensos de la escala Fujita mejorada mostrada en la *tabla 2*, así como los más frecuentes, y son característicos porque la base de la nube gira junto con ellos. Estos necesitan tener un fuerte cizallamiento en los vientos de toda la columna de aire, es decir, que la corriente en chorro sea lo suficientemente espesa desde niveles medios de la atmósfera para generar mayor vorticidad rotación. Se les asocia a fuerte caída de granizo con tamaños de 5 hasta 10 cm de diámetro.
2. El otro tipo es el tornado que no viene de una súper celda. Este tipo es más común y regularmente está en las categorías menos intensas de la escala Fujita mejorada. En estos tornados el giro comienza desde la superficie terrestre, generalmente provocado por gradientes térmicos intensos, y que terminan uniéndose a la base de la nube si se encuentran en condiciones de ascenso.

En México, los tornados se desarrollan entre marzo y junio, principalmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Sin embargo, también se han registrado en Veracruz, Hidalgo, Estado de México y Chiapas.

Tabla 2 -- Escala Fujita Mejorada (ASCE 7-16)

Escala (categoría)	Ráfaga 3s km/h (m/s)	Daños materiales potenciales
0	105-137 (29.2 - 38.1)	Daños menores: Tejas arrancadas por el viento o partes de los tejados desprendidas; daños a canalones o revestimientos; ramas de los árboles rotas; árboles con raíces poco profundas derrumbados.
1	138-178 (38.3 - 49.4)	Daños moderados: daños significativos en los tejados; ventanas rotas; puertas exteriores dañadas o perdidas; viviendas móviles volcadas o con daños importantes.
2	179 - 218 (49.7 - 60.6)	Daños considerables: tejados arrancados de casas de construcción sólida; casas separadas de los cimientos; viviendas móviles totalmente destruidas; árboles grandes partidos o arrancados de sus raíces; vehículos lanzados por los aires.
3	219 - 266 (60.8 - 73.9)	Daños graves: destrucción de pisos enteros de casas de construcción sólida; daños significativos a edificios grandes; casas con cimientos débiles arrasadas; desprendimiento de la corteza de los árboles.
4	267 - 322 (74.2 - 89.4)	Daños devastadores: Casas de construcción sólida derrumbadas, coches lanzados a distancias significativas, caída probable de las paredes exteriores de los pisos superiores de edificios de ladrillo.
5	>322 (>89.4)	Daños masivos o increíbles: Casas bien construidas arrasadas; estructuras de hormigón armado extremadamente dañadas; edificios de gran altura con daños estructurales graves; árboles generalmente partidos y despojados por completo de la corteza y las ramas.

2.1.3. *México ante fenómenos meteorológicos*

Debido a su posición geográfica, México es susceptible a los efectos de un gran número de fenómenos naturales como huracanes, sismos, erupciones volcánicas, lluvias intensas, deslaves, tornados, etc., es decir, está expuesto a este tipo de amenazas naturales.

En México los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos se presentan dependiendo de la distribución de la población a lo largo de su territorio. En un sentido amplio, el norte de México está caracterizado por sus bajos niveles de precipitación, frecuentes sequías y recurrentes ondas de calor. Por el contrario, el sur del país presenta los más altos registros de precipitación e inundación recurrentes, además de ser la región más afectada por los efectos de huracanes y otras tormentas tropicales.

En el territorio nacional se estipula que la temporada de huracanes inicia entre el 15 de mayo en el Océano Pacífico y el 1 de junio en el Atlántico, y termina el 30 de noviembre para ambos.

En el mes de junio se observa que la mayoría de los ciclones tropicales que alcanzan tierra afectan principalmente las costas centrales, y muy pocos llegan al noroeste del país. En cambio, en julio, la tendencia de las trayectorias es hacia el noroeste, con la posibilidad de que los ciclones se adentren a tierra. El mes de agosto se observa que las trayectorias se definen más hacia el norte, afectando los estados de Sonora, Baja California Sur y norte de Sinaloa, principalmente. En septiembre, se observa que los ciclones tropicales pueden afectar particularmente todo el territorio nacional colindante con el Océano Pacífico.

Existe un corredor de presencia importante de ciclones tropicales entre la península de Yucatán y Cuba, y llega hasta la costa de Louisiana y Texas, en los E.U.A.

Los tornados son la manifestación más violenta del tiempo severo. En México decenas de eventos son documentados cada año, causando daños materiales y pérdidas humanas. Se han documentado tornados desde la época de la conquista. Las primeras investigaciones se enfocaron en su identificación y reconocimiento, dada su poca diferenciación con otras manifestaciones del tiempo severo. Recientemente se realizó la primera climatología de tornados en México, en un esfuerzo inicial para identificar patrones espaciales de estos. El evento de Piedras Negras en 2007 causó un alto impacto social y originó que se incluyera a estos fenómenos en el fascículo de tormentas severas del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Existe también el caso ampliamente documentado de Ciudad Acuña en 2015; fenómeno causante de la mayor cantidad de decesos por tornado en México. No obstante, decenas de eventos son reportados cada año, representando pérdidas importantes para las poblaciones donde ocurren.

Como se aprecia en la *figura 20*, la mayor parte del territorio nacional está sujeto a la ocurrencia de tornados y si se agrupan por regiones, casi el 50% de los registrados han tenido lugar

en los estados del centro; sin embargo, las regiones de los estados del norte del país, así como del sureste, tienen porcentajes importantes, 27 y 16%, respectivamente, lo que sumado da un porcentaje de 43 (Medrano & García, 2014).

La mayor ocurrencia de tornados (81%) sucede desde la transición del invierno a la primavera, todo el verano hasta la transición con el otoño. La menor ocurrencia (19%) sucede en la época de invierno, desde la transición otoño-invierno hasta la transición invierno-primavera. Mayo es el mes con más registros de tornados, 26 (21%); noviembre y diciembre son los meses con menor registro de tornados, uno respectivamente.

La entidad con el mayor número de registros de tornados es el Estado de México y donde muchos de ellos se han observado en las cercanías de la Ciudad de México. El segundo lugar corresponde al estado de Veracruz con doce tornados. Esta entidad conforma una disposición que abarca buena parte de la costa mexicana del Golfo de México y los tornados se han apreciado tanto en la región norte, la central y sur de esa entidad.

Los registros totales de ocurrencia de tornados en el país muestran que de un total de 129 eventos solo se observaron 409 lesionados y 11 muertes, por lo que la relación de estas cifras ofrece un promedio de lesionado por tornado de 3.2 y muertes de 0.1.

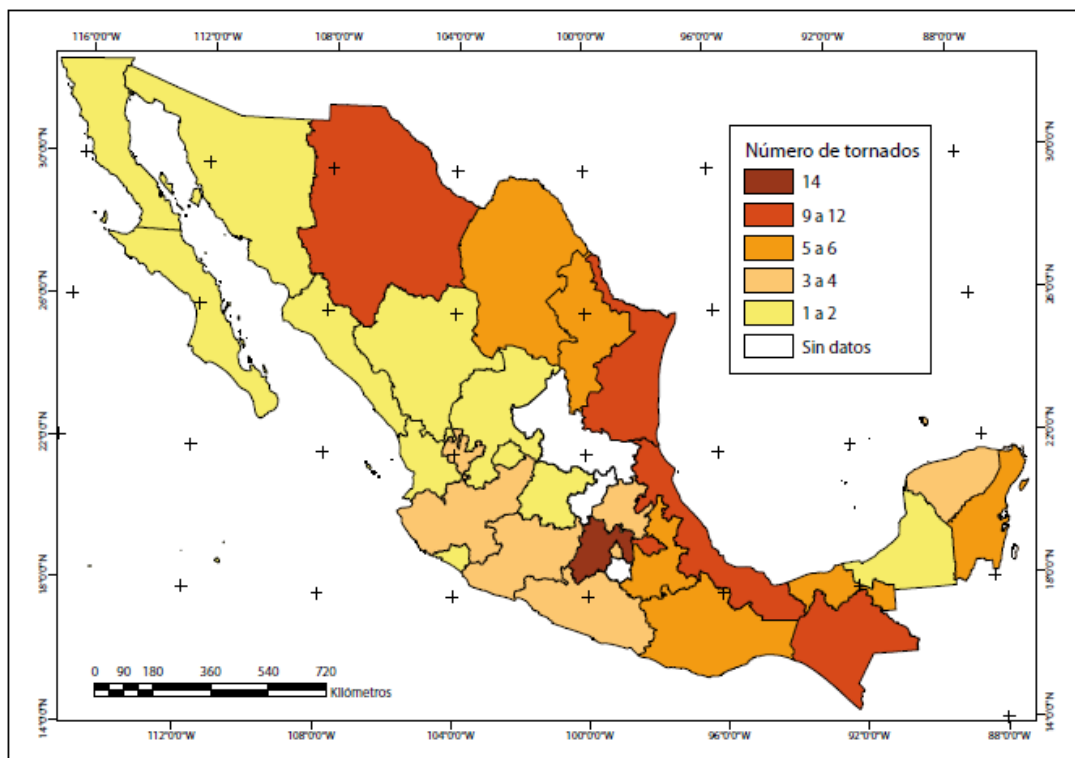


Figura 20 - Tornados por estados en México (CENAPRED)

2.1.4. Análisis histórico de huracanes en México

De acuerdo con datos recabados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), desde el año 1997 hasta el año 2020, se presentaron 835 eventos asociados a ciclones tropicales, clasificados en depresión tropical, tormenta tropical y huracán, observados en la gráfica de la *figura 21* y *22*. Del total de eventos, 438 fueron registrados en aguas del Océano Pacífico, mientras que los 397 restantes en aguas del Océano Atlántico.

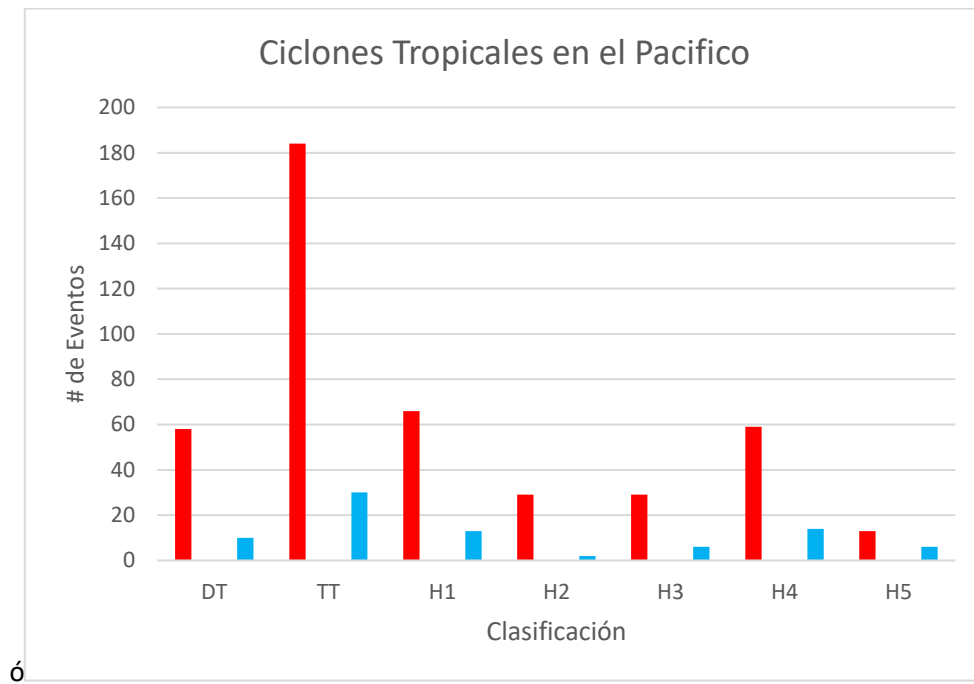


Figura 21 - Ciclones Tropicales del Pacifico, DT = Depresión tropical; TT = Tormenta tropical; H1 = huracán categoría 1; H2 = Huracán categoría 2; H3 = Huracán categoría 3; H4 = Huracán categoría 4; H5 = Huracán categoría 5

A pesar de la gran cantidad de eventos ocurridos, no todos ellos lograron alcanzar el territorio nacional, pues la gran mayoría perdieron fuerza en el océano y terminaron desintegrándose. En la gráfica anterior, el color rojo representa el total de eventos y el color azul los eventos que alcanzaron a tocar tierras nacionales.

Para el caso de eventos formados en el océano Pacífico, solo el 18% alcanzo la costa del país y, para el caso de Océano Atlántico, solo el 15%, como se muestra en la *figura 22*. En la gráfica, el color verde representa el total de eventos y el color morado los eventos que alcanzaron a tocar tierras nacionales.

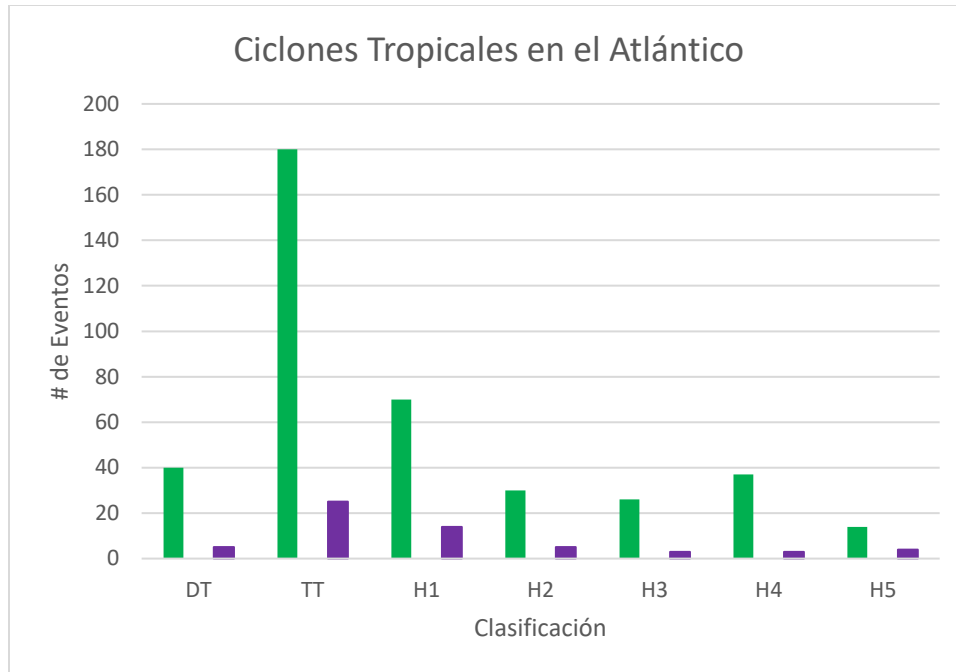


Figura 22 - Ciclones Tropicales del Atlántico, DT = Depresión tropical; TT = Tormenta tropical; H1 = huracán categoría 1; H2 = Huaracan categoría 2; H3 = Huracán categoría 3; H4 = Huracán categoría 4; H5 = Huracán categoría 5

Uno de los eventos más recientes y catastróficos fue el huracán Odile, que golpeo la costa de Baja California Sur. El 10 de septiembre el Servicio Meteorológica Nacional (SMN) alerto de la formación de una depresión tropical frente a las costas de los estados de Guerrero y Michoacán. El 13 de septiembre dicha depresión se había convertido en huracán, al superar velocidades de viento sostenido de 180 km/h. El 14 de septiembre alcanzo la categoría IV con velocidad de 215 km/h y ráfagas de 260 km/h. toco tierra en el sur de la península el 14 de septiembre habiéndose degradado a huracán categoría III de acuerdo la escala Saffir-Simpson con velocidades máximas de vientos sostenidos de 205 km/h y ráfagas de 240 km/h, el evento se disipo el 17 de septiembre como tormenta tropical. En la *figura 23* se observa la trayectoria del evento realizada por el SMN.

Las consecuencias del evento fueron considerables, el servicio de energía eléctrica y el abastecimiento de agua potable fueron suspendidos durante varios días, afectando al 95% de los usuarios del estado, debido al daño en torres y postes de transmisión, así como, sistemas de tratamiento de agua para consumo humano. de la actividad agropecuaria, se consideró que aproximadamente un 30% de las hectáreas cultivadas fueron afectadas.

Este evento fue ha sido uno de los huracanes con velocidades de viento en tierra más intensos que han golpeado el estado de Baja California Sur. Según el análisis del banco de México, las afectaciones económicas graves se concentraron principalmente en el sector turístico y tuvieron

una corta duración, por lo que su impacto sobre la economía nacional fue limitado, sin embargo, el impacto en la economía local fue muy grande.



Figura 23 - Trayectoria del huracán Odile (NOAA)

Las pérdidas humanas fueron pocas, pero considerables, seis personas perdieron la vida, todas en el municipio de Los Cabos. El monto total de daños y pérdidas por este fenómeno ascendió a más de 24 mil millones de pesos. El 86% de esta cifra corresponde a los daños, mientras que el 14% restante a pérdidas. El sector que se vio más afectado fue el productivo, principalmente el turístico, con un 42% del total. Cabe mencionar que este monto, estimado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), incluye tanto los efectos del sector privado, con un 73% de los efectos totales, como del público, con el restante 27%. En la *tabla 3* un desglose de daño y pérdidas estimadas por el CENAPRED.

Tabla 3 - Daños y pérdidas estimas por el CENAPRED para el ciclón tropical Odile

Concepto	Daños	Pérdidas	Total	Porcentaje del total
	(Miles de pesos)			
Sectores Sociales				
Vivienda	\$1,171,844.00	\$8,244.00	\$1,180,088.00	4.9
Educación	\$337,598.00	\$91,187.00	\$428,785.00	1.8
Salud	\$136,949.00	\$4,127.00	\$141,076.00	0.6
Infraestructura Hidráulica	\$2,094,060.00	\$37,900.00	\$2,131,960.00	8.8
subtotal	\$3,740,451.00	\$141,458.00	\$3,881,909.00	16.1
Infraestructura Económica				
Comunicaciones y Transportes	\$864,907.00	\$118,251.00	\$983,158.00	4.1
Infraestructura Vial y Urbana	\$907,000.00	\$0.00	\$907,000.00	3.8
Infraestructura Eléctrica	\$520,000.00	\$1,647,000.00	\$2,167,000.00	9.0
subtotal	\$2,291,907.00	\$1,765,251.00	\$4,057,158.00	17
Sectores Productivos				
Agropecuario, Pesquero y Acuícola	\$610,208.00	\$0.00	\$610,208.00	2.5
Comercio	\$1,627,300.00	\$20,300.00	\$1,647,600.00	6.8
Industria	\$1,961,054.00	\$0.00	\$1,961,054.00	8.1
Turismo	\$9,075,865.00	\$1,064,163.00	\$10,140,028.00	42.0
otros giros asegurados	\$1,504,669.00	\$0.00	\$1,504,669.00	6.2
subtotal	\$14,779,096.00	\$1,084,463.00	\$15,863,559.00	65.7
Atención de la Emergencia	\$0.00	\$330,543.00	\$330,543.00	1.4
Total	\$20,811,454.00	\$3,321,715.00	\$24,133,169.00	100.0

2.2. Modelado Numérico

La simulación computación es una herramienta relativamente moderna utilizada ampliamente para la resolución de problemas complejos que requieren un análisis detallado. Es posible realizar simulaciones como sistemas físicos y sistemas biológicos complejos por medio de ecuaciones diferenciales parciales. Es una herramienta de gran utilidad en múltiples áreas de la ciencia y la ingeniería, especialmente cuando la experimentación directa es demasiado costosa o imposible de realizar, por lo que la simulación numérica se vuelve la única alternativa. Para encontrar la solución a dichos problemas.

2.2.1. Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un método de aproximación de problemas continuos que consiste esencialmente en separar sistemas en sus componentes individuales o elementos cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, para luego reconstruir el sistema original y ser estudiado a partir de sus componentes. Está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico presente en geometrías complejas.

El MEF nos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un dominio (medio continuo), sobre el cual se definen ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento del problema a partir de una división de subdominios denominados elementos finitos, este proceso conocido como discretización coloca dentro de cada elemento, una serie de puntos o “nodos” los cuales es conjunto suelen llamarse “malla”. Un nodo puede pertenecer a un solo elemento o en caso de ser un nodo de borde, puede pertenecer a varios elementos generando una conexión. El cálculo de las variables se realiza sobre estos nodos, de acuerdo con relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad, en la *figura 24* se observan algunos elementos del sistema, Ferrari et al., (2018).

El MEF es muy usado debido a su generalidad y la facilidad de estudiar dominios de cálculo complejo, ya sea en dos o tres dimensiones.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo (infinitos grados de libertad) también rigen el elemento.

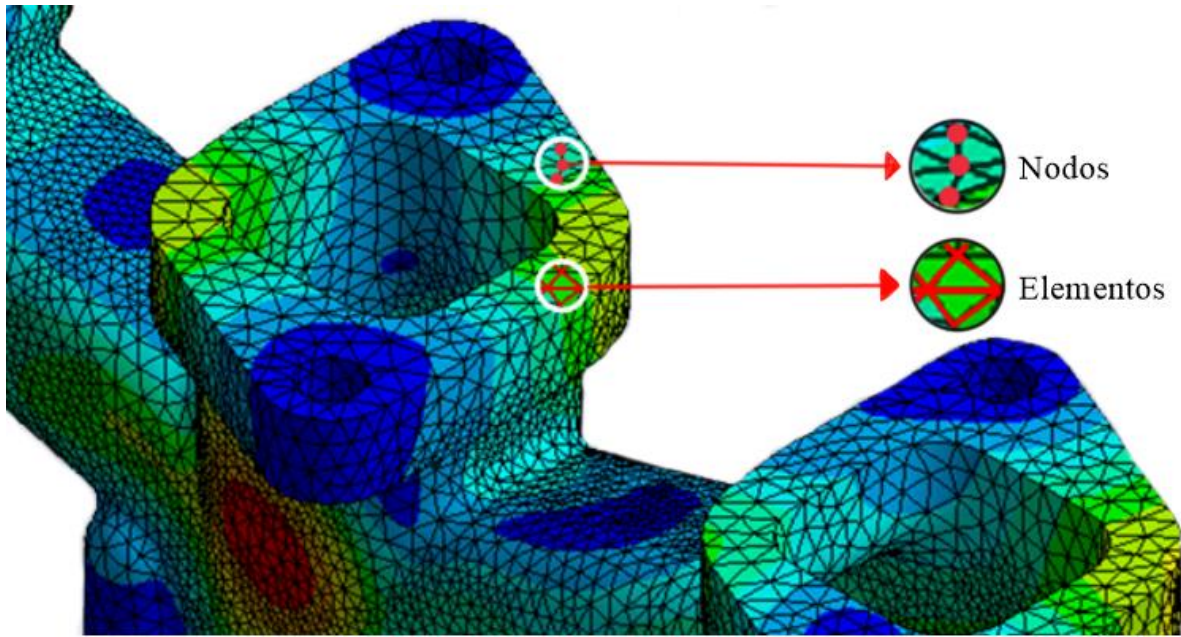


Figura 24 - Método de Elementos Finitos (MEF) (<https://shortest.link/3YDu>).

2.2.2. *Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)*

La dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) es una herramienta muy útil en el análisis de sistemas prácticos, como los son los fenómenos físicos y químicos donde se ve involucrado el movimiento de fluidos. Con tales fenómenos se puede transferir de masa, cantidad de movimiento, energía, especie química de una región a otra, de un tiempo a otro.

Para simular el flujo, se tienen básicamente tres alternativas: Simulación numérica directa (DNS); simulación de grandes escalas (LES); y ecuaciones promediadas o modelos de turbulencia (Reynolds Average Navier-Stokes Equations, RANS), también llamadas ecuaciones de Navier Stokes.

La DNS consiste en discretizar las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo, estas son válidas tanto para flujo laminar como para flujo turbulento y resolverlas numéricamente. La discretización resuelve todas las escalas espaciales y temporales de las variables de flujo, por lo tanto, no se requiere modelo adicional. Generalmente se limita a flujos con número de Reynolds bajos y configuraciones sencillas.

Las LES resuelven las ecuaciones instantáneas para las escalas de mayor tamaño que son más efectivas en el transporte de propiedades en comparación con las escalas menores que son más débiles y de menor capacidad de transporte. Se requiere de un modelado para tomar en cuenta el modelado de las grandes escalas, en cambio las pequeñas son filtradas. Debido a que se requiere de análisis tridimensional y temporal, el costo computacional suele ser elevado, con respecto al método DNS.

La simulación RANS es extensamente utilizada en casos de interés industriales, tiene una aproximación estadística para que el análisis de turbulencia sea estacionario, es decir, sus propiedades no cambien con el tiempo y son determinadas por condiciones de frontera. Esta técnica consiste en modelar todas las escalas espaciales y temporales de las fluctuaciones turbulentas. Las ecuaciones no son cerradas y por consecuencia, se requieren modelos de turbulencia para cerrar el sistema. Esta alternativa es de menor exigencia computación comparada con los métodos DNS y LES.

Las aplicaciones del análisis de CFD son ilimitadas en cuanto a fluidos se trate, pues es posible obtener una solución aceptable a una gran cantidad de problemas como los señalados en la *figura 25*, entre sus aplicaciones se encuentran las siguientes ramas:

- Neumología: Estudios de la circulación sanguínea, modelos predictivos para la eficacia y seguridad de fármacos inhalados, flujo de aire en vías respiratorias, etc. (*figura 25a*).
- Biotecnología: Transferencia de masa en células dañadas, procesos de optimización y daño hidrodinámico en células.

- Industria Aeroespacial: Utilizado para predecir el arrastre, levantamiento, cargas estructurales y térmicas, procesos de combustión, todo lo relacionado con el rendimiento de sistemas y subsistemas de aviones (figura 25c).
- Industria Automotriz: Aerodinámica de vehículos, distribución de presiones, análisis de temperaturas, etc., (figura 25b).
- Diseño de barcos: Distribución y rendimiento de combustible, análisis de desempeño de la propela, revisión de resistencia de ciertos elementos, etc.
- Ingeniería civil: Estudios de confort en edificios altos, análisis de presiones, Estudios de oleaje para puertos, etc., (figura 25d).
- Industria de manufactura: diseño de válvulas y otros elementos hidráulicos, estudio del comportamiento de redes de fluidos, intercambio de calor y sistemas de refrigeración, etc.

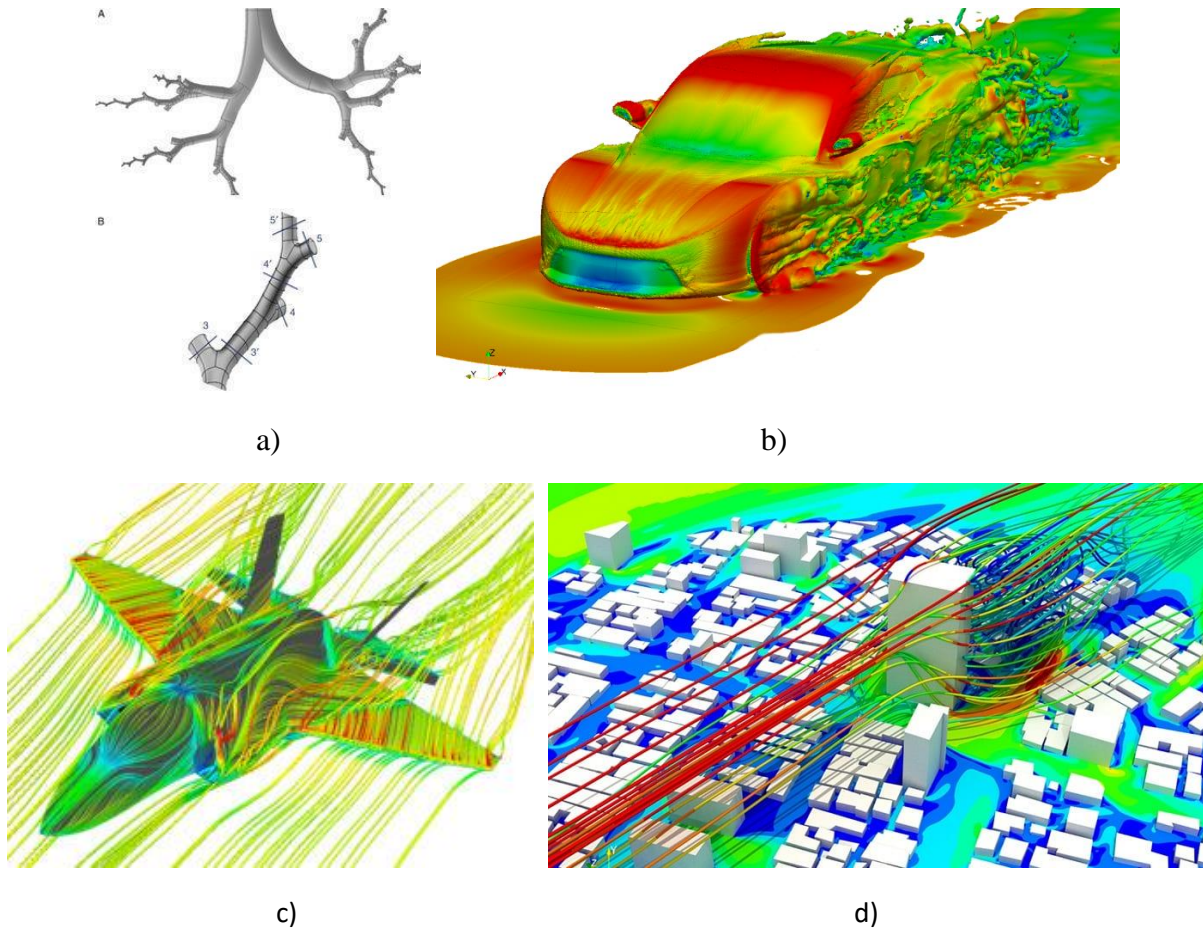


Figura 25 - Diversas aplicaciones de CFD (<https://shortest.link/49Kc>).

En el mercado existen diversos programas capaces de realizar análisis sobre dinámica de fluidos computacional, entre ellos, los más utilizados son: ANSYS FLUENT, CFX, FLOWIZARD, PHOENICS, STAR-CD y OPEN-FOAM.

ANSYS FLUENT, uno de los más comunes y utilizados por su interfaz sencilla y gran capacidad de procesamiento, proporciona capacidades de modelado para una amplia gama de problemas de flujos de fluidos, tanto compresibles como incompresibles, laminares y turbulentos. Para todos los fluidos, FLUENT resuelve ecuaciones de conservación de masa y momento, para flujos turbulentos, también se resuelven ecuaciones de transporte.

Capítulo 3

En este capítulo se describe de manera general el modelo utilizado para realizar el análisis del sistema de cubierta por medio de programa de cómputo, tanto el modelo para analizar el comportamiento del sistema SSR como el modelo para analizar la distribución de presiones en edificios industriales de baja altura; además, se realiza una descripción del sitio de estudio en el que se basa esta investigación, así como sus construcciones industriales típicas.

3.1. Modelos de Prueba

3.1.1. Descripción del sitio

El estudio se centra en la ciudad de Los Mochis, en la región norte del estado de Sinaloa, esta región es anualmente afectada por eventos meteorológicos de gran impacto como huracanes, causando estragos en las edificaciones debido a que la mayor parte de las construcciones industriales se encuentran en la periferia de la ciudad, rodeadas por campos de cultivo que representan una escasa o nula protección frente a los fuertes vientos de dicho fenómeno meteorológico. En la *figura 26* se observa la distribución de zonas industriales en la ciudad enmarcadas con color rojo. Algo importante a recalcar es que estos campos de cultivo se dejan descansar en la temporada de junio-octubre, por lo que durante estos meses se encuentran totalmente libres y es en esta temporada cuando se presentan la mayor cantidad de huracanes, lo que conlleva a que la protección sea nula.

Históricamente se han presentado problemas por succión de cubiertas en edificaciones industriales de la zona, debido a que son instaladas sin un correcto control de calidad o mano de obra poco calificada. Debido a esto, se presentan pérdidas económicas que impactan enormemente a la región, pues estas edificaciones proveen trabajo a una considerable cantidad de habitantes, además, la mayor actividad económica de la región es la agricultura, por lo que la mayoría de las edificaciones industriales se utilizan para el almacenamiento de granos y fertilizantes.

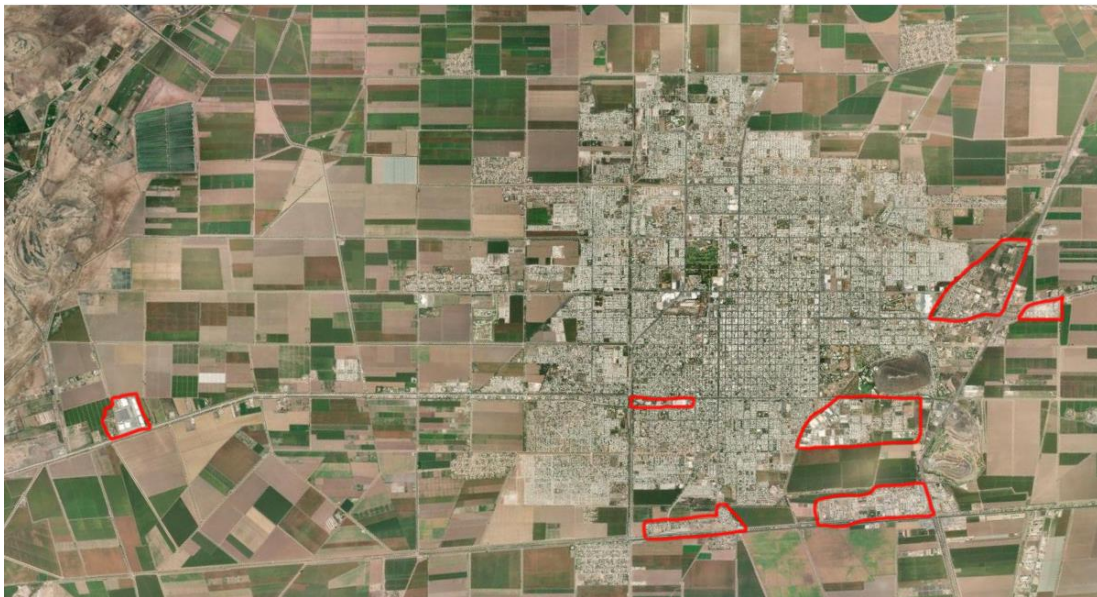


Figura 26 - Distribución Industrial de la ciudad (Google maps)

La configuración típica de naves industriales en la zona es, una construcción con cubierta a dos aguas a base de lámina KR-18 típicamente con una pendiente del 5%, muros a base de block de concreto hasta cierta altura la cual generalmente son los primeros 3m de la estructura para continuar con lámina acanalada hasta el cierre con cubierta y marcos metálicos armados con traveses y columnas IPR (W) como se observa en la *figura 27*. Esta configuración genera edificaciones flexibles debido a la gran altura y baja rigidez de los marcos, haciéndolos susceptibles al impacto de huracanes.



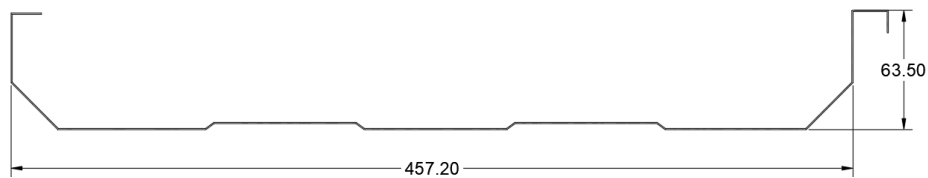
Figura 27 - Configuración típica de nave industrial (Google maps)

3.1.2. Sistema de cubierta

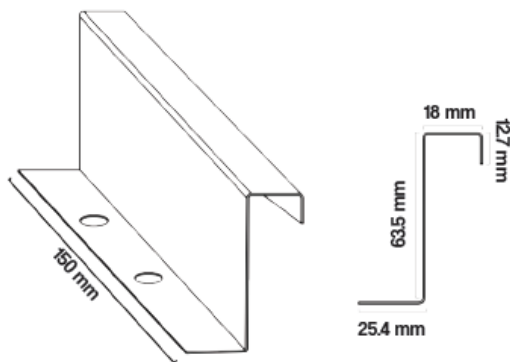
Para caracterizar el comportamiento de la cubierta tipo SSR bajo cargas de succión se elaboraron dos modelos matemáticos en ANSYS MECHANICAL. El primero de ellos es un modelo simple de cubierta metálica basado en dos láminas unidas con sistema de engargolado a un clip fijo, que a su vez se sujeta de un perfil ligero tipo “C” estructural por medio de pijas autoperforantes (Modelo 1). Para un segundo modelo, la geometría se estableció bajo los estándares el documento E1592 “Standard Test Method for Structural Performance of Sheet Metal Roof and Siding Systems by Uniform Static Air Pressure Difference” con los mismos elementos que el primer modelo 1 (Modelo 2).

3.1.2.1. Modelo 1 – Simplificado

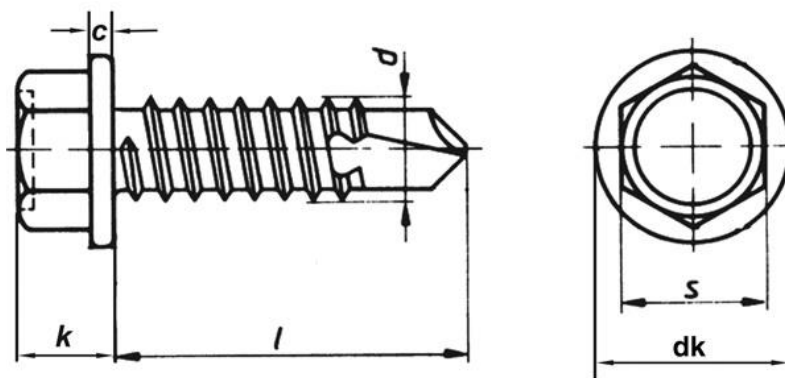
El sistema se basa en dos paneles metálicos KR-18 calibre 24, sujetos por clips fijos de igual calibre por medio de un engargolado a 90°, el clip este unido a un perfil de cubierta de sección “C” calibre 14 por medio de pijas autoperforantes como se observa en la *figura 28*. Los paneles, clip y perfil “C” o polín, están fabricado a partir de lámina conformada en frio bajo la norma A653 de grado 37, con una resistencia a la fluencia de 255 MPa ($f_y = 2,600 \text{ kg/cm}^2$) y una capacidad última de 360 MPa ($f_u = 3,671 \text{ kg/cm}^2$) y las pijas autoperforantes son a base de material C1022 con una resistencia a la fluencia de 330 MPa ($f_y = 3,365 \text{ kg/cm}^2$) y una capacidad última de 550 MPa ($f_u = 5,608 \text{ kg/cm}^2$).



a) Perfil KR-18



b) Clip de Sujeción Estándar



c) Tornillo Autoperforante

Figura 28 – Elementos de cubierta (ACEROMART)

Es necesario realizar la definición de los materiales en el programa ANSYS MECHANICAL con el fin de que este reconozca su comportamiento. El programa cuenta con una librería de materiales, pero es posible realizar una definición propia de los mismos, en este caso se realiza la definición de los materiales A653, A513 y C1022. En la *figura 29* se muestran las curvas esfuerzo deformación simplificadas de los materiales a partir de un modelo “Bilinear Isotropic Hardening”.

ASTM A653 “Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process”

Esfuerzo de Fluencia: 255 MPa

Esfuerzo último: 360 MPa

Módulo de Elasticidad: 200,000 MPa

Relación de Poisson: 0.30

ASTM A568 “Standard Specification for Steel, Sheet, Carbon, Structural, and High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, General Requirements”

Esfuerzo de Fluencia: 317 MPa

Esfuerzo ultimo: 427 MPa

Módulo de Elasticidad: 200,000 MPa

Relación de Poisson: 0.30

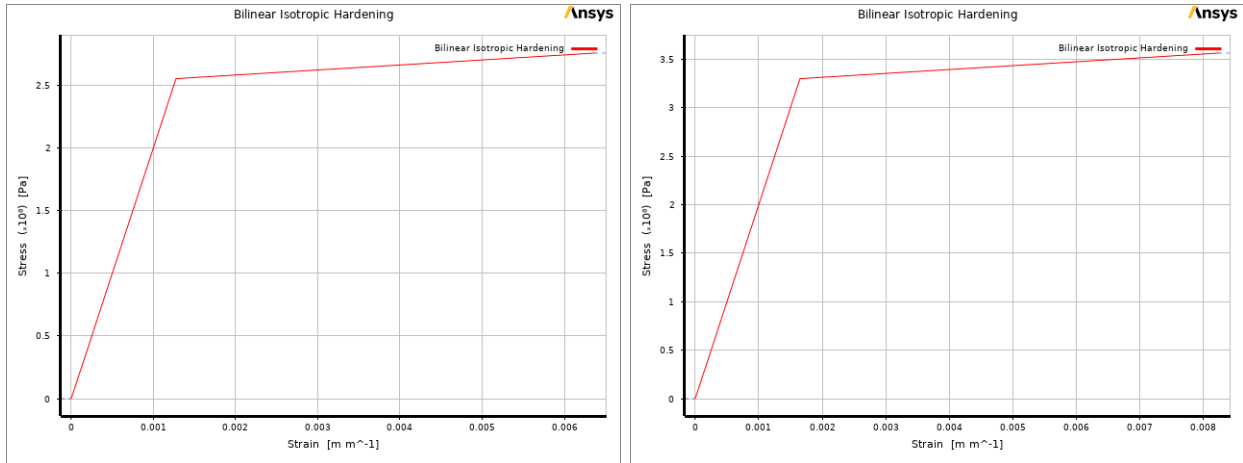
AISI 1022 Low Carbón Steel

Esfuerzo de Fluencia: 330 MPa

Esfuerzo ultimo: 550 MPa

Módulo de Elasticidad: 200,000 MPa

Relación de Poisson: 0.29



a) A653 Gr-37

b) C1022

Figura 29 - Curva Esfuerzo-Deformación (ANSYS)

La finalidad de este modelo es entender el comportamiento básico de las interacciones que se presentan en las distintas conexiones de los elementos involucrados que son:

- Panel KR-18 – Clip
- Clip – Pija auto perforante
- Pija auto perforante – Polín
- Polín - Clip

Debido a que se modelan distintos elementos es necesario añadir los llamados “Elementos de contacto” esto con el fin de conocer la interacción entre las distintas partes del sistema.

Para este modelo se utilizaron distintos tipos de contactos observados en la *figura 30*, descritos a continuación.

- Elementos sin fricción (*Frictionless*) en color verde: Utilizado en la zona de contacto entre los paneles KR-18 y en la zona de contacto del clip de conexión con el perfil de cubierta, con este contacto se asume que la fricción entre elementos es cero.
- Sin separación (*No Separation*) color naranja: Utilizado en la zona de contacto de las cabezas de las pijas auto perforantes con el clip de conexión, haciendo que los elementos puedan deslizarse uno sobre otro, pero no separarse.

- Unido (*Bonded*) color azul: Este contacto se usa en la zona interior de las perforaciones del perfil de cubierta, a manera de simular el roscado de las pijas y su unión con el elemento, de manera que se encuentran unidos.

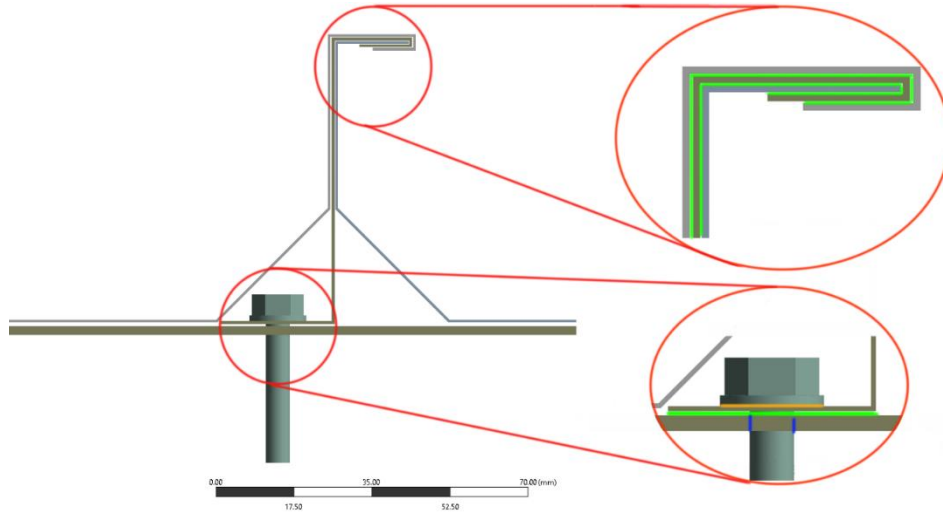


Figura 30 - Contactos en el modelo M1

La geometría de este modelo se realizó con la finalidad de ser solo un referente para el modelo de prueba completo (Modelo 2), por lo tanto, su geometría general no tiene base en alguna prueba estandarizada.

El modelo consiste en dos paneles KR-18 sujeto con 3 filas de clips distribuidos cada 1.5m, dando un total de 15 clips en toda la longitud y apoyados sobre la ceja superior del perfil tipo “C”, figura 31.

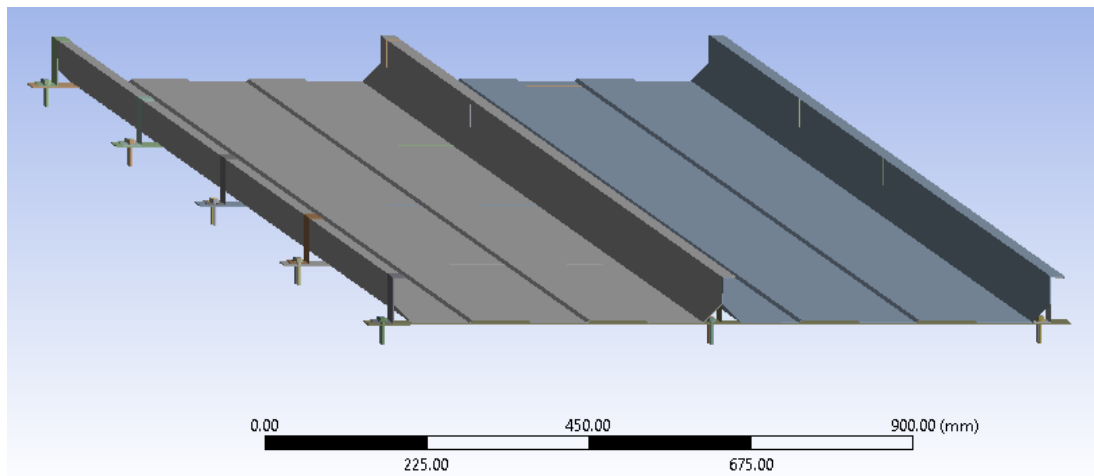


Figura 31 - Geometría del Modelo 1

Por tratarse de un modelo simplificado, se utiliza una carga en succión lineal que va de 0-2400 pascales, aplicada en un tiempo de 10 segundos (figura 32).

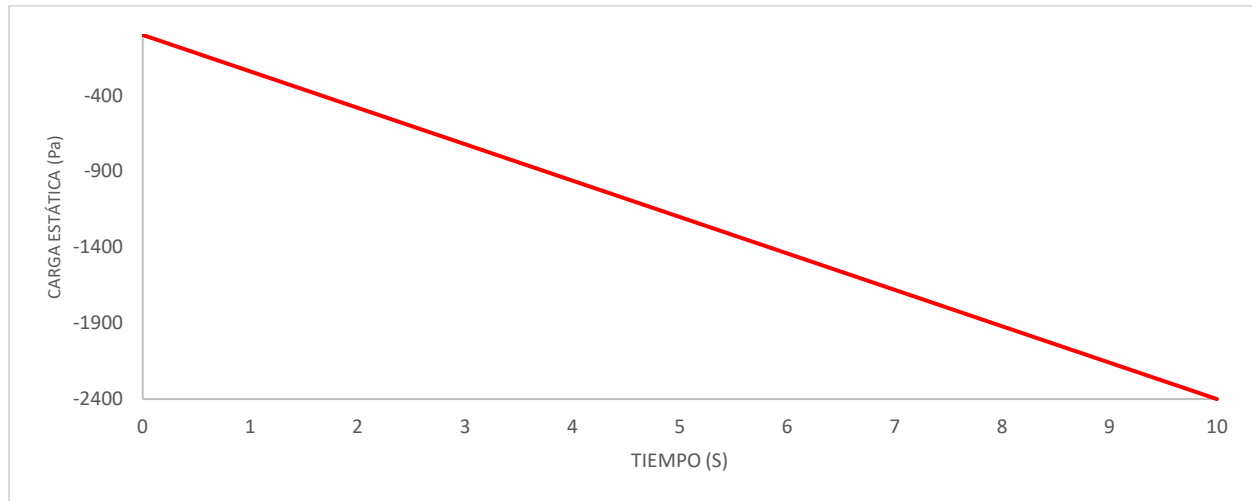
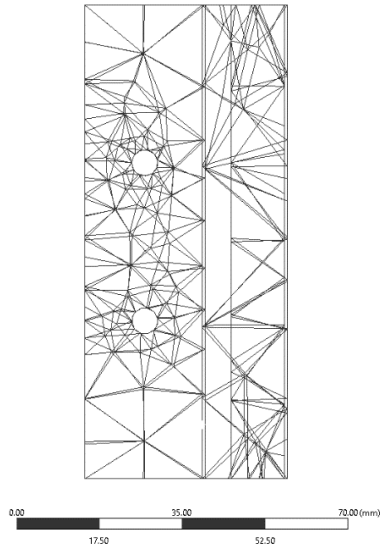


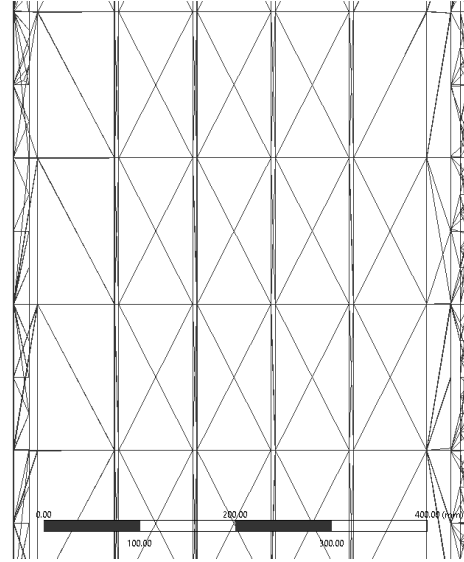
Figure 32 - Prueba de carga Modelo 1

Al tratarse de un análisis por el método de elementos finitos, un aspecto muy importante a cuidar es el mallado de los elementos, ya que, de este aspecto dependerá el adecuado funcionamiento del modelo. En este caso se cuida que el tamaño del mallado sea lo suficientemente fino para un análisis adecuado, sin que esto exija una capacidad computacional fuera de lo disponible.

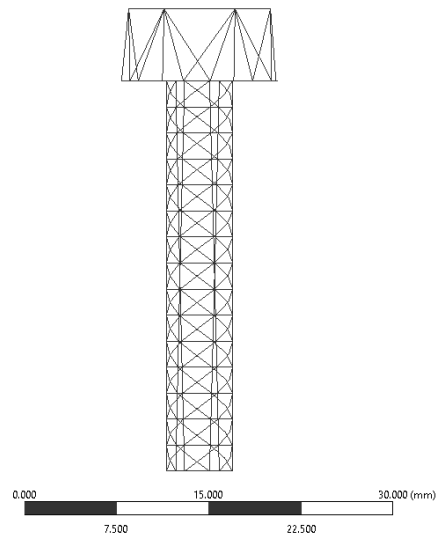
De acuerdo con investigaciones anteriores, las mayores concentraciones de esfuerzo y deformaciones en el sistema se encuentran alrededor de los orificios de los sujetadores en el clip de sujeción, por lo tanto, es necesario considerar en mallado de mayor finura en esa zona (*figura 33*).



a) Clip de sujeción



b) Panel KR-18



c) Pija Autoperforante

Figura 33 - Mallado de elementos

3.1.2.2. *Modelo 2 – Modelo basado en ASTM E1592.*

Este modelo utiliza los materiales ya descritos en el modelo 1, siendo la única diferencia, la geometría general de la prueba y la carga utilizada, ya que estas características están indicadas en la norma ASTM E1592.

La norma indica lo siguiente en cuanto al modelo de prueba:

“El modelo debe contar con el tamaño suficiente para determinar el desempeño de todas las partes del sistema. Las condiciones de apoyo deben ser simuladas con la mayor precisión posible y él debe ser cargado en todo lo ancho y largo.

Para la evaluación de la capacidad a flexión como la capacidad ante cargas de succión el ancho del espécimen debe contar de al menos tres paneles completos y cinco elementos estructurales.

Para pruebas de succión, el espécimen debe tener la longitud suficiente para garantizar que las juntas o accesorios de borde no limiten el movimiento en el área de investigación. Para la evaluación la longitud mínima será de 7.3m. menores longitudes son aceptables cuando solo un borde está restringido y cuando el borde no restringido está a al menos 2.4m de una conexión.”

La prueba de succión se basa en etapas de carga y descarga del espécimen, y el procedimiento es descrito a continuación:

- Se aplica una carga inicial de al menos 4, pero no más de 10 veces el peso propio del espécimen. Si la carga aplicada no es en dirección de la gravedad, se usará como una presión de referencia cero.
- El primero incremento de carga debe ser igual a 1/3 de la carga ultima anticipada aplicado durante 60 segundos.
- Se reduce la carga a la presión de referencia cero y se mantiene 60 segundos.
- El procedimiento es continuo con incrementos de carga no mayores a 1/6 de la carga ultima anticipada, sostenidos durante 60 segundos y reducciones a la presión de referencia cero.
- La prueba termina cuando se observa una falla inminente en el espécimen.

Tomando en cuenta lo anterior, se estableció la geometría del modelo y la prueba de carga de la siguiente manera:

Se utilizan 5 paneles completos KR-18 y en los bordes paneles medio. Bajo estas, se encuentran 5 líneas de conexión con clips estándar dando un total de 30 clips de conexión colocados a una distancia de 1.5m siendo esta una separación típica en cubiertas metálicas. Se observa la geometría en la *figura 34*.

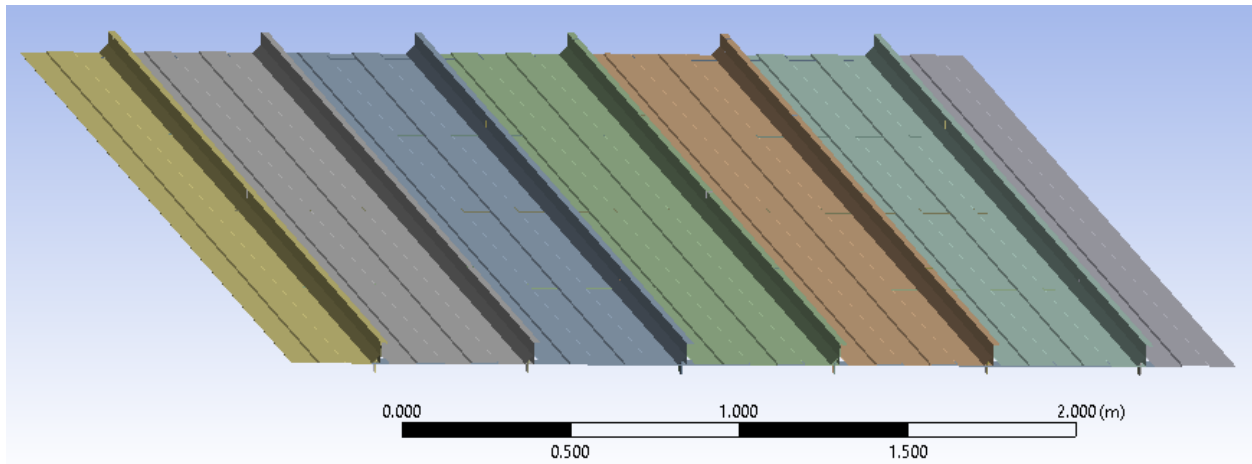


Figura 34 - Geometría del Modelo 2

La carga última anticipada se estableció en 2.4 KPa, de acuerdo con distintas investigaciones realizadas con pruebas de carga estáticas, por lo tanto, el parámetro de carga establecido es presentado en la *figura 35*.

Con este modelo de carga se busca obtener al menos 6 puntos de deformación en el cual se pueda realizar un análisis del estado de las conexiones y su comportamiento en cada punto y con ello, establecer un punto de desempeño del sistema.

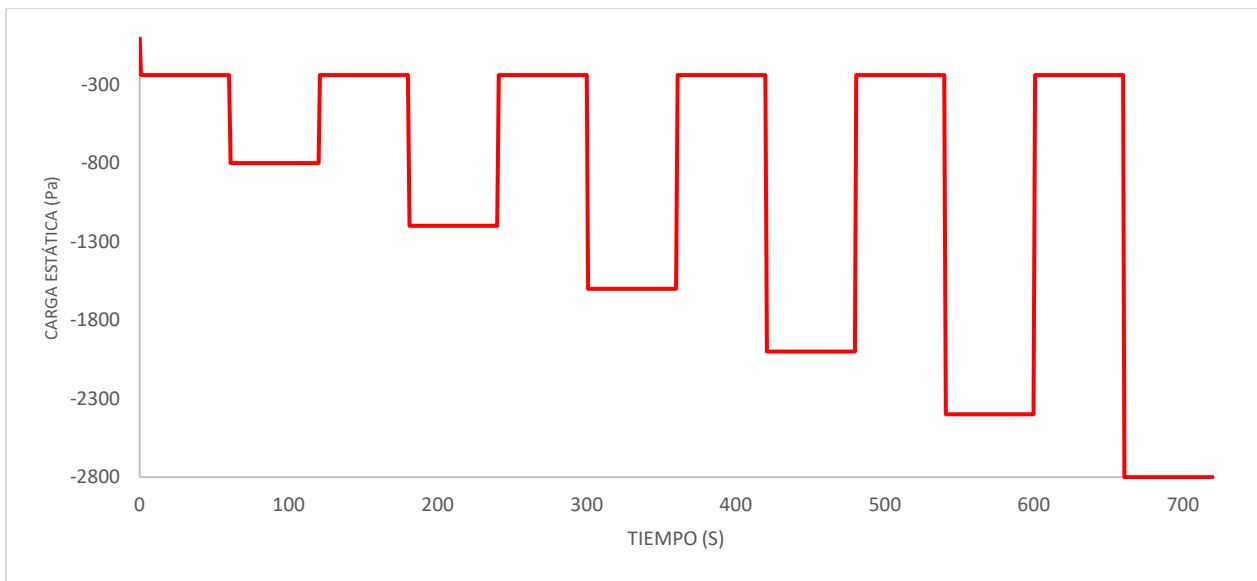


Figura 35 - Prueba de carga E1592

La imagen anterior representa el parámetro de carga establecido por la especificación ASTM E1592, sin embargo; este parámetro es para pruebas en túnel de viento y lo que se busca al mantener la succión durante 60 segundos es estabilizar la deformación que pueda ocurrir en el panel y permitir que la geometría se ajuste.

Debido a que la prueba realizada en este caso es por medio de elementos finitos, no se requieren 60 segundos de carga sostenida para la estabilización, por lo que se realizó una reducción a la prueba de carga, la cual es presentada en la *figura 36*. Esta es una prueba reducida a partir la presentada anteriormente, en la que la carga es sostenida solo durante 2 segundos y debido a que es necesario aplicar la carga de manera gradual, se decidió colocar puntos de carga intermedio y así poder suavizar la gráfica para evitar errores en el modelo, manteniendo los 6 puntos de carga sostenida necesarios.

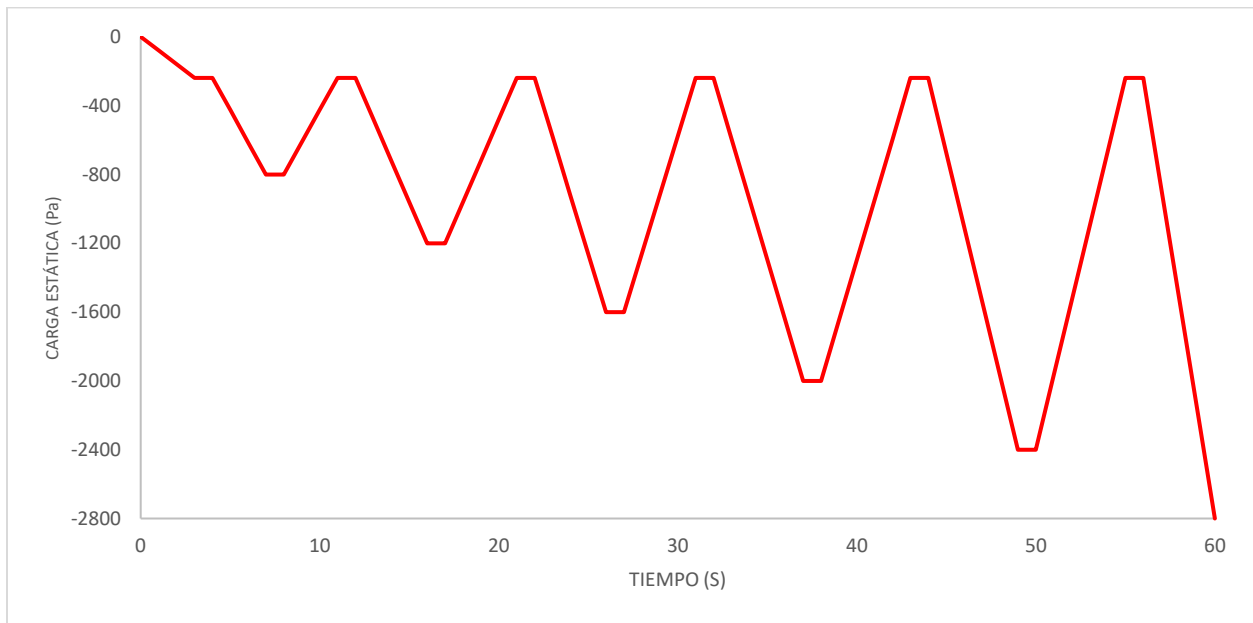


Figura 36 - Prueba de carga reducida

3.1.2.3. Criterio de aceptación.

En las cubiertas SSR probadas por el método de succión estática ASTM E1592, es común observar que el modo de falla principal se asocia con la apertura del clip en la zona de engargolado debido a las vibraciones presentadas por los efectos del viento y a las deformaciones que sufre el sistema durante las cargas de succión, que conlleva a la liberación de los paneles metálicos de cubierta Dixon y Pravatt (2010).

Debido a que un análisis de elementos finitos no es posible generar este tipo de fallas ya que el material se establece con un comportamiento elastoplástico perfecto, se adopta un criterio para el mismo basado en la deformación del sistema de sujeción y el ángulo de rotación del clip con respecto a la posición original (90°) que puede dar lugar a la liberación de los paneles de cubierta. Pruebas realizadas anteriormente demostraron que cuando el ángulo de rotación de la pestaña interior del clip alcanza una rotación de 97.6° con respecto a la posición vertical del clip, se considera que este se encuentra abierto por lo tanto el sistema de engargolado deja de funcionar como tal y los paneles metálicos están libres Qiarong et al., (2022). Estas investigaciones fueron realizadas sobre clip de sujeción de 360° , en este caso, al estar analizando clips de sujeción fijos con un ángulo de cierre de 90° , se establece el criterio de falla cuando el clip tiene un ángulo de rotación (β) de 7.6° (figura 41).

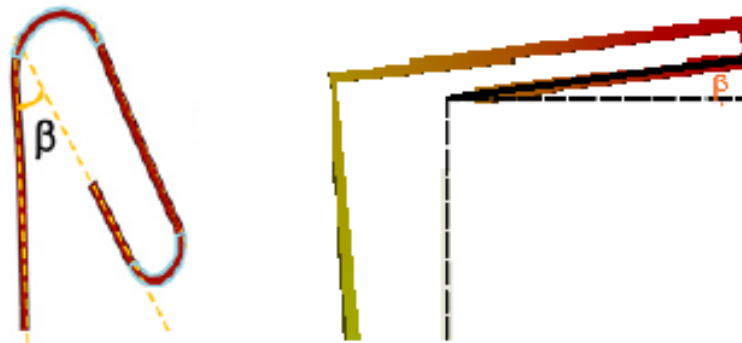


Figura 37 - Rotación en conexión del clip

Las deformaciones que serán relevantes para la evaluación de resultados serán aquellas presentadas por los puntos de conexión que están alejados de los bordes del modelo, esto para poder limitar la influencia de las condiciones de frontera, que podrían conducir a subestimar la capacidad del sistema ante cargas de succión.

En la *figura 38* se presenta los clips de sujeción sobre los cuales se medirán resultados. Los clips de borde enumerados de 1-6 y 25-30 son descartados, al igual que los clips 7, 12, 13, 18, 19 y 24 por su cercanía a los límites del modelo y no representar adecuadamente las deformaciones del sistema.

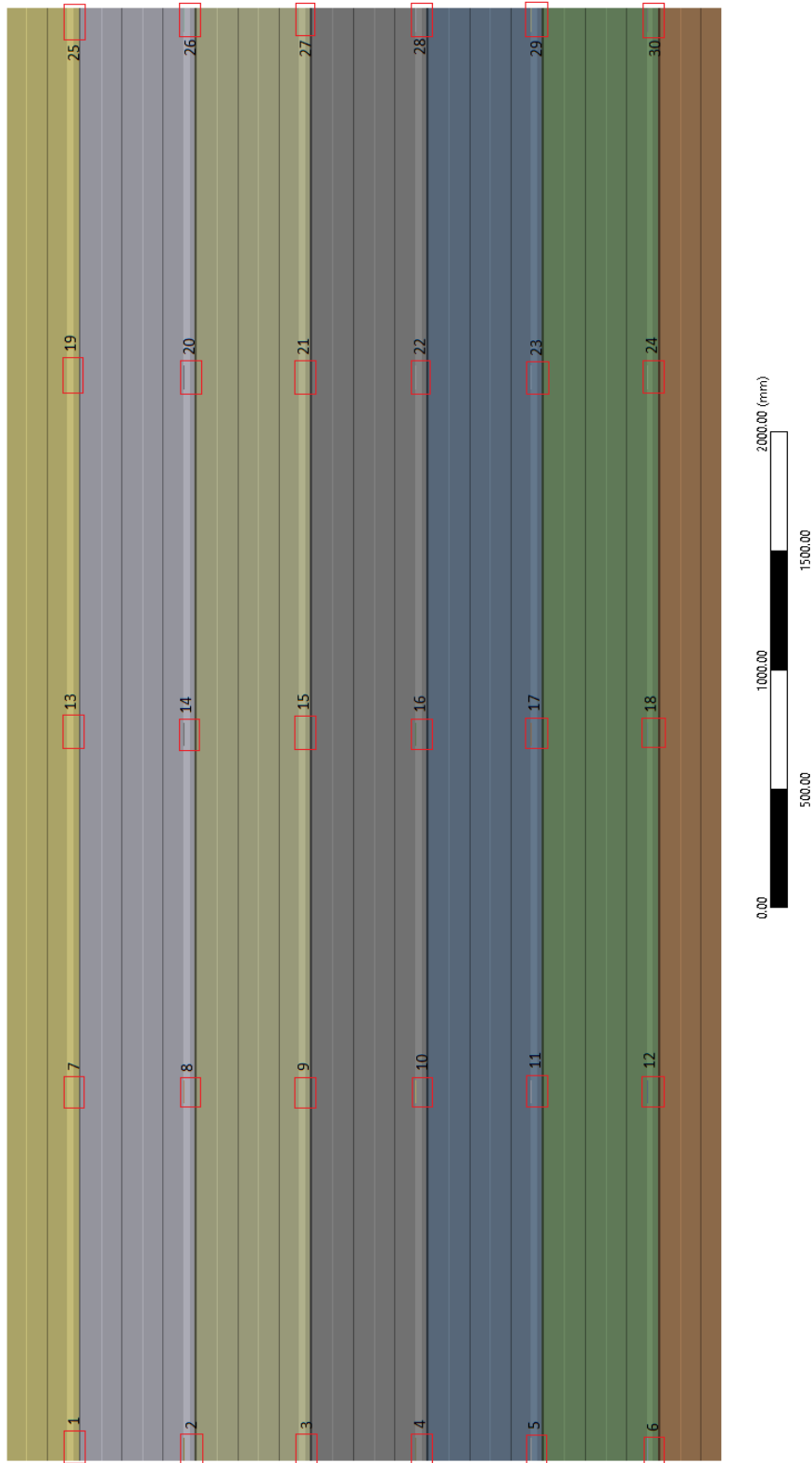


Figura 38 - Ubicación de clips de sujeción

3.1.3. *Distribución de presiones*

Para entender el efecto de la succión del viento en una edificación de baja altura (clasificación común de las naves industriales) se realizó un modelo en el cual se empleó la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esta herramienta permite simular fluidos a partir de modelos de elementos finitos y caracterizar su comportamiento.

Para el modelado y análisis se utilizó el programa ANSYS FLUENT, por su gran capacidad de análisis y facilidad de manejo.

Se realizó el estudio de una nave industrial típica con una geometría cuadrada de dimensiones $L=54.8\text{m}$ y $B=54.8\text{m}$ para obtener una relación $B/L=1.0$ y una altura de 9.9m medidos hasta la cumbrera (*figura 39*). Se realizaron tres modelos en los que se varía principalmente el grado de inclinación de la cubierta (θ). Debido a que la dirección del viento es impredecible, en los modelos también se realizó una variación con distintos ángulos de incidencia que parten de una dirección paralela a la cumbrera (0°) a una dirección normal a esta (90°), así como, distintas velocidades de viento asociadas a diferentes categorías de ciclones tropicales, los detalles se indican en la *tabla 4*.

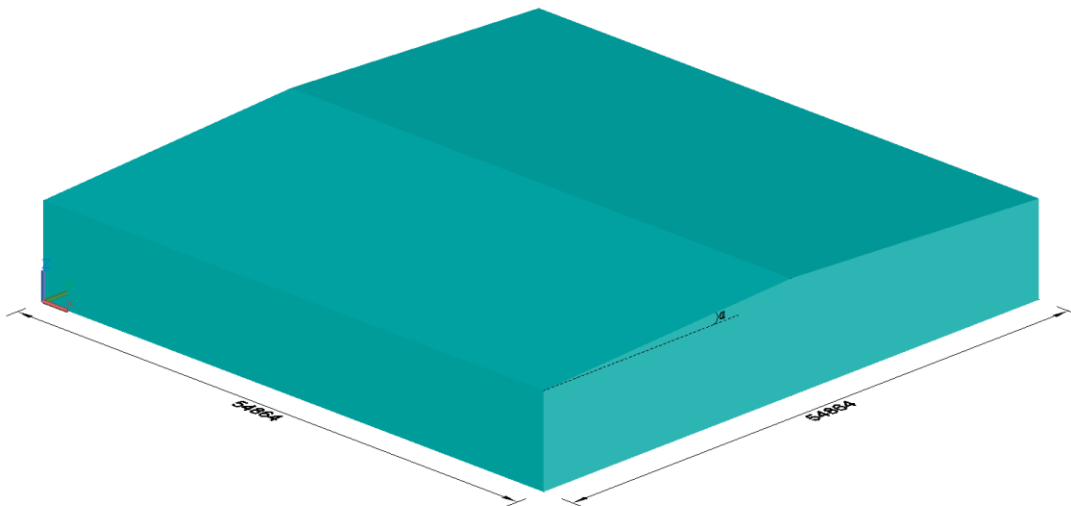


Figura 39 - Modelo de Nave industrial

La finalidad de este modelo es ubicar concentraciones de fuerzas de succión, así como la distribución de estas, tanto en la cubierta como en los muros laterales. Una vez obtenidas estas distribuciones, se establece el área de cubierta que se ve comprometida al alcanzar o superar la capacidad de succión obtenida con los modelos de cubierta SSR.

Tabla 4 - Características de modelos

Modelo	Pendiente de cubierta	Ángulo de Incidencia	Velocidad del viento
	%	θ	v
		°	m/s
1	3	0	5
		10	10
2	5	20	15
		30	20
		40	25
		45	30
		50	35
		60	40
		70	45
3	7	80	50
		80	55
		90	60
			65
			70
			80
			90

Al igual que los modelos anteriormente mencionados, el mallado es una característica que debe ser cuidadosamente analizada, pues se ha demostrado que un mal mallado arroja resultados irreales, mientras que un mallado excesivamente refinado podría consumir demasiada capacidad computacional. En el modelo se utilizaron tetraedros para obtener una convergencia adecuada revisando diferentes aspectos como son la calidad, radio de aspecto, etc. (figura 40).

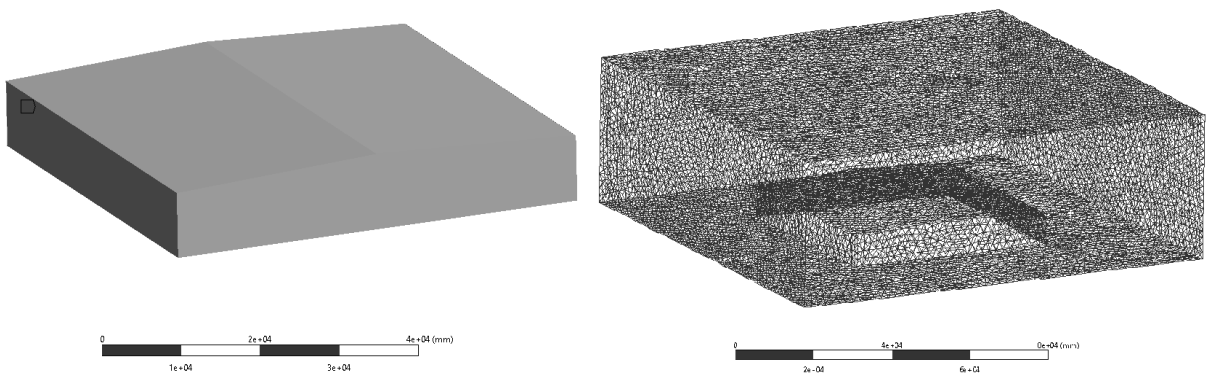


Figura 40 - Mallado de modelo de presiones

Se realizaron modelos para la obtención de presiones en cubierta agregando el efecto de edificaciones colindantes, con el fin de comparar distintos resultados con los del modelo anterior, pues es posible que se genere un cierto grado de protección por estas edificaciones o en caso contrario un aumento en las mismas, también, debido a la cercanía entre edificaciones es posible que el viento adquiriera una mayor velocidad generando problemas en los muros.

Los modelos de la edificación en estudio se ubicaron al centro y cuentan con dimensiones 54.86x54.86x9.91m y variando la pendiente de cubierta de 3,5 y 7%. Las edificaciones colindantes son de sección cuadrada en las esquinas y de sección rectangular en los costados, donde la única variación es su separación, en sentido vertical (Lv) y horizontal (Lh) (*tabla 5*). La velocidad del viento se consideró igual a los modelos de cubierta SSR, que va desde 0-90 m/s y variando la dirección de este desde un ángulo paralelo a la cumbrera (0°) hasta un ángulo en dirección normal a la misma (90°) (*figura 41*).

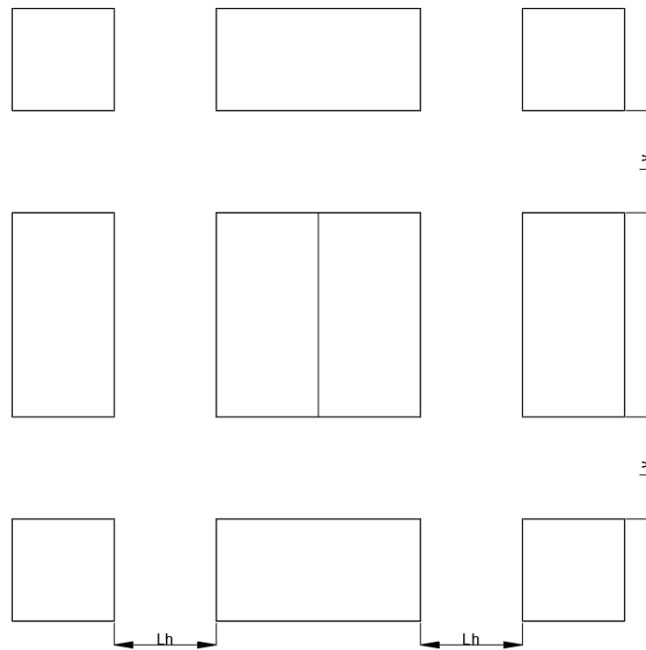


Figura 41 - Modelo con edificaciones colindantes (vista en planta).

Tabla 5 - Dimensiones

Modelo	Pendiente de cubierta	Longitud horizontal	Longitud vertical
	%	Lh m	Lv m
1	3	B/2 = 27.432	B/2 = 27.432
2	5	B/4 = 13.716	B/4 = 13.716
3	7	B/6 = 9.144	B/6 = 9.144

Capítulo 4

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los modelos de estudio, tanto en el modelo de análisis de comportamiento de la cubierta SSR, como el modelo de distribución de succiones en el edificio, además se incluye un análisis de costos relacionado con los daños en cubierta.

4.1. Resultados

4.1.1. Sistema de cubierta

4.1.1.1. Modelo 1 – Simplificado

Este es un modelo simplificado de la cubierta metálica tipo SSR de una nave industrial que se emplea como referencia para los resultados del modelo más completo (Modelo 2) y realizado bajo un estándar de prueba. La geometría de este modelo, así como su prueba de carga se especifican en la *sección 3.1.2*.

Se analizaron las deformaciones totales del sistema y las del clip al centro del sistema y los esfuerzos en la zona de conexión del clip.

En cuanto a las deformaciones totales (*figura 42*). La máxima deformación se observa en el panel izquierdo con un valor de 48mm; sin embargo, los clips de sujeción del borde se deforman excesivamente debido a que no existe restricción de un lado de éste.

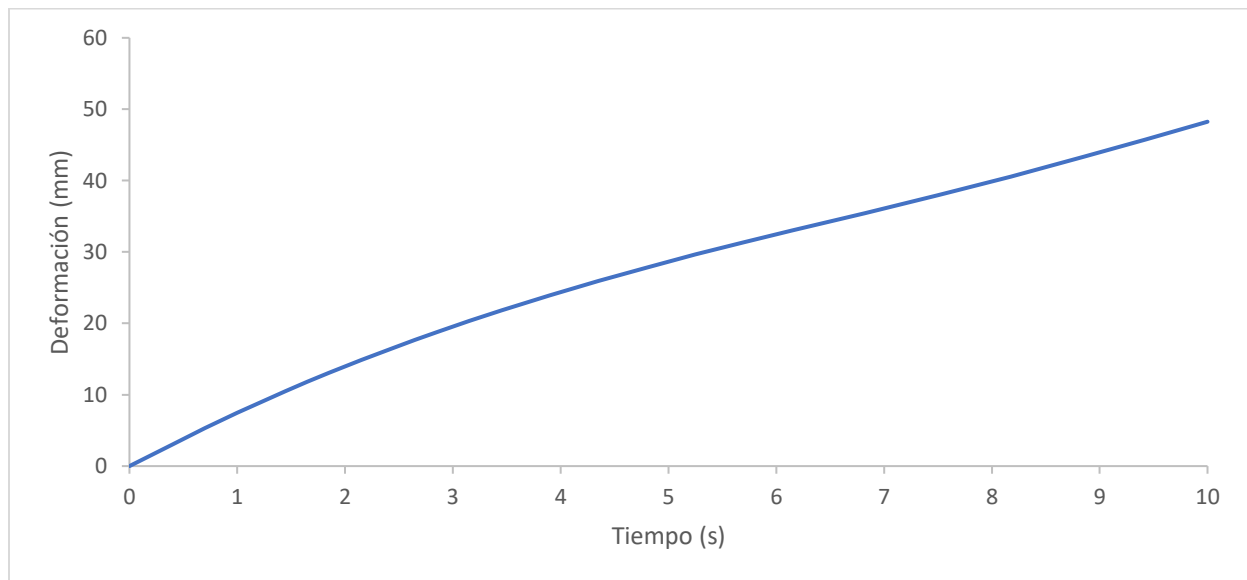


Figura 42 - Deformación total del modelo1

Para analizar la deformación de uno de los clips de sujeción, se seleccionó el del centro del modelo, debido a que, por su posición, los efectos de restricción de los bordes no tienen un gran impacto. En este clip se presentó una deformación de 0.8mm en sentido vertical, sin embargo; en la *figura 43* se observa que existe un efecto de levantamiento en la zona de zona donde los tornillos se unen al clip. También se observa que en las fuerzas de succión pueden hacer que los paneles se deformen verticalmente con la unión con clip, haciendo que el engargolado se abra y liberando al panel.

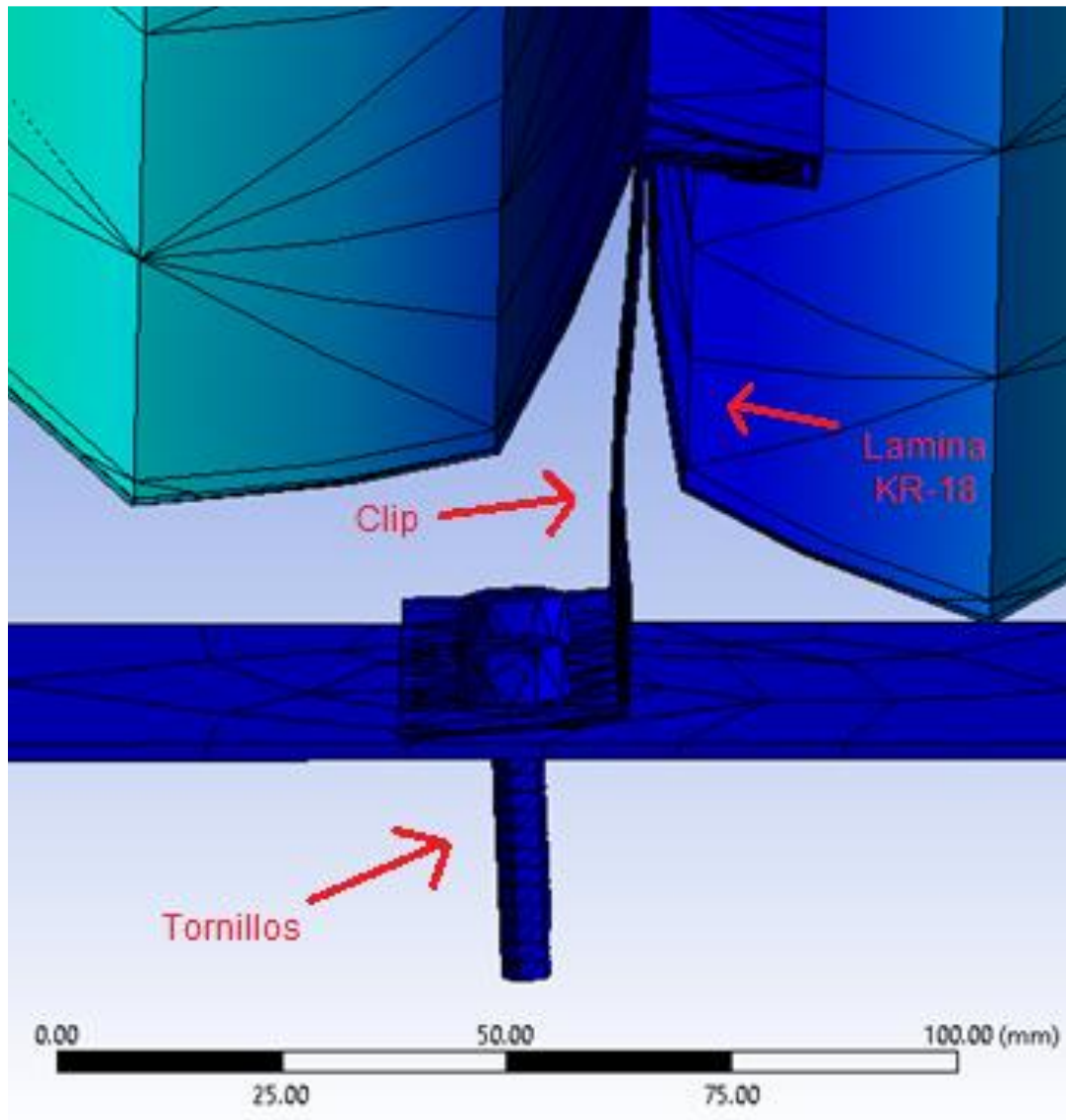


Figura 43 - Deformación del clip

Se observa en la figura 43 que los posibles modos de falla del sistema se relacionan con el rasgado del clip alrededor de los agujeros de conexión con los tornillos autoperforantes, o bien la apertura del engargolado con la consecuente liberación de los paneles.

4.1.1.2. Modelo 2 – Modelo basado en ASTM E1592

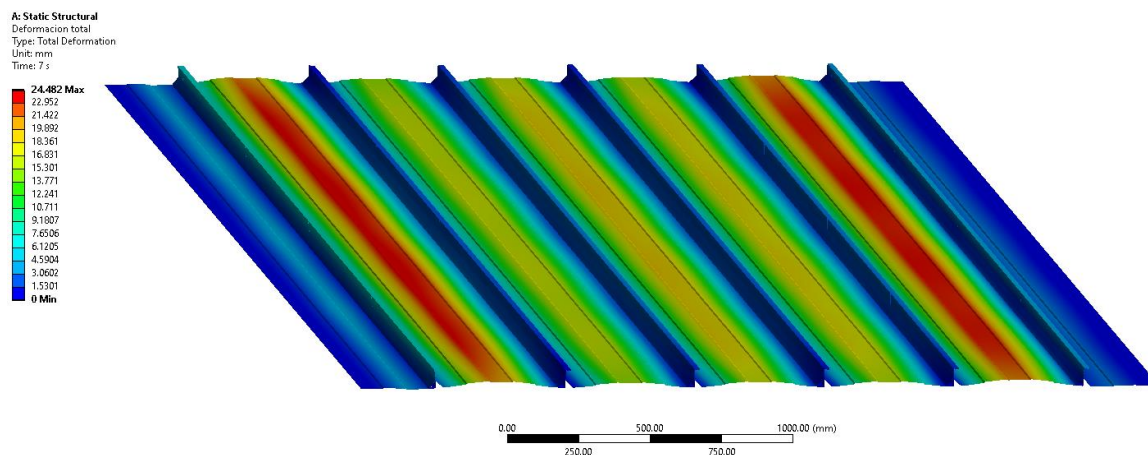
El modelo 2 basa su geometría y su prueba de carga de succión estática en lo estipulado por la norma ASTM E1592.

En etapas de carga temprana, aproximadamente a 800 Pa, se observa que las deformaciones ya son considerables, los paneles metálicos adoptan una configuración deformada de semicírculo y el máximo desplazamiento se observa en el centro del panel y entre dos puntos de apoyo, en este caso, los polines de cubierta.

En la figura 44 se observa como la configuración deformada de los paneles provoca un giro en la zona de conexión entre estos y el clip de sujeción, provocando que el clip libere al panel generando la falla del sistema. Este comportamiento no se presenta en todos los puntos de sujeción debido a que en algunos de ellos, el giro producido es en dirección opuesta, es decir, hacia el interior del clip, produciéndose un mejor cierre en la conexión.

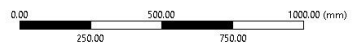
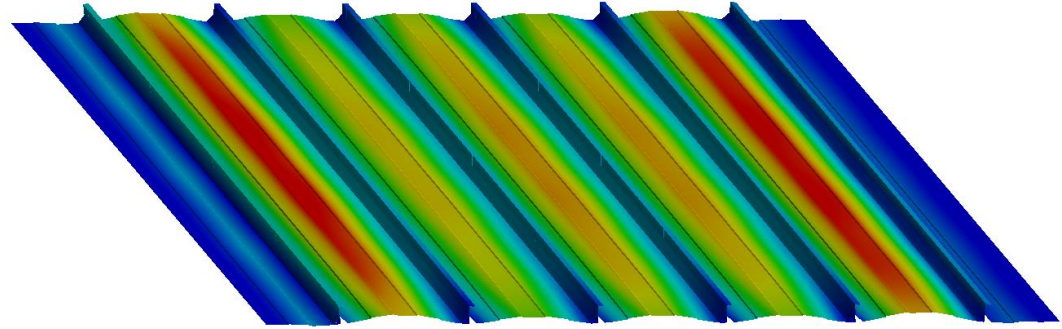
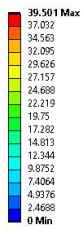
Las deformaciones en los paneles metálicos son considerables, pero el mayor impacto en el comportamiento de la cubierta y que define si el sistema ha fallado es la deformación en la zona de conexión entre clip y paneles que se observan como las costillas del sistema.

Debido a que los paneles de borde son más susceptibles a los efectos de las condiciones de frontera, solo los clips interiores se consideran para evaluar su comportamiento.



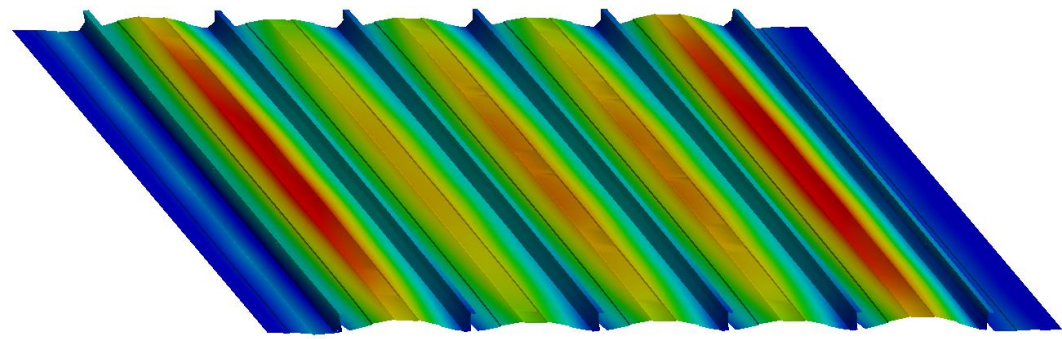
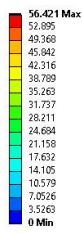
a)

A: Static Structural
Deformación total
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 16 s



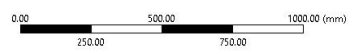
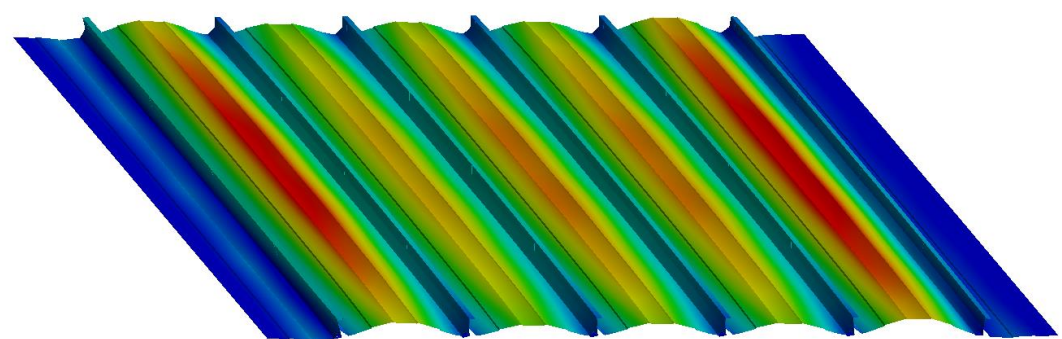
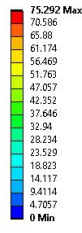
b)

A: Static Structural
Deformación total
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 26 s

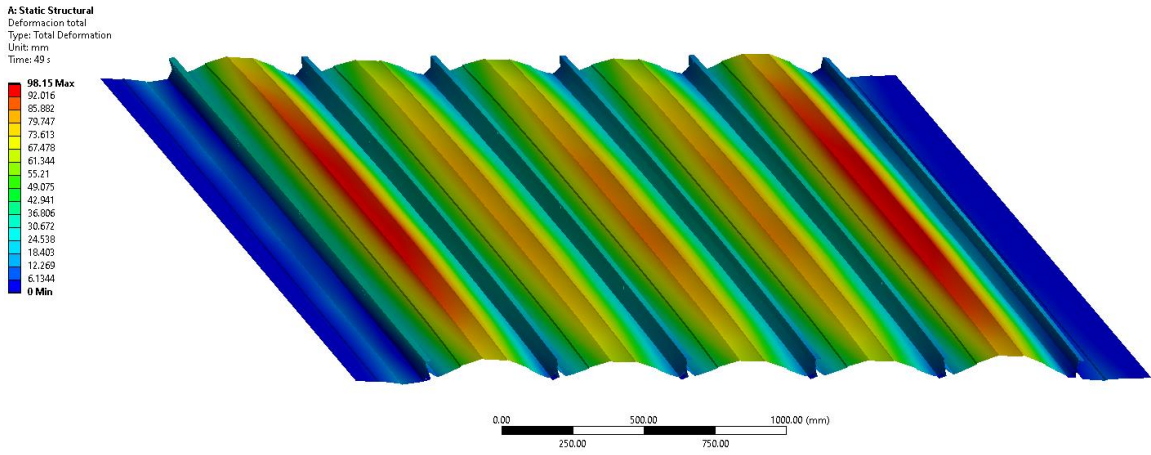


c)

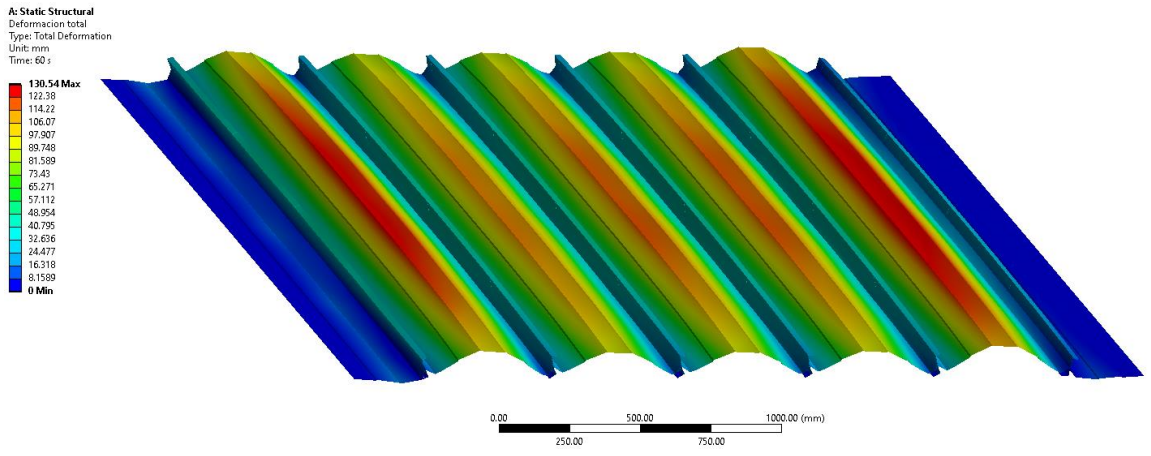
A: Static Structural
Deformación total
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 37 s



d)



e)



f)

Figura 44 - Deformación total del sistema: (a) Deformación bajo succión de 800 Pa.; (b) Deformación bajo succión de 1200 Pa.; (c) Deformación bajo succión de 1600 Pa.; (d) Deformación bajo succión de 1600 Pa.; (e) Deformación bajo succión de 2400 Pa.; (f) Deformación bajo succión de 2800 Pa.

Las deformaciones presentadas por los paneles adoptan una configuración geométrica de semicírculo. Esta deformación genera fuerzas horizontales en la parte superior del clip lo que lleva a producirse una rotación en el mismo. Bajo algunos valores de carga de succión se observa que el ángulo de rotación alcanza un grado significativo por el cual el panel de lado izquierdo de la conexión se libera de la misma.

En la *figura 45* se muestra una sección transversal la cual pasa a través del clip #13 hasta el clip #18. Se observa en la *figura 45* que las deformaciones de los paneles centrales son aproximadamente simétricas, mientras que los paneles laterales tienen deformaciones mayores, lo que confirma lo identificado anteriormente sobre el mayor impacto de las condiciones de frontera en esa zona. Esta configuración deformada conlleva a algunos elementos de conexión a girar en sentido contrario a las manecillas del reloj y llegar a un estado donde se considera “abierto”. La deformación presentada en esta figura es la alcanzada para una carga de succión de 2800 Pa.

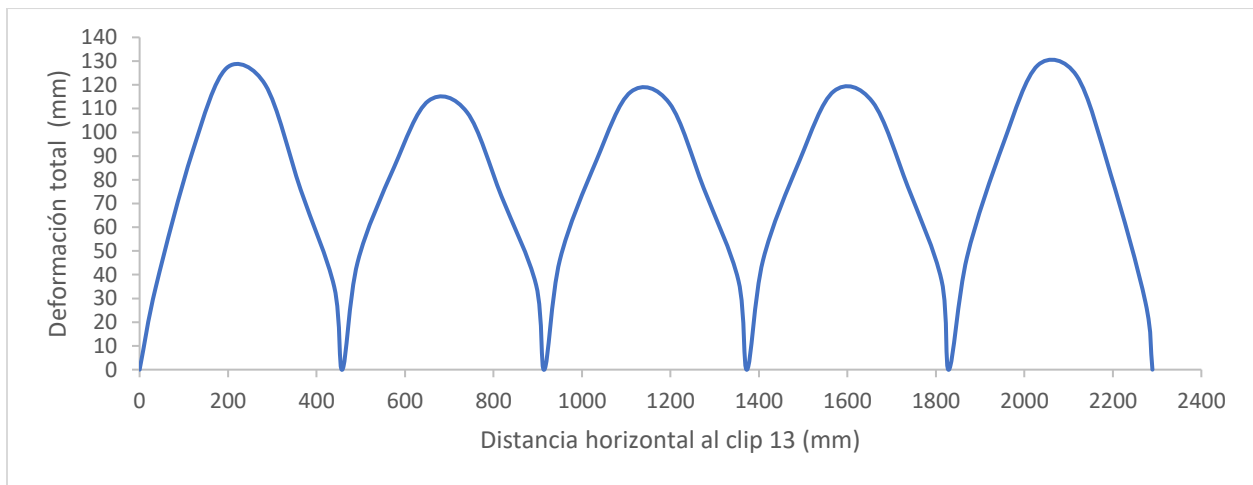


Figura 45 – Deformación sobre el eje X.

Los resultados de las deformaciones totales del sistema obtenidas por medio del método de elementos finitos se presentan en la *figura 46*, la deformación observada se mantiene lineal hasta valores de 1.0 a 1.2 KPa, continuando con una no linealidad que va hasta valores de carga de succión de 2.0 KPa y una tercera línea que terminan con el valor de presión máxima de 2.8 KPa.

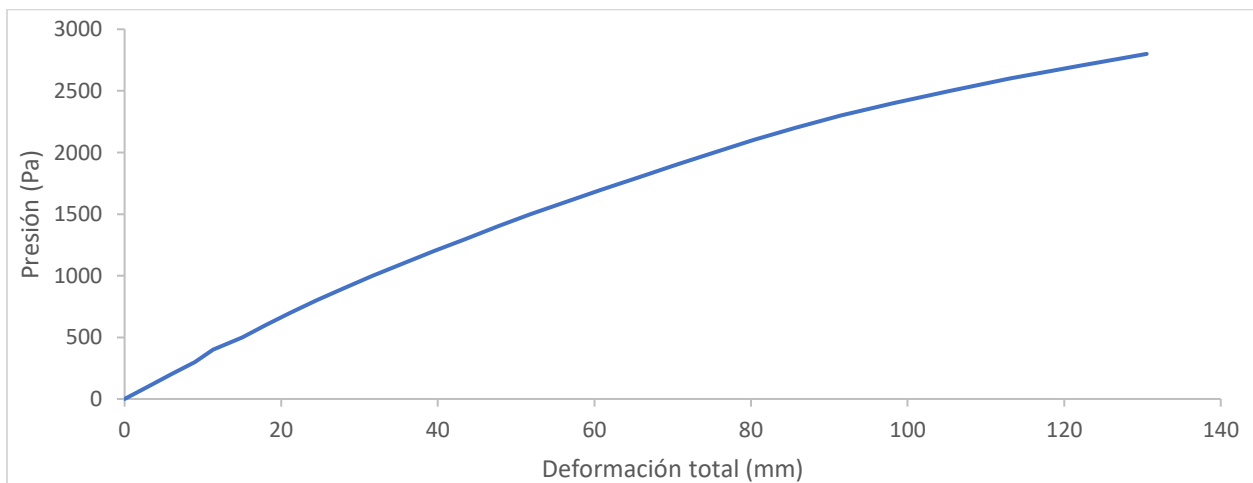


Figura 46 - Presión vs. Deformación total

Las deformaciones obtenidas por investigaciones anteriores en este tipo de cubiertas indican que pueden esperarse grandes deformaciones aun a bajos niveles de carga de succión y estas deformaciones son sensiblemente lineales. Se presentan las deformaciones obtenidas del sistema en la *figura 47* las cuales, comparadas con el análisis realizado en túnel de viento son bastante similares, tomando en cuenta los valores observados hasta una presión de 1.1 kPa. La similitud en los resultados observados indica que el modelo representa adecuadamente las deformaciones esperadas en una prueba real, realizada en una cámara de presión bajo el estándar E1592. Esta comparación se realiza con los valores de obtenidos en la prueba de elementos finitos bajo un análisis estático lineal de esta investigación y los realizados por los investigadores El Damatty et al, 2003, así como la comparación con las pruebas en una cámara de presión realizadas por Sinnu et al, 1995 en MSU (Mississippi State University).

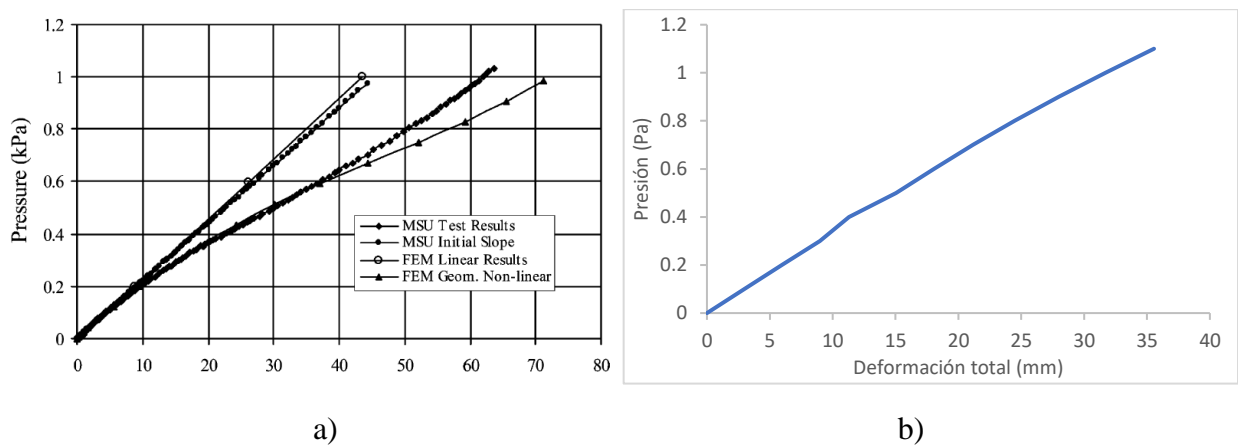


Figura 47 - Comparación de deformaciones: (a) Estudio de El Damatty et al., 2003; (b) Este estudio.

Las deformaciones observadas en los clips de conexión indican que se produce una fuerza en sentido horizontal que provoca un giro en la zona de conexión, este comportamiento era esperado y este giro nos indica la capacidad del sistema. En la *figura 48* se muestran los ángulos de rotación obtenidos en la ceja interior del clip de conexión, este ángulo se midió con respecto a la configuración no deformada del clip en las distintas mesetas de carga o puntos de deformación estipulados en la *sección 3.1.2.2*, esos puntos son:

Punto 0 = 240 Pa

Punto 1 = 800 Pa

Punto 2 = 1200 Pa

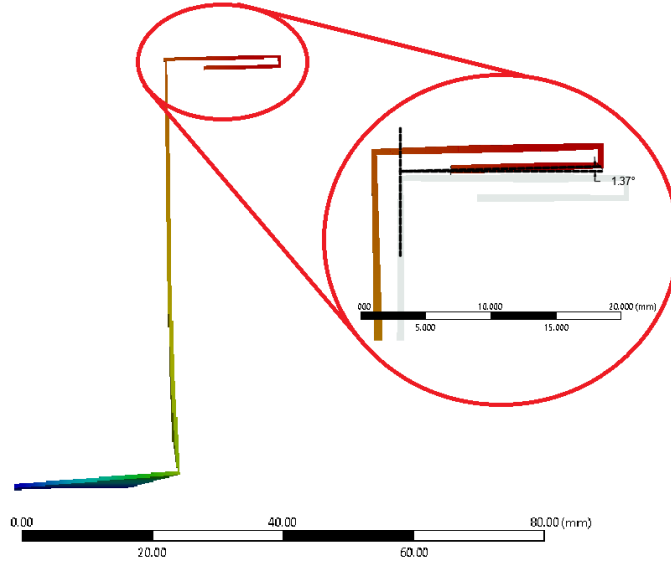
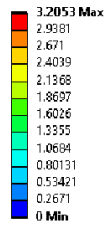
Punto 3 = 1600 Pa

Punto 4 = 2000 Pa

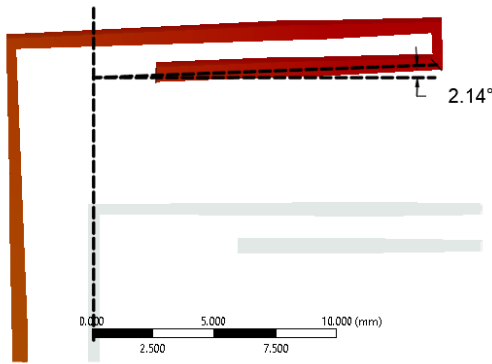
Punto 5 = 2400 Pa

Punto 6 = 2800 Pa

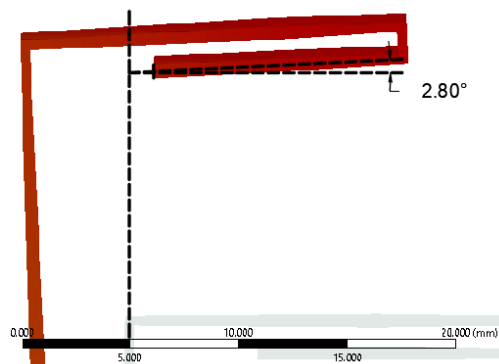
A: Static Structural
 Deformacion Clip 1
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 7 s



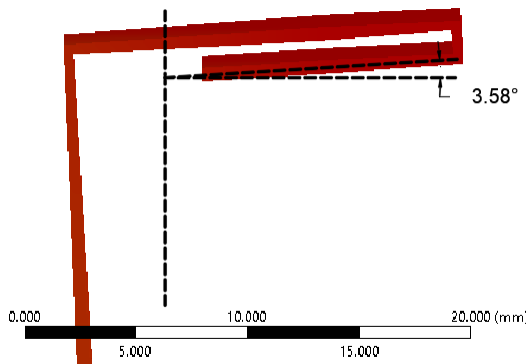
a)



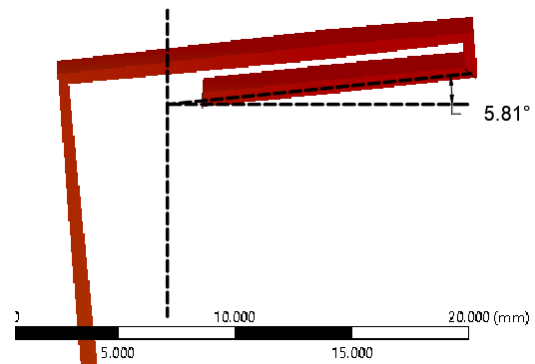
b)



c)



d)



e)

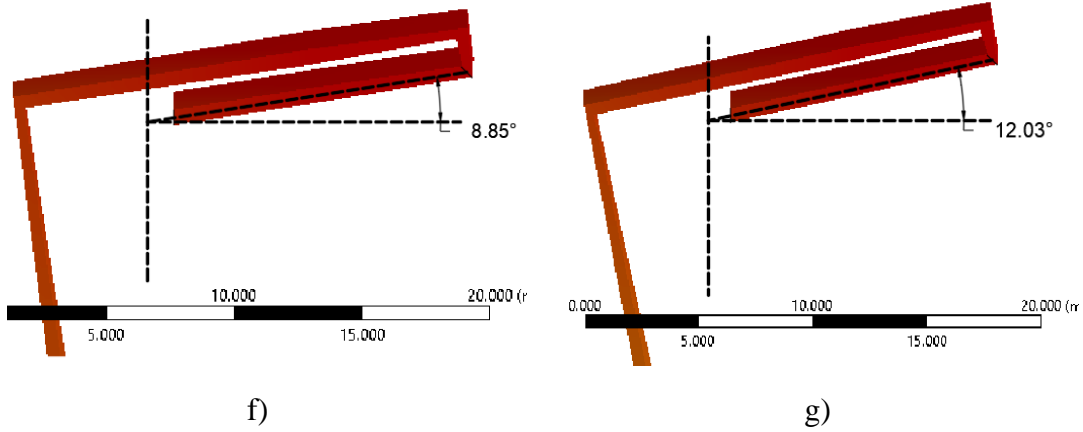
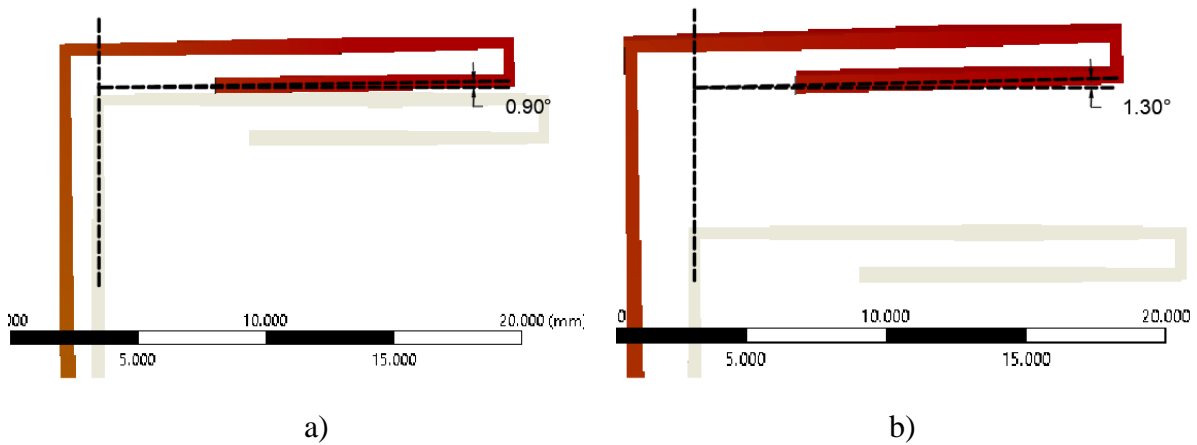
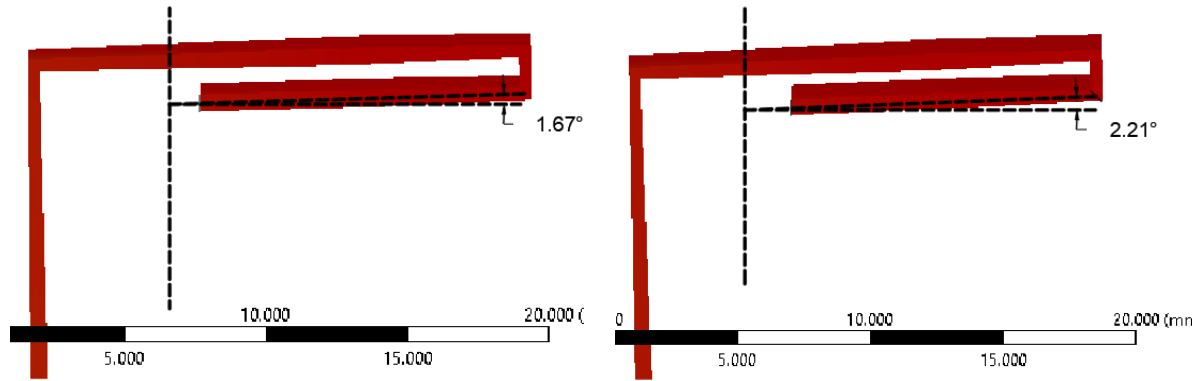


Figura 48 - Rotaciones en conexión clip 9; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.

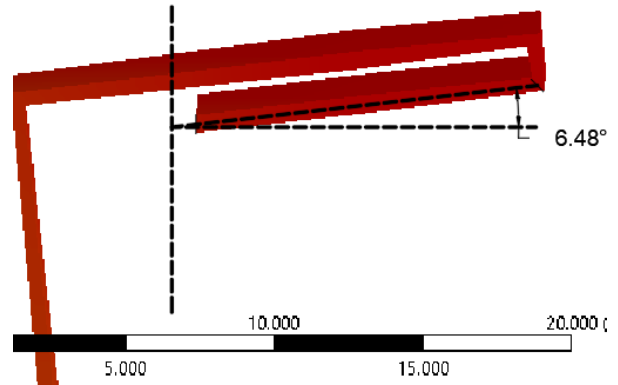
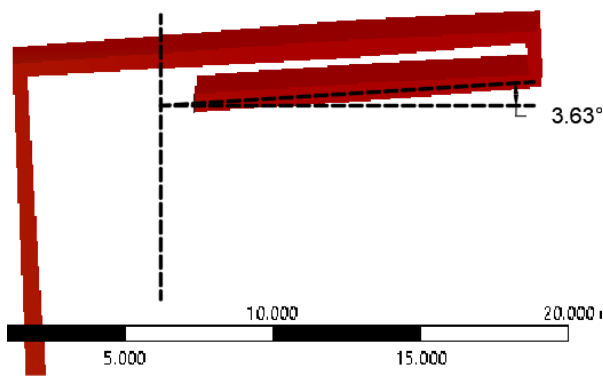
En la *figura 48* se presentan los ángulos de giro en la ceja interior del clip de conexión. Se encontró que para que se produzca un ángulo de rotación de 7.6° necesarios para considerar el clip “abierto”, la presión debe situarse en valores aproximados de 2.4 a 2.8 kPa, como una revisión más exhaustiva se anexo la rotación obtenida para una presión de 2.6 kPa, donde se observa que en el clip #9 que la rotación alcanza el ángulo de 8.85° , sin embargo, analizando la rotación para una presión de 2.5 kPa, el ángulo obtenido es de apenas 6.7° , por lo que la rotación de 7.6° se alcanzó en un punto entre 2.5 a 2.6 kPa, por lo tanto, para este clip se establece como su presión máxima en el valor menor donde se observa este ángulo que en este caso se establece en 2.5 kPa de carga de succión.





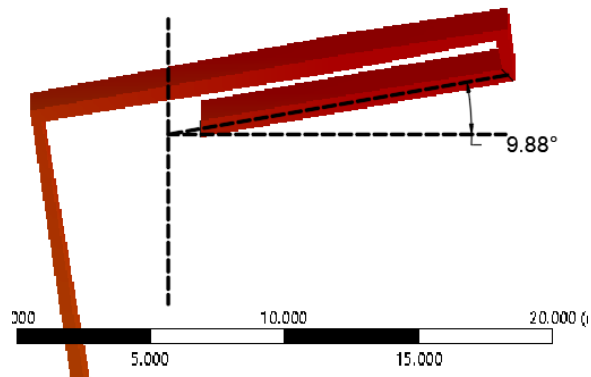
c)

d)



e)

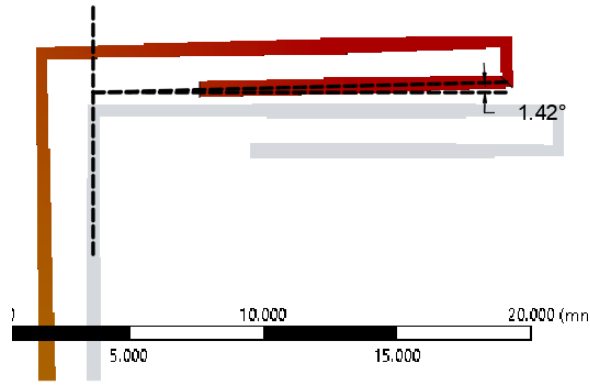
f)



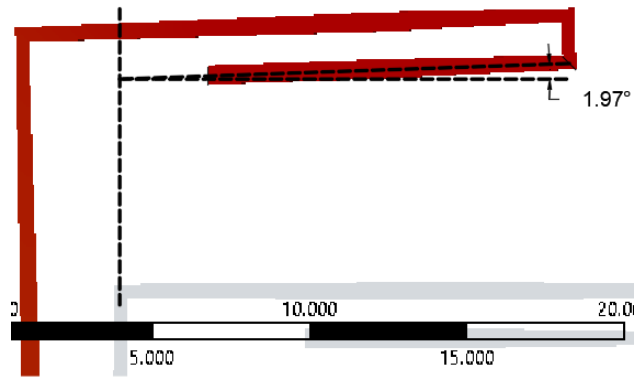
g)

Figura 49 - Rotaciones en conexión clip 10; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.

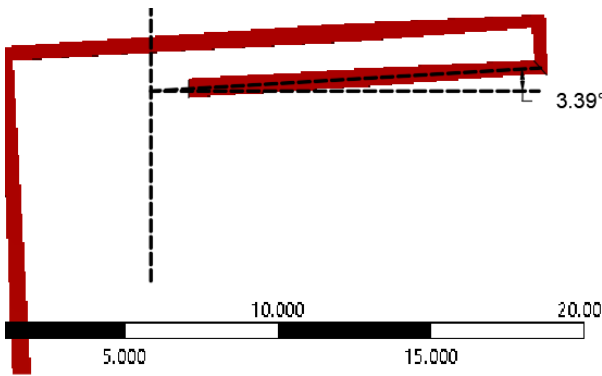
En el caso del clip #10, el ángulo de rotación necesario para considerar el clip “abierto” se alcanza hasta una carga de succión situada en 2.7 kPa, este valor es mayor a la encontrado en el clip anterior, debido a que la configuración deformada de los paneles varía a lo largo de la línea horizontal, por lo que se producen distintos valores de fuerza entre paneles. Las figuras siguientes muestra los ángulos de rotación obtenidos para los clips de sujeción 15, 16, 21 y 22.



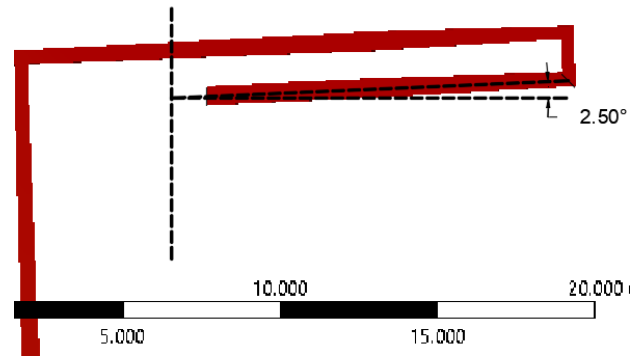
a)



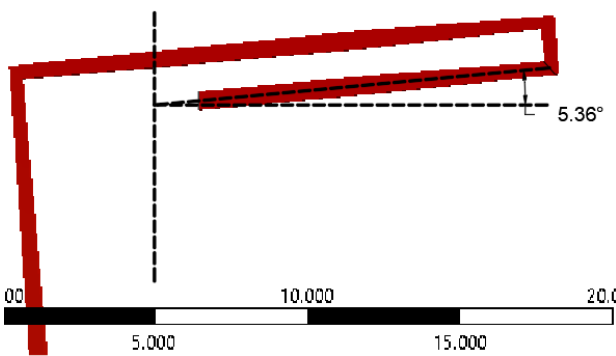
b)



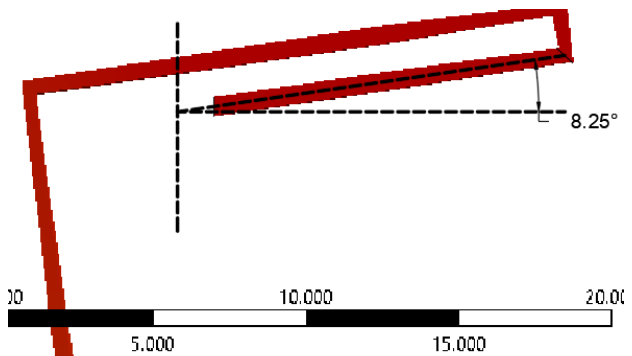
c)



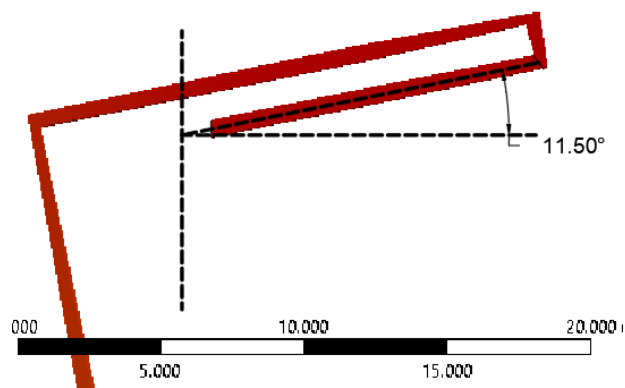
d)



e)

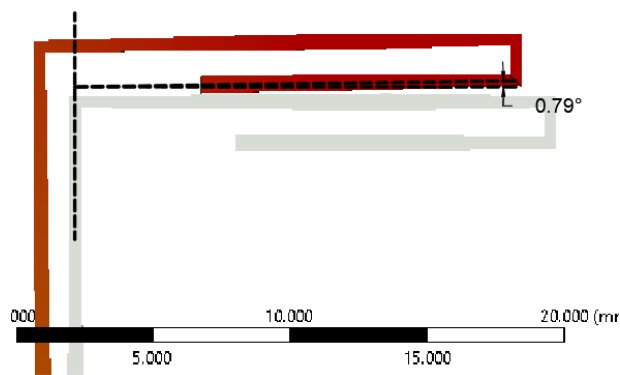


f)

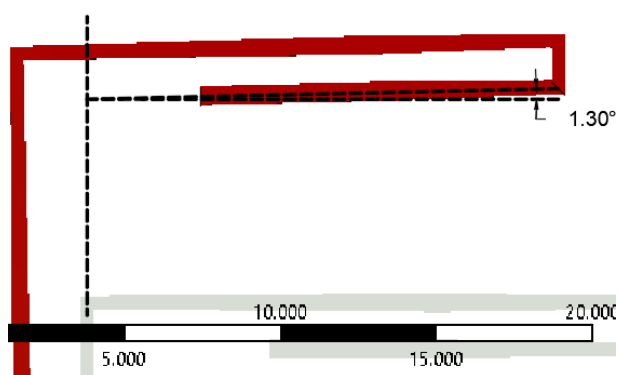


g)

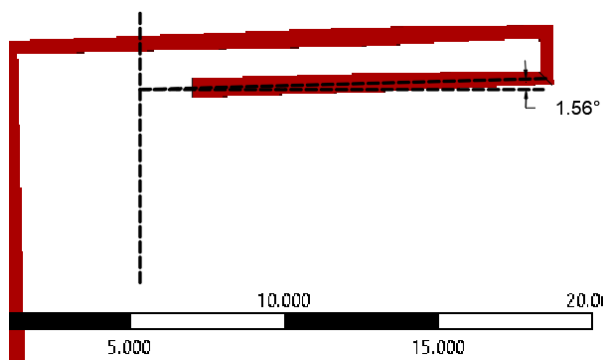
Figura 50 – Rotaciones en conexión clip 15; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.



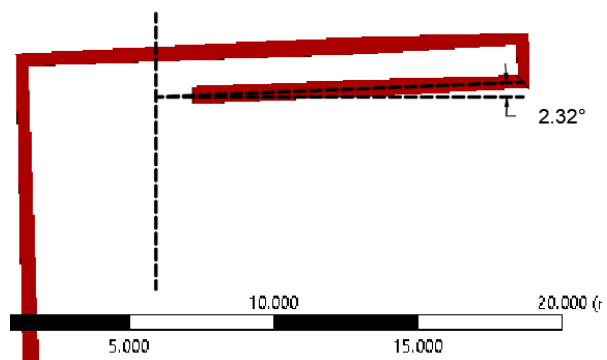
a)



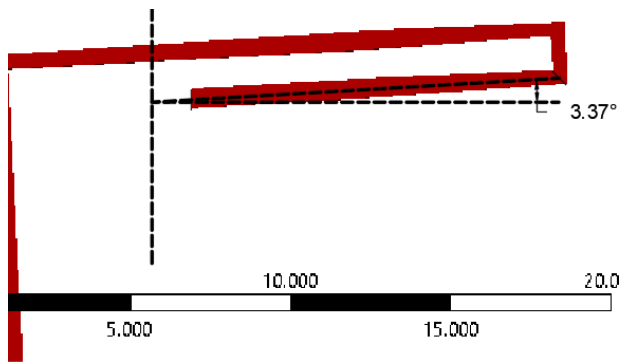
b)



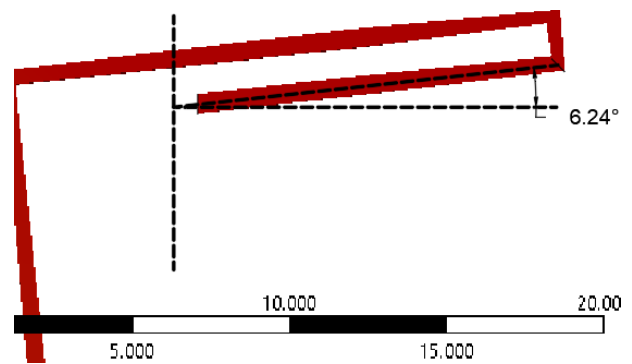
c)



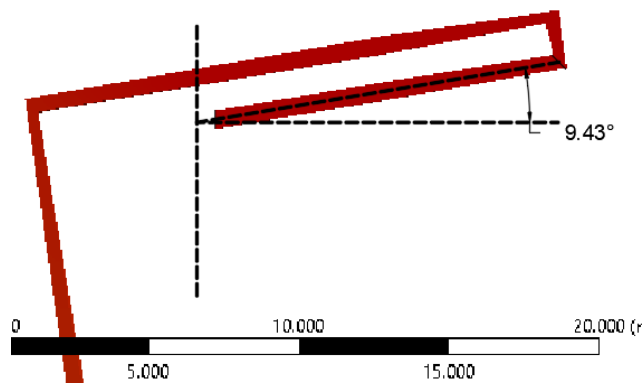
d)



e)

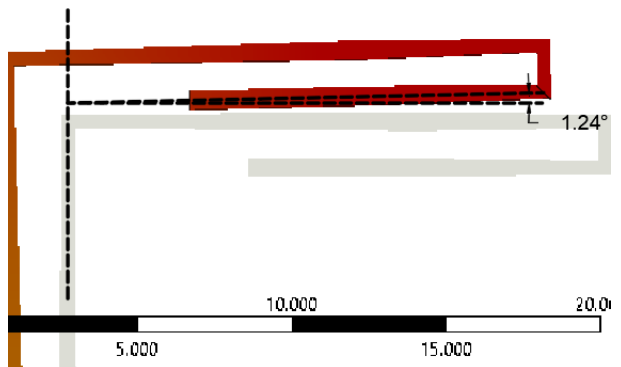


f)

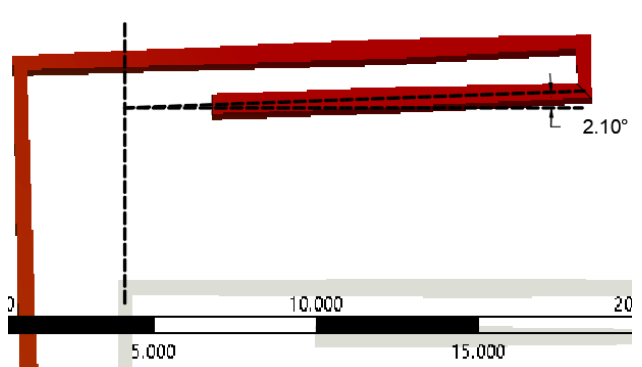


g)

Figura 51 - Rotaciones en conexión clip 16; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.



a)



b)

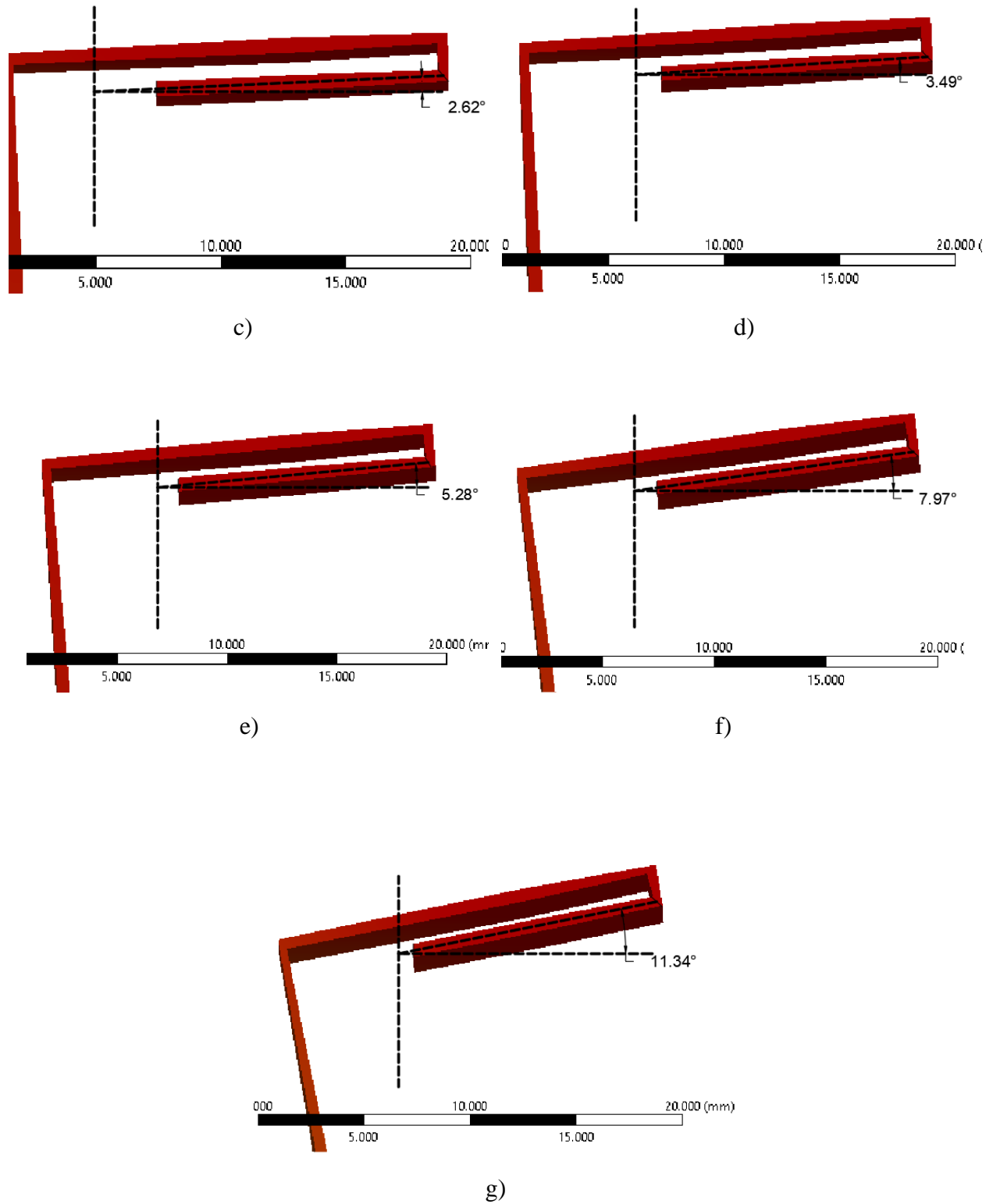
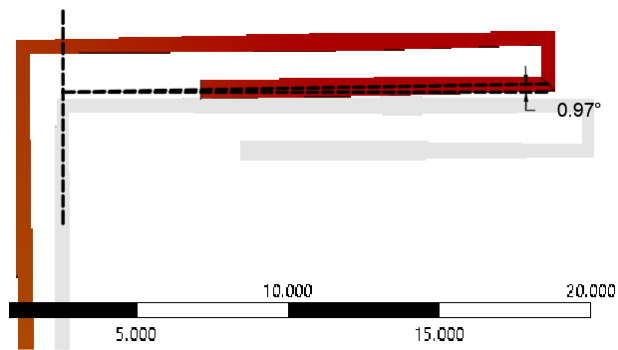
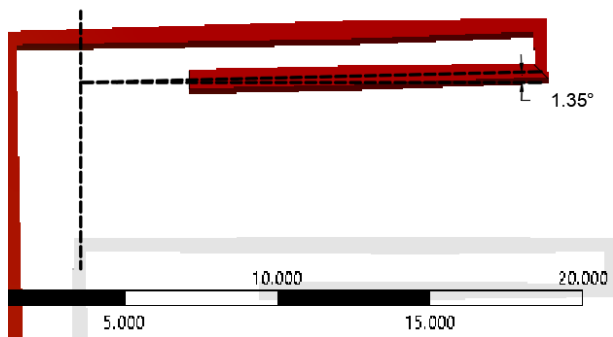


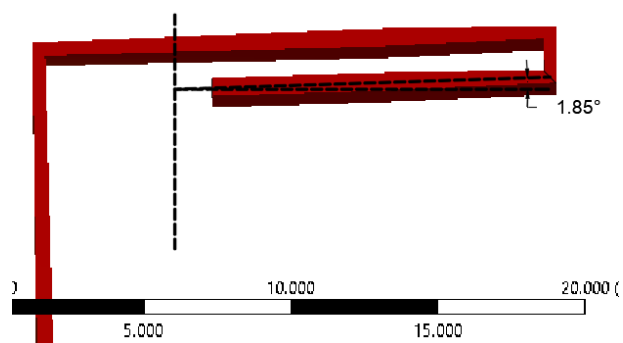
Figura 52 – Rotaciones en conexión clip 21; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.



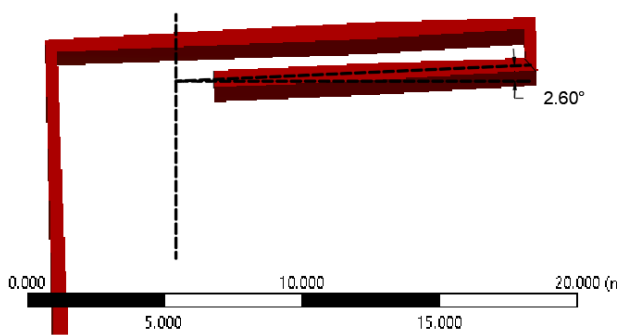
a)



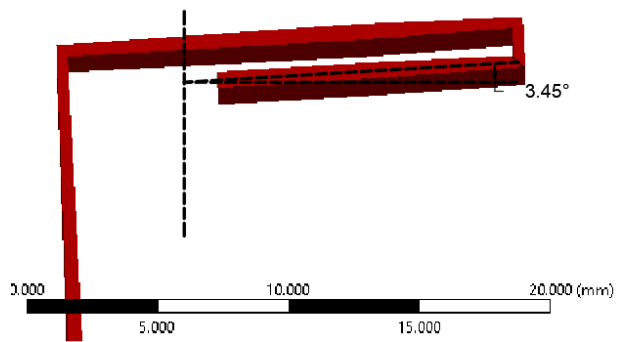
c)



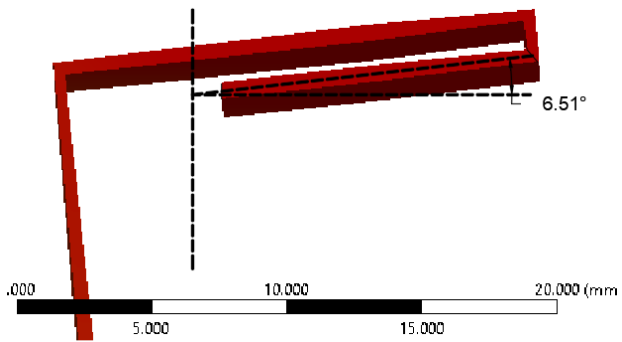
c)



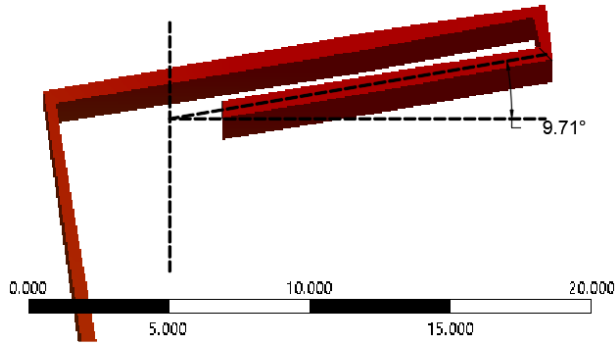
d)



e)



f)



g)

Figura 53 - Rotaciones en conexión clip 22; (a) Punto 0; (b) Punto 1; (c) Punto 2, (d) Punto 3; (e) Punto 4; (f) Punto 5; (g) Punto 6.

Se encontró que la fuerza de succión necesaria para tener un ángulo de rotación de 7.6° en los clips de sujeción es de aproximadamente 2.5 kPa (figura 54). Esta fuerza se presenta en los clips 9, 15 y 21 (figura 54), mas no en los clips 10, 16 y 22 (figura 55); sin embargo, solo es necesario la liberación de un clip para que se puedan presentar problemas en la estructura como son, penetración de agua y viento, lo que podrían causar serios problemas a la estructura misma o a sus contenidos.

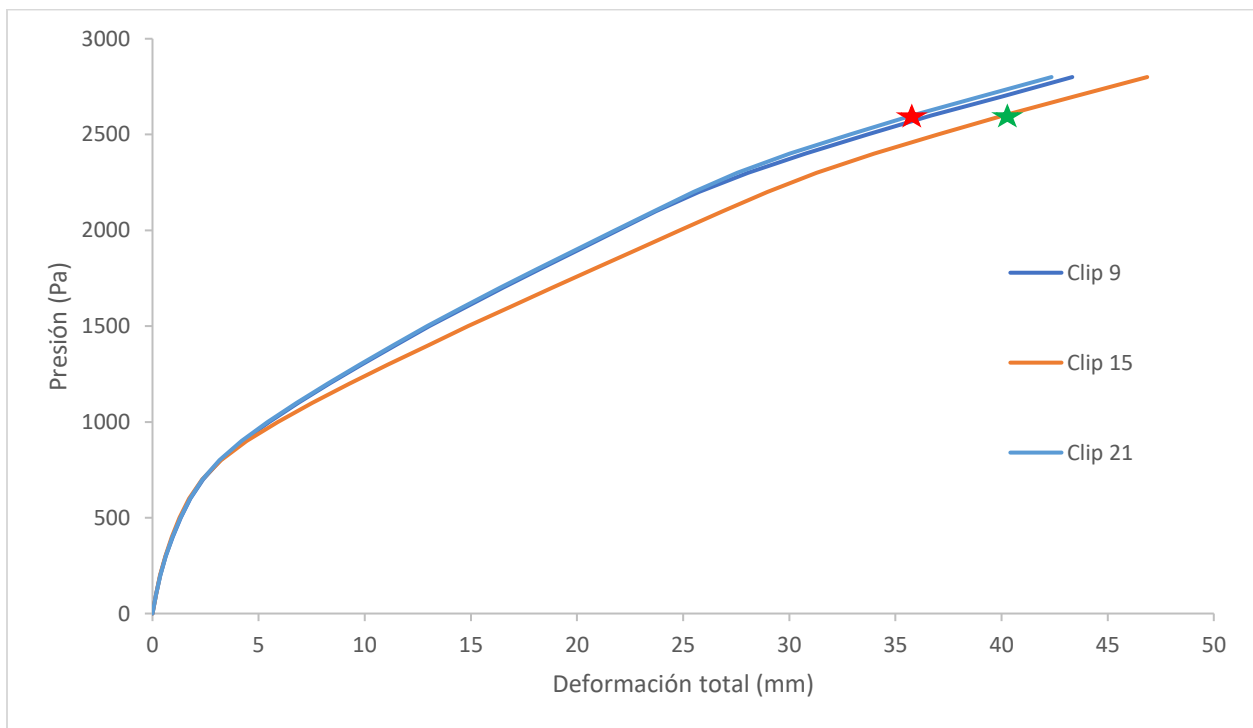


Figura 54 - Presión vs deformación total del clip 9,15 y 21. Punto de falla indicado por figura de estrella.

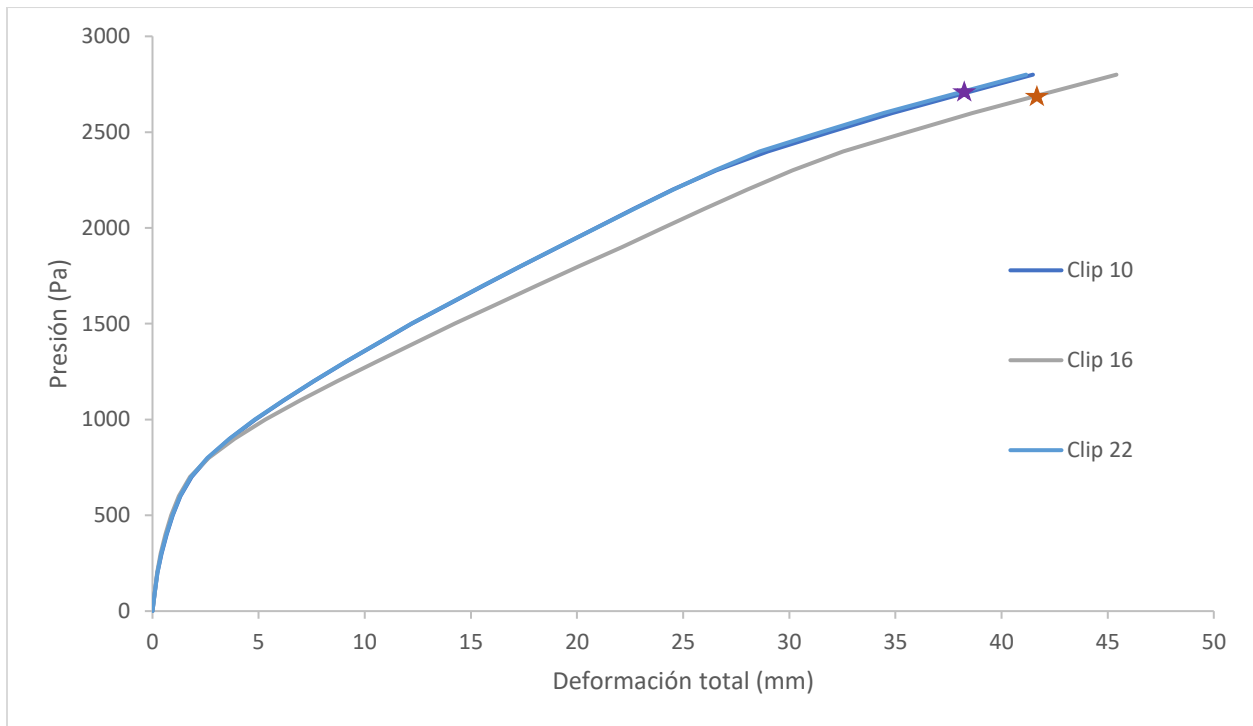


Figura 55 - Presión vs deformación total del clip 10, 16 y 22. Punto de falla indicado por figura de estrella.

4.1.2. *Distribución de Presiones y velocidades.*

Como se explicó en el capítulo 3, la finalidad de este modelo es entender la distribución de las presiones en la cubierta metálica de una nave industrial, así como otros efectos del viento en la edificación.

Como primer punto, se analiza la velocidad del flujo observadas en el modelo, en la *figura 56* se observan las líneas de corriente del modelo con pendiente de cubierta del 5%, un ángulo de incidencia de 0° y una velocidad de flujo de entrada de 60 m/s, esta velocidad es establecida como la máxima para estudio ya que se encuentra asociada con un huracana categoría 4 y como se indica en el apartado 2.1.6, esta es la categoría más común en cuanto a huracanes que se ha registrado en la zona del pacifico.

Se observa una separación del flujo en algunas zonas de la cubierta y los muros laterales debido a que la energía cinética del fluido en la región inferior del mismo no es suficiente para superar las presiones que aumentan en la dirección del fluido, esto conlleva a que se produzcan gradientes de presión adversos, Simiu et al., (2019).

El flujo en la porción de cubierta y de muros laterales más cercanos al muro de barlovento se invierte, generando vórtices de flujo. Estos vórtices son los responsables de generar las altas fuerzas de succión cerca de los puntos de separación que comúnmente son las esquinas o los aleros, los mismos generan un aumento en la velocidad del flujo en la región superior del mismo y cercano al muro de barlovento, generándose un aumento de esta en un 50%.

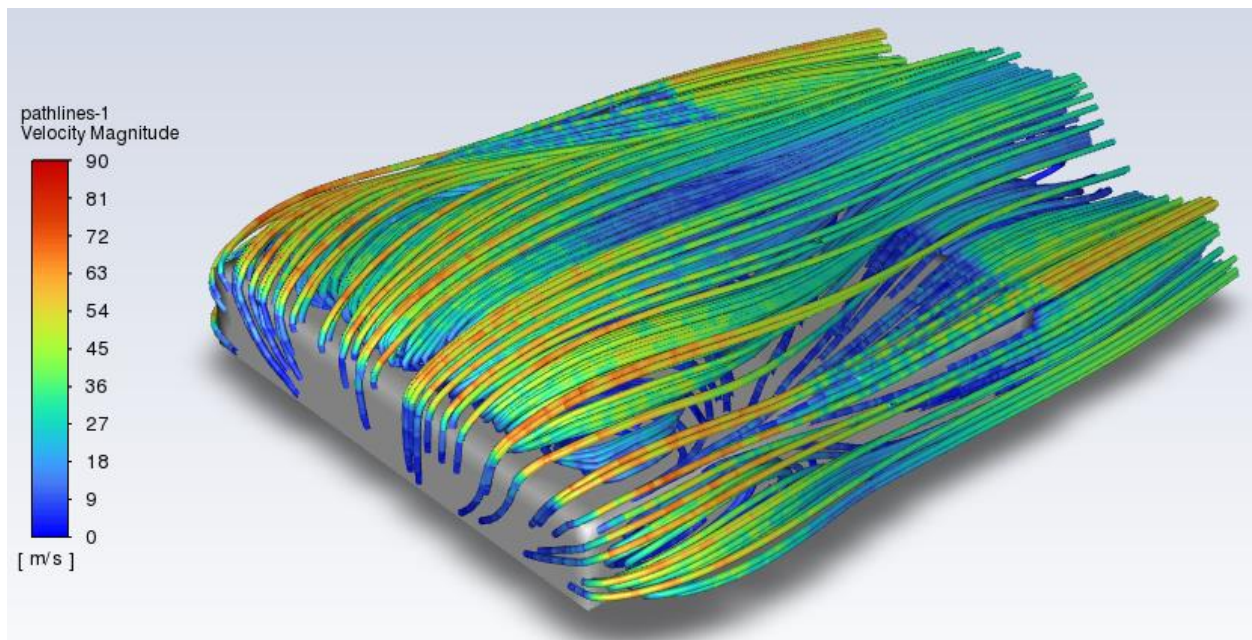


Figura 56 - Líneas de corriente para cubierta con 5% de pendiente

En la *figura 57* se presentan los resultados de las velocidades máximas alcanzadas por el flujo al impactar con la edificación, los valores presentados corresponden a una velocidad de entrada de flujo de 60 m/s y una pendiente de cubierta de 5%. Se observa que las velocidades máximas varían con respecto al ángulo de incidencia del viento y esta velocidad máxima se presenta para un ángulo de incidencia de 70° con respecto a una dirección normal a la cumbrera. Los intervalos de aumento van desde un 43% hasta un 62%, esta última asociada a una velocidad de 97.3 m/s.

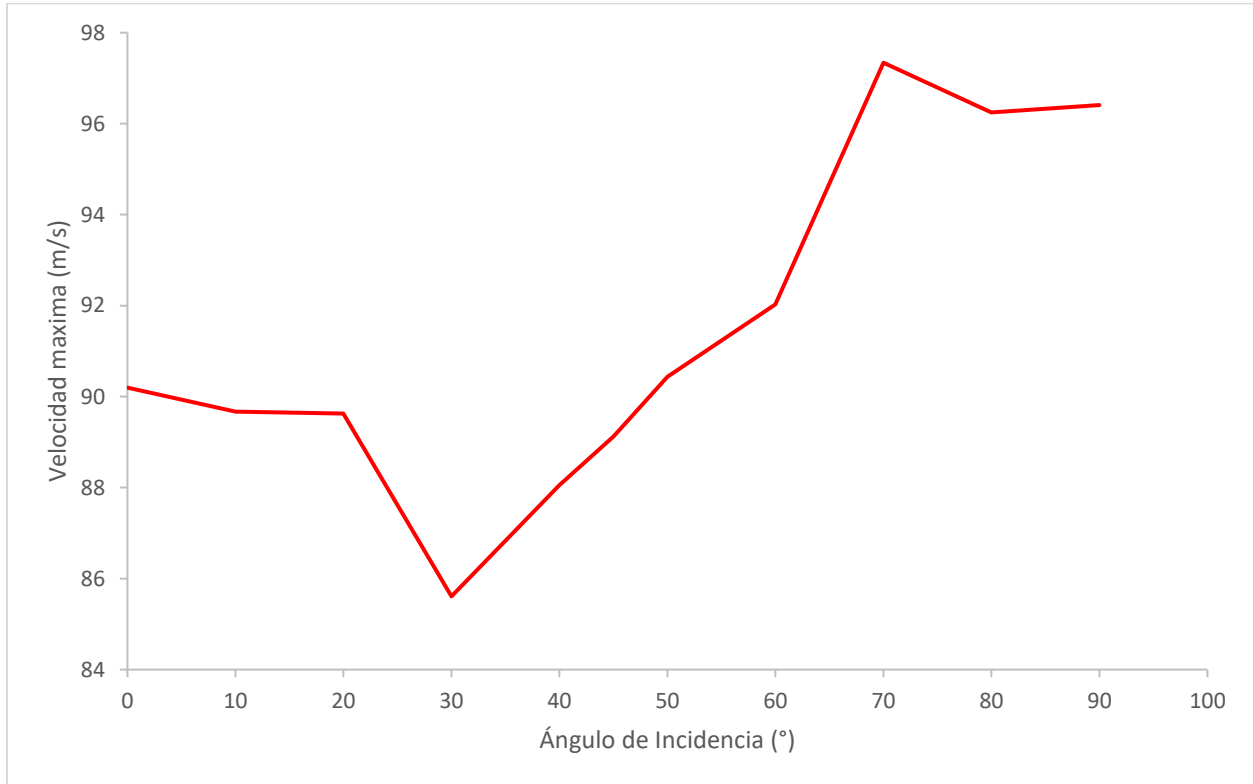


Figura 57 - Velocidad máxima alcanzada por el fluido

En la *figura 58* se comparan los resultados de las velocidades máximas alcanzadas por el flujo cuando este entra en contacto con la edificación con una velocidad de entrada de 60 m/s. los valores observados para pendientes de cubierta de 5% y 7% son bastante similares en cuanto a velocidades máximas y mínimas. Los valores obtenidos para una cubierta con pendiente de 3% son bastante menores. Las menores velocidades se obtienen en ángulos oblicuos entre 30° y 50°.

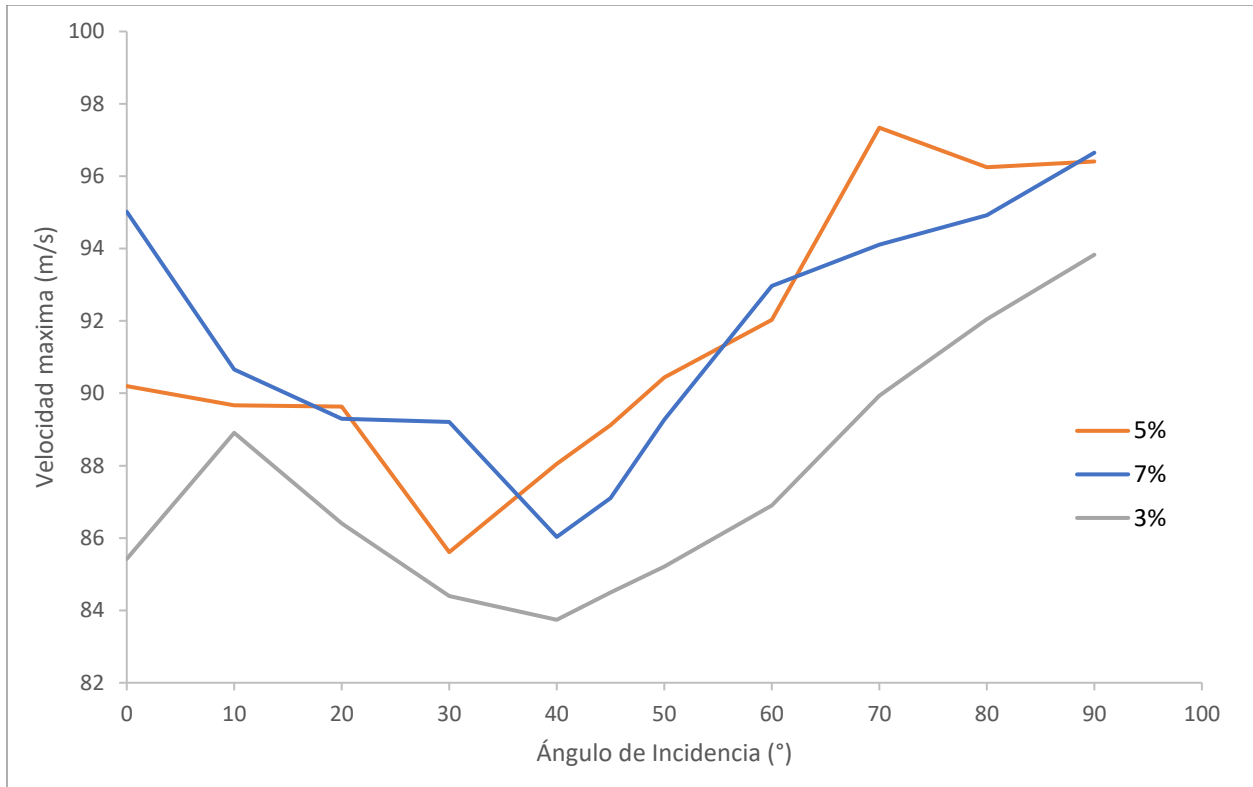


Figura 58 - Comparación de velocidades máximas

Enseguida se presentan las velocidades obtenidas para el modelo de nave industrial tomando en cuenta el efecto edificaciones colindantes (*figura 59*). Se presentan los casos I, II y III, los cuales se mencionaron anteriormente en el capítulo 3.1.3 y su geometría en la tabla 5 con un ángulo de incidencia del viento de 70°. Los resultados son los esperados, pues los edificios colindantes generan un efecto de protección en la edificación principal, que se demuestra con la disminución de los valores de velocidades y presiones máximas en cubierta. Aunque no es tan común, puede presentarse un efecto de incremento de fuerzas de succión, esto debido a la canalización del flujo y a los vórtices desprendidos generados en edificios poco espaciados Gavansky et al., (2013).

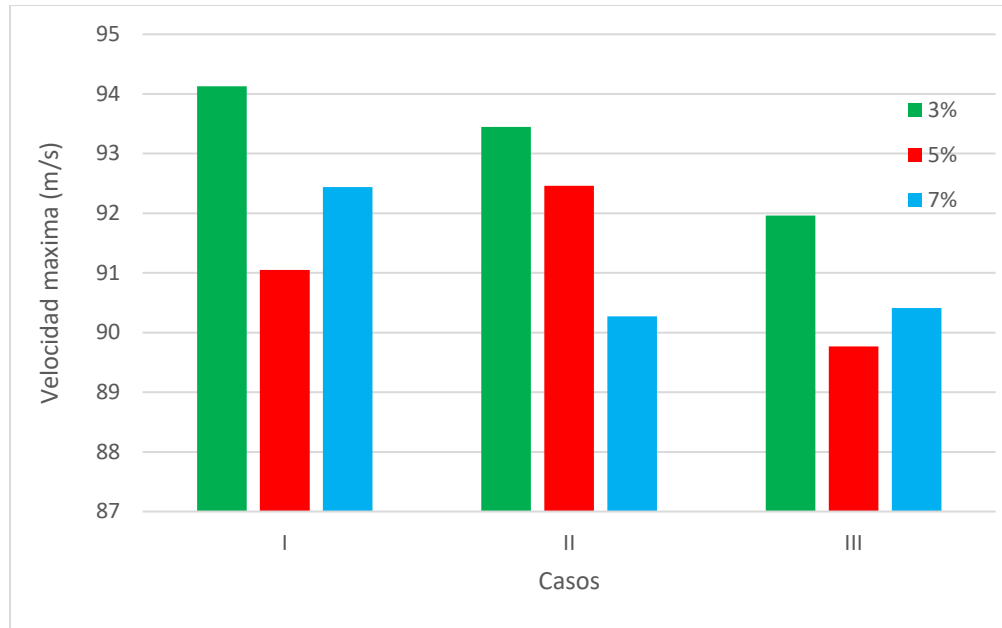


Figura 59 - Comparación de velocidades máximas

Se analiza las presiones de cubierta obtenidas en los diferentes modelos, en la *figura 60* se observan las presiones en la nave con pendiente de cubierta del 5%, una velocidad de flujo de entrada de 60 m/s y un ángulo de incidencia de 0°. Los valores de succión máximos se observan en los bordes de la cubierta de barlovento (donde golpea el viento) y los muros laterales, esto debido a que en esta zona se presentan vórtices de flujo observados en la *figura 56*.

Para las direcciones del viento que son normales a la cumbrera de la nave, los vórtices se presentan en zona inmediata de la cubierta y los muros laterales, en cambio; cuando el ángulo de incidencia del viento se presenta en un ángulo oblicuo, los vórtices se generan en las esquinas más alejadas de este punto; además, los valores de succión observados bajo ángulos oblicuos son más uniformes en la extensión del área de cubierta.

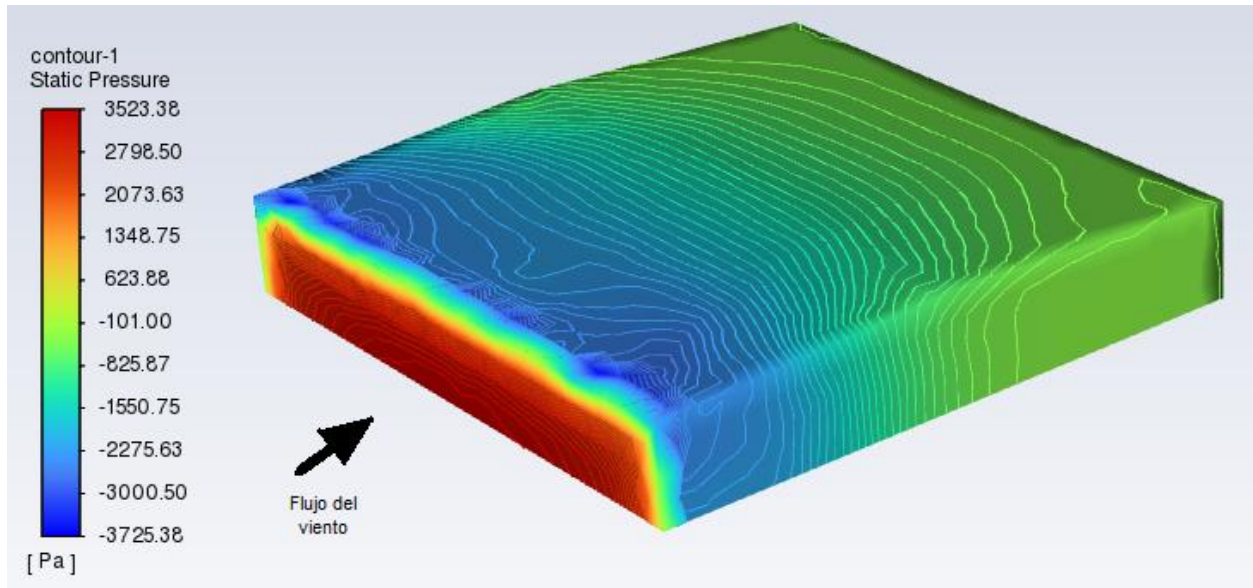


Figura 60 - Presiones en cubierta

En la *figura 61* observamos que para los ángulos de 40° , 45° y 50° las fuerzas de succión (color azul) se presentan en dos bordes de la cubierta y en dos muros laterales, mientras que para los otros ángulos de incidencia solo se presenta en un borde de la cubierta. Lo que se concluye es que, aunque estos ángulos corresponden a los que presentan menores valores de fuerzas de succión, la distribución de estas es más uniforme, por lo que afectan un área mayor, pudiendo ser de mayor impacto para el sistema de cubierta que los ángulos de incidencia que presentan mayores cargas, pero en una zana más pequeña.

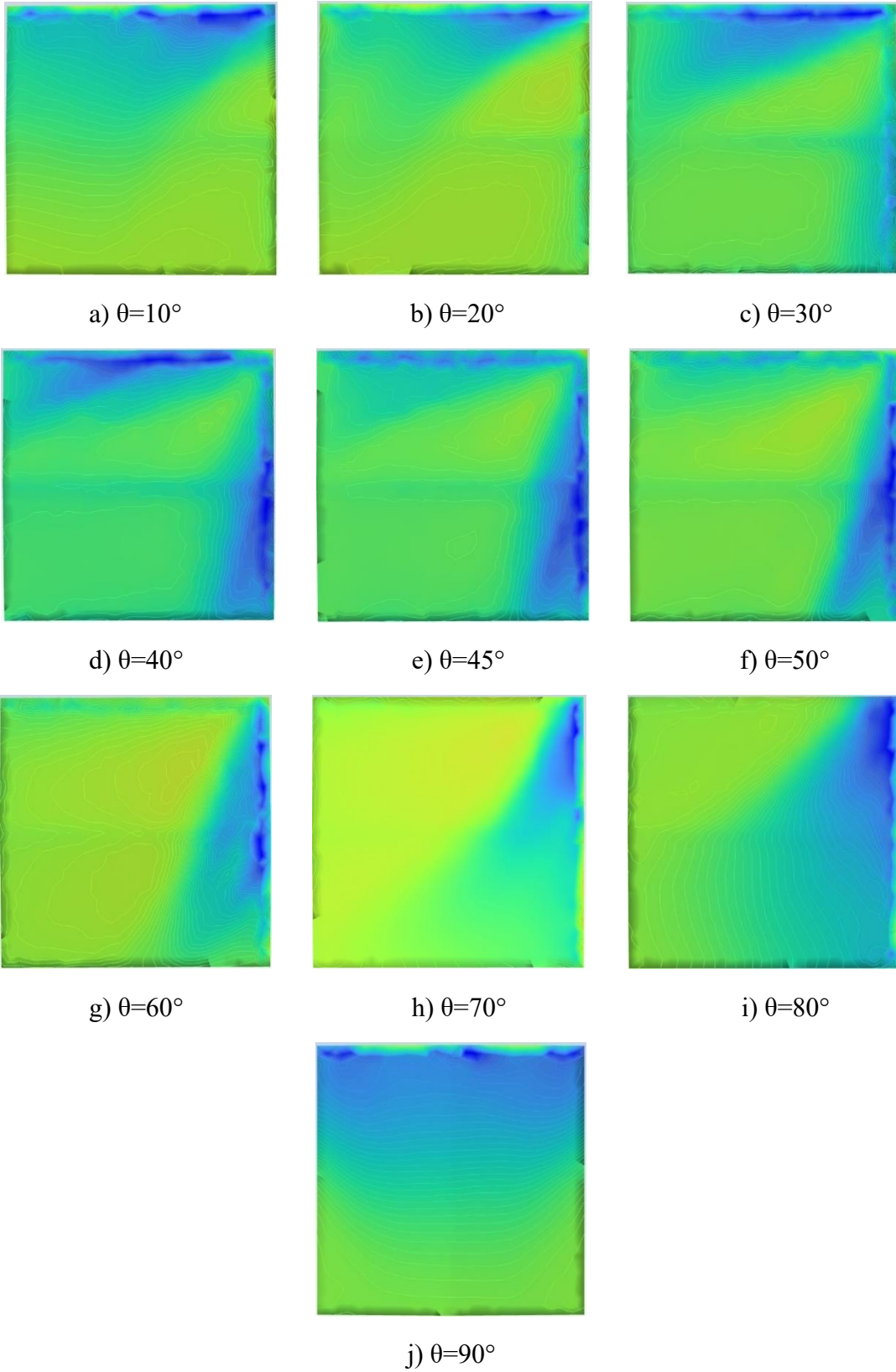


Figura 61 - presiones a distintos ángulos de ataque

De las *figuras 62, 63 y 64* se puede resumir que las mayores presiones se presentan para un ángulo de 70° con dirección normal a la cumbrera, seguido de las presiones presentadas por un ángulo de incidencia de 20° igualmente con respecto a la dirección normal a la cumbrera. Las presiones menores se presentan para ángulos oblicuos de 30° - 50° aunque estas se presentan en una distribución más uniforme en al área total de la cubierta, también se observa que las presiones para velocidades de viento menores a 30 m/s que corresponde a una velocidad asociadas a vientos en tormentas tropicales (17.5 – 32.78 m/s) son sensiblemente uniformes. Los resultados son similares a los obtenidos en laboratorio de túnel de viento por Goliber (2009).

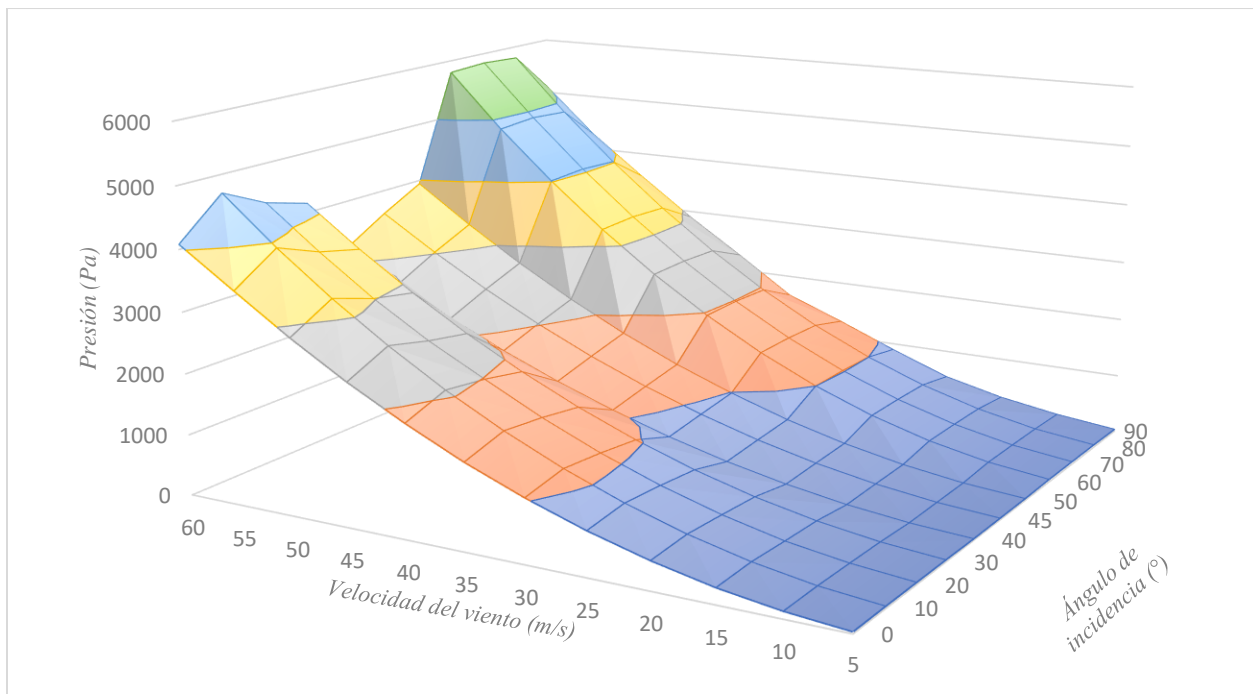


Figura 62 - Presiones de cubierta de 3%

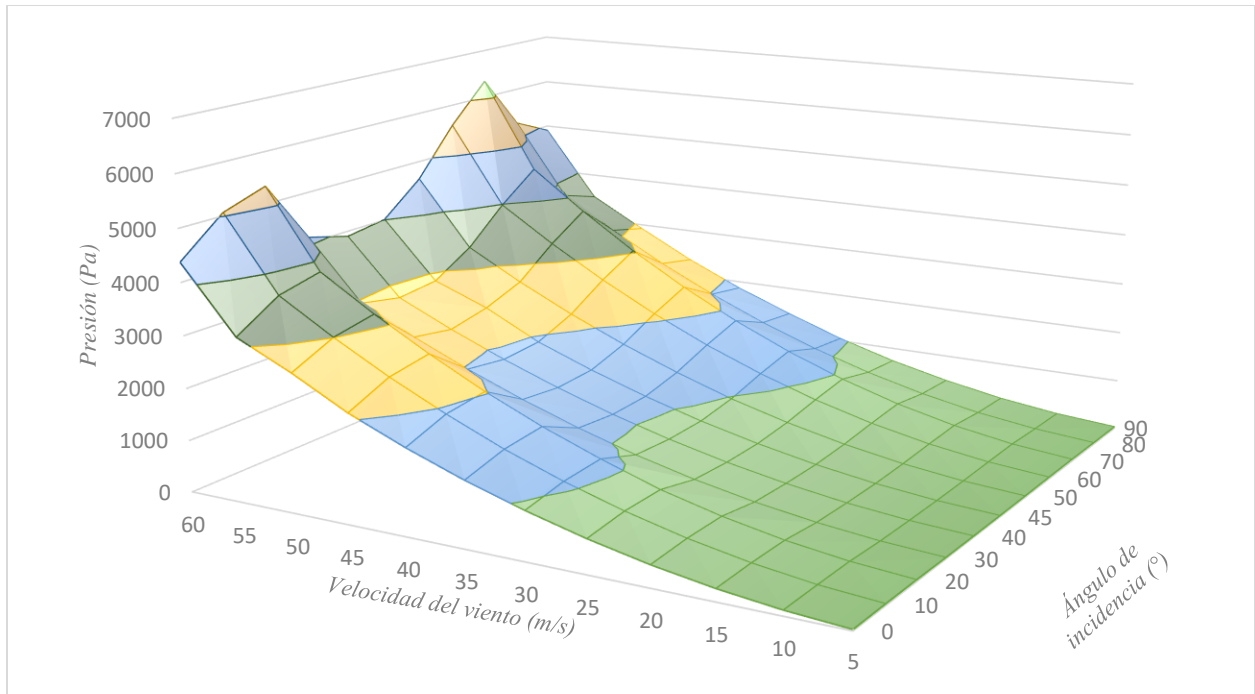


Figura 63 - Presiones de cubierta de 5%

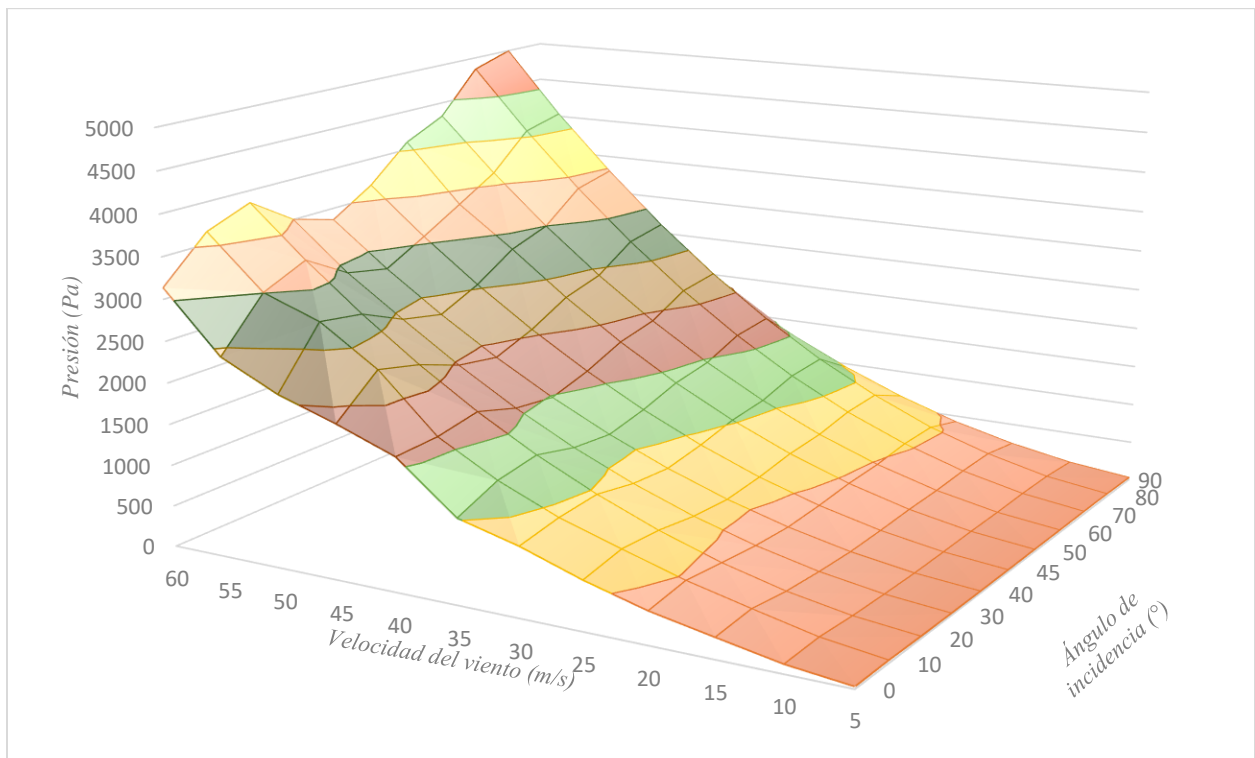


Figura 64 - Presiones de cubierta de 7%

4.2. *Análisis de costos*

Debido a que las construcciones industriales son en su gran mayoría estructuras con un área de construcción bastante considerable, los contenidos de esta pueden igualar e incluso superar el costo de la estructura. Por ejemplo, una edificación cuya finalidad es la manufactura de productos electrónicos, donde es necesaria la instalación de maquinaria sensible y costosa, otro ejemplo serían las edificaciones destinadas a funcionar como almacén para fertilizante agrícola, donde debido a las grandes dimensiones de la estructura, el volumen de material guarecido es considerable y su pérdida puede ocasionar un gran impacto económico.

Con la finalidad de tomar en cuenta el aspecto del impacto económico derivado de la falla de los elementos de cubierta se realiza un análisis de costos basado en curvas de daño esperado debido a la fuerza de succión en cubierta, así como curvas basadas en funciones de pérdida para convertir daños en ciertos elementos a pérdidas económicas.

Los métodos para predecir daños en construcciones sometidas a acciones externas como es el viento pueden ser cualitativos o cuantitativos. Las predicciones de daño cualitativas describen niveles de daño probable asociados a diferentes categorías de edificios o intensidades de viento. La escala Saffir-Simpson es una aproximación usando un enfoque cualitativo.

Los métodos cuantitativos consideran características de la estructura que son esenciales para la predicción confiable de daños. Ejemplo de esto son los métodos basados en matrices de daño, que correlacionan velocidades de viento con daño presentado.

Unanwa et al., (2000) Desarrollaron el concepto de bandas de daño, aplicándolo a edificaciones industriales, residenciales, comerciales e institucionales. El desarrollo de bandas de daño se obtuvo a partir de la fragilidad de los componentes, entre estos están el aislamiento de cubierta, la estructura de la cubierta, puertas exteriores y ventanas, muros exteriores y el daño interior, así como el daño interior debido al daño en cada uno de los componentes anteriormente mencionados.

Un análisis de fragilidad 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 la cubierta de una estructura para la velocidad del viento v (probabilidad de que los esfuerzos generados por el viento excedan la resistencia del componente), la fragilidad de la cubierta entonces estará definida como $F(C|v) = 1 - P(C|v)$ García et al., (2008).

Con los datos recabados a partir del modelo de presiones para pendientes de cubierta de 3, 5 y 7% se realiza un análisis para obtener curvas de relación media de daños (RMD) a partir de la metodología indicada por CAPRA (Central América Probabilistic Risk Assessment) donde se indica que el valor de daño esperado por viento (β), dada una velocidad de este (v) se obtienen con la siguiente ecuación:

$$E(\beta|I) = 1 - EXP \left\{ \ln \left[0.5 \left(\frac{\gamma}{\bar{v}} \right)^\rho \right] \right\} \quad (\text{Eq-9})$$

donde:

$E(\beta|I)$ = Es el valor esperado de daño dada una intensidad de viento

γ = Es la carga de succión asociada a una velocidad de viento

\bar{v} = Es la succión que corresponde al 50% de la succión máxima que resiste el sistema

ρ = Es el parámetro exponencial que ajusta la curva obtenida. Se tomó con un valor de $\rho=2.95$, ya que, bajo este valor, se obtiene una probabilidad de 1.0 cuando se alcanza la presión última identificada.

Con las presiones obtenidas en el *capítulo 4.1.2* se elaborarán las curvas de rango medio de daño para las diferentes velocidades de viento y bajo distintos ángulos de ataque. Como se indicó en el *capítulo 4.1.1*, la presión máxima a la cual el sistema de cubierta falla por la apertura del clip en la zona de conexión es de 2.5 kPa.

En la *tabla 6* se muestran los valores de rango medio de daño para una pendiente de cubierta de 3% y bajo un ángulo de ataque de 40°. La carga de succión última (γ) es de 2.5 kPa, por lo que la falla, es decir el valor de 1.0 se encuentra aproximadamente a 50 m/s.

Ángulo de ataque =		40°
Velocidad	Presión	E(β I)
m/s	Pa	
5	40.45	4.65581E-06
10	161.99	0.0003
15	364.11	0.0031
20	647.59	0.0168
25	1011.71	0.0611
30	1457.94	0.1696
35	1985.57	0.3700
40	2592.35	0.6373
45	3284.16	0.8688
50	4054.55	0.9772
55	4903.33	0.9987
60	5827.11	1.0000
65	6839.64	1.0000
70	7942.47	1.0000
80	10361.92	1.0000
90	13129.39	1.0000

Tabla 6 - RMD para ángulo de 40°

En la *figura 65* se observa la gráfica obtenida al analizar el RMD contra las velocidades de viento.

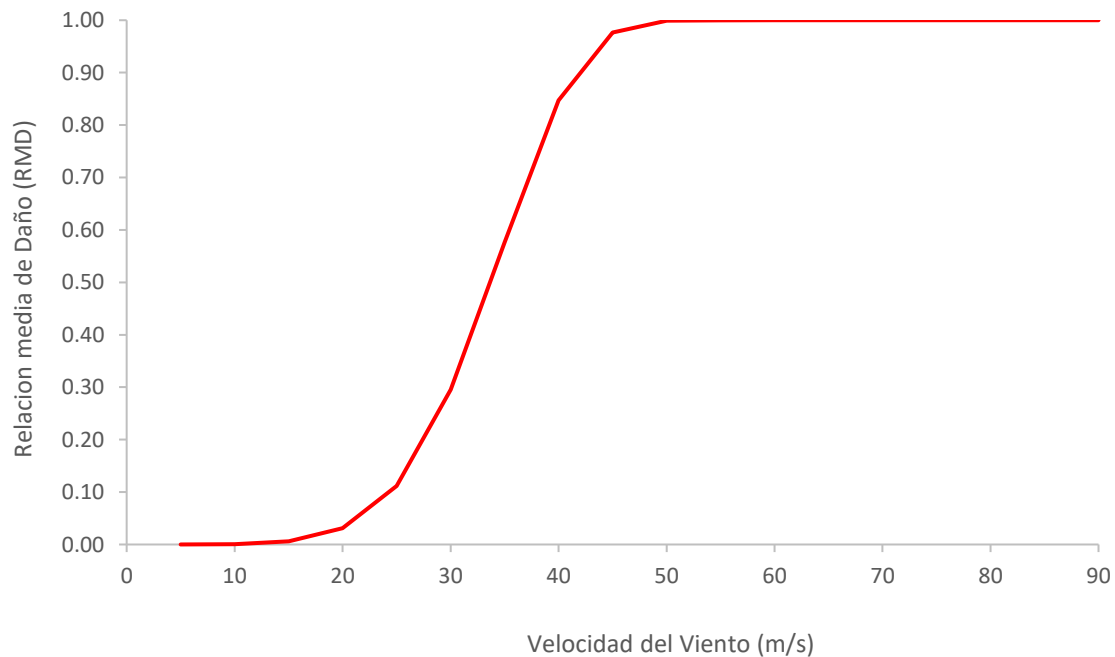


Figura 65 - RMD vs velocidad de viento

Se elaboraron las curvas de RMD para las velocidades de viento y ángulos de ataque señalados en la *tabla 4*, las cuales se presentan en las *figuras 66, 67 y 68*.

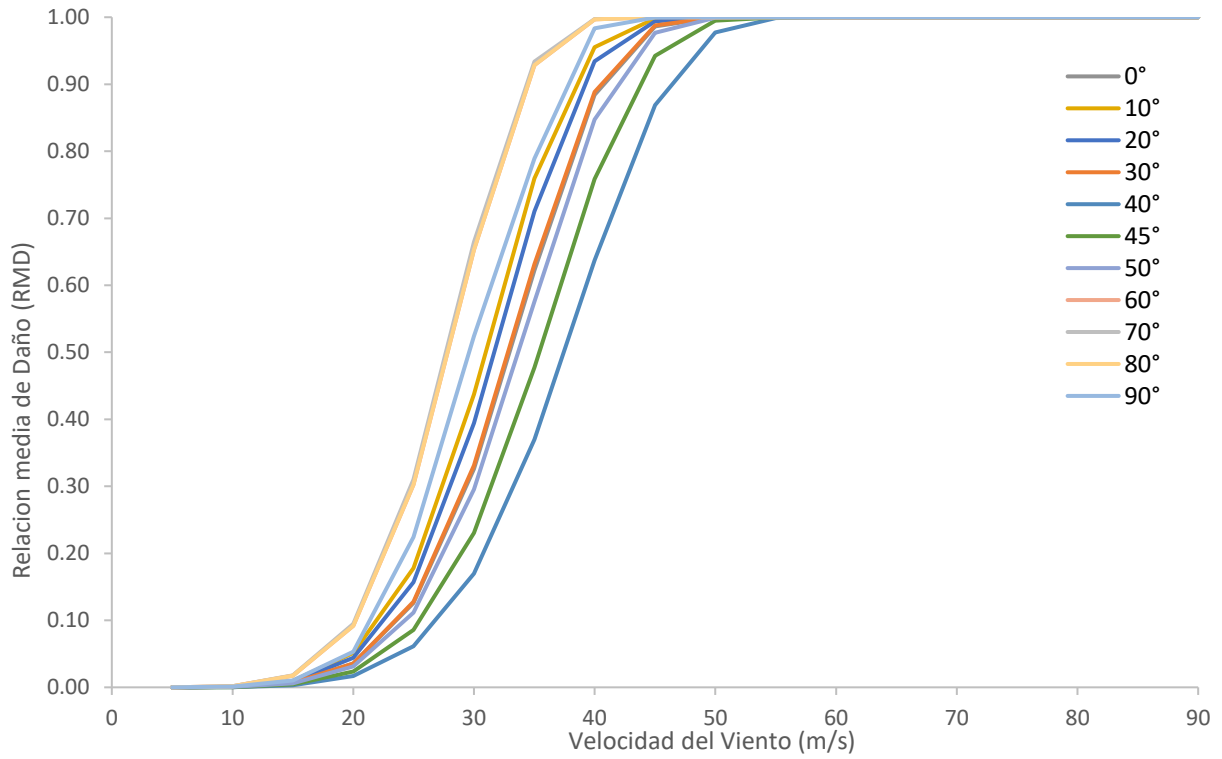


Figura 66 - RMD para pendiente del 3%

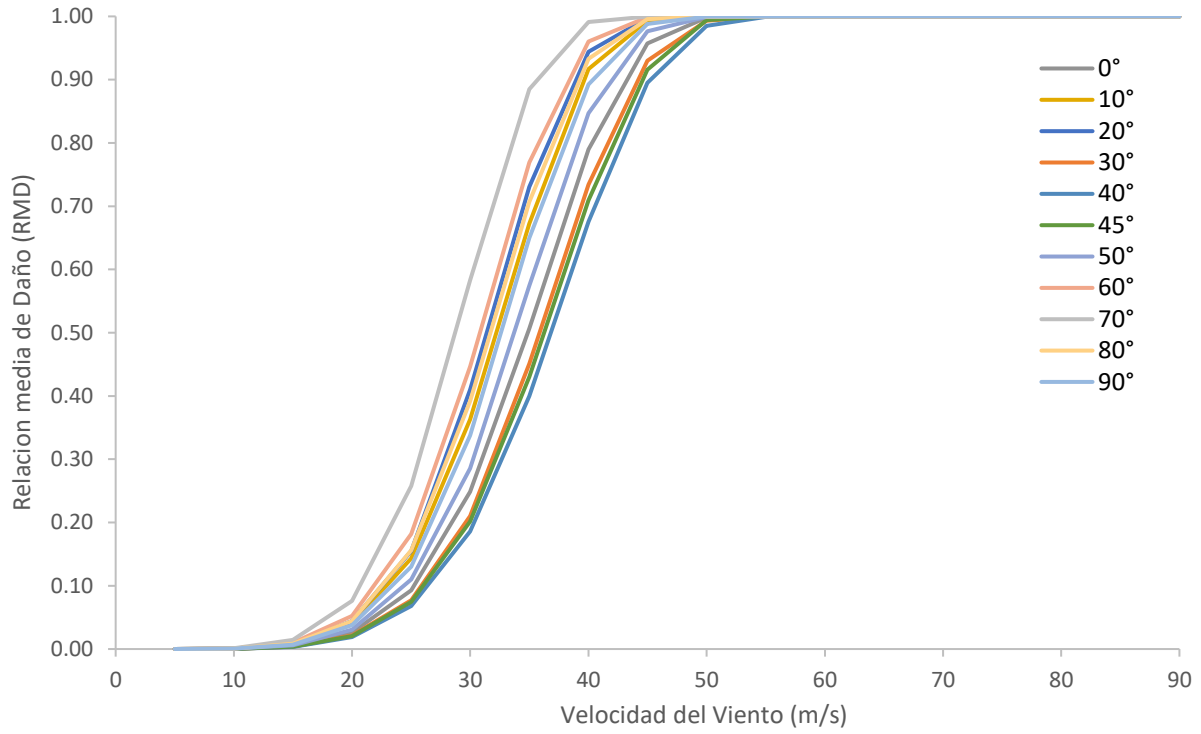


Figura 67 - RMD para pendiente del 5%

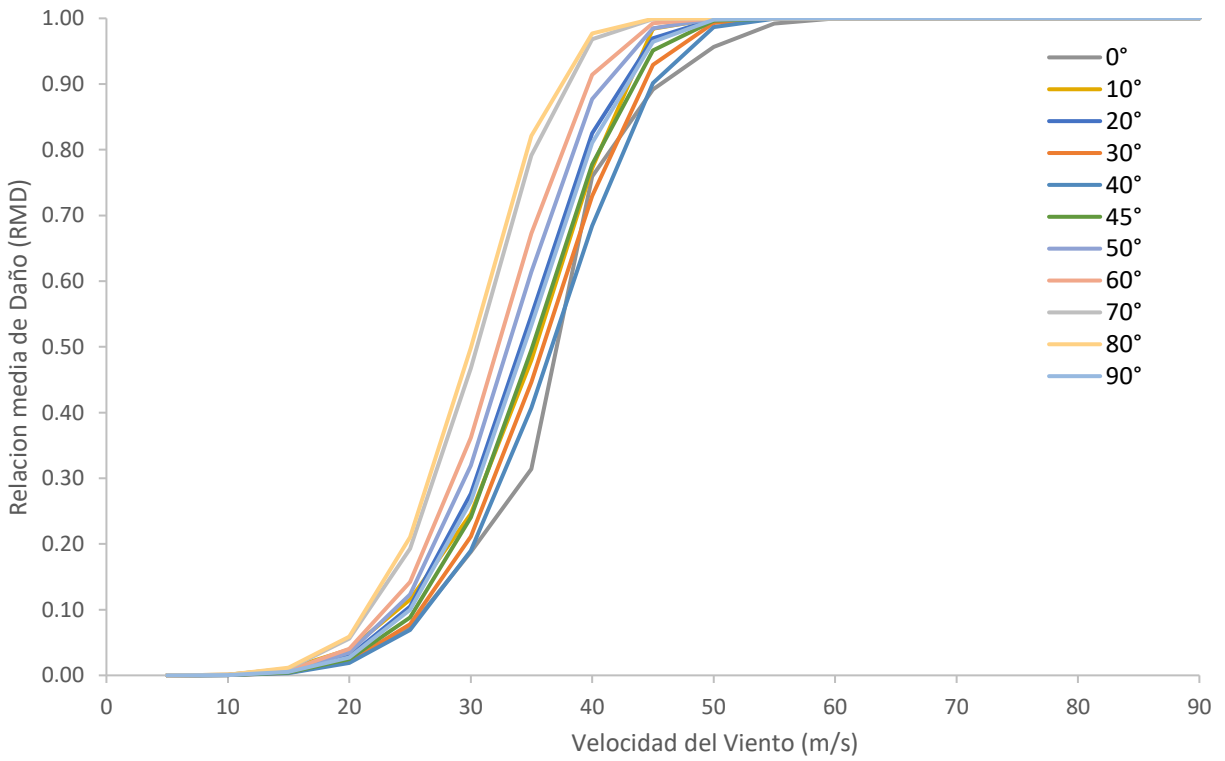


Figura 68 - RMD para pendiente del 7%

Una vez obtenidas las curvas de RMD, se analiza el caso del impacto económico que puede presentarse en caso de que la cubierta alcance su punto de falla durante un evento hidrometeorológico.

Para transformar el daño de la cubierta a pérdidas económicas se hace uso de las funciones de pérdida proporcionadas por HAZUS (2003) (*figura 69*).

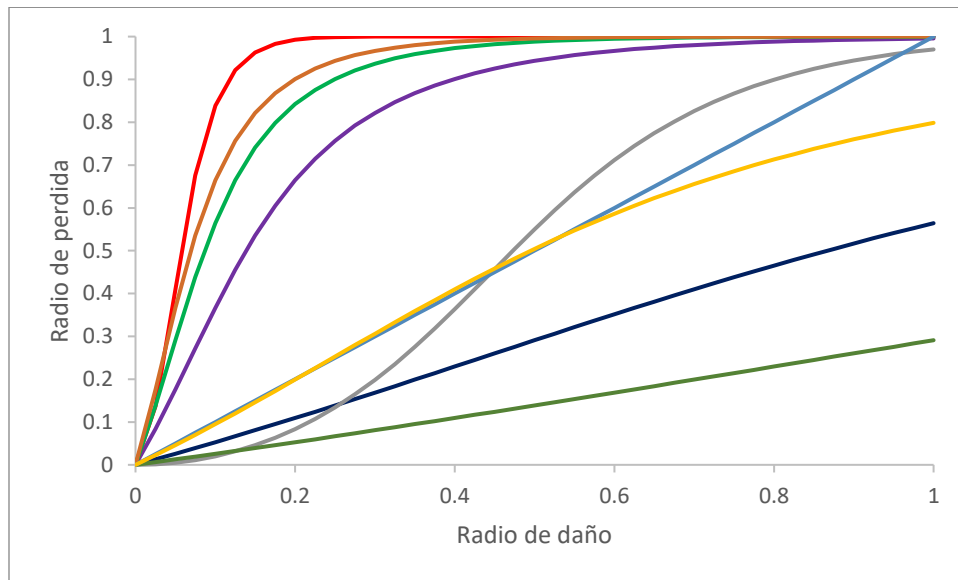


Figura 69 - Funciones de pérdida de HAZUS-MH

Una modificación fue aplicada a la función de pérdida asociada a la cubierta. Esta modificación es necesaria debido a que los paneles de cubierta metálica no tienen la misma función de pérdida que los paneles de madera considerados en una edificación comercial por dicha función. La función del panel metálico se encuentra entre la función de cubierta a base de teja y la función de cubierta de madera (*figura 70*).

La relación de pérdida se asume como el costo de reemplazar el componente contra su valor original.

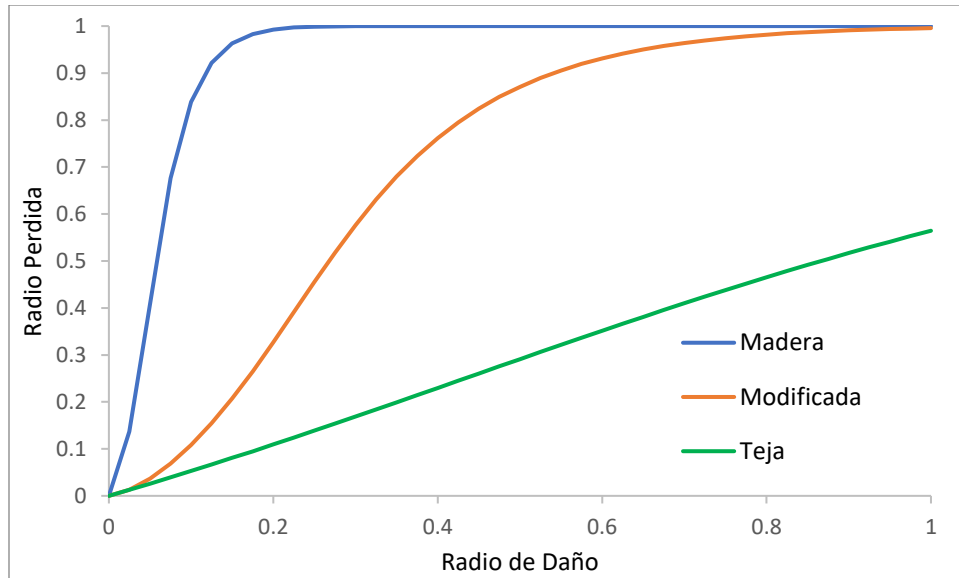


Figura 70 - Modificación a la función de cubierta

Las funciones de pérdida de algunos de los principales componentes de una cubierta industrial que se dañan durante eventos hidrometeorológicos son presentadas en la *figura 71*, en la cual se observa que la función para aberturas es completamente lineal, mientras que para los otros componentes es lineal hasta cierto punto donde luego se inicia una curvatura.

Funciones de pérdida para distintos componentes de cubierta:

Panel

$$y = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(e^{5x^{1.5}} - 1) \quad \text{(Eq-10)}$$

Aislamiento

$$y = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(e^{5x} - 1) \quad \text{(Eq-11)}$$

Aberturas

$$y = x \quad \text{(Eq-12)}$$

Interior, mecánico y eléctrico

$$y = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(e^{8x} - 1) \quad \text{(Eq-13)}$$

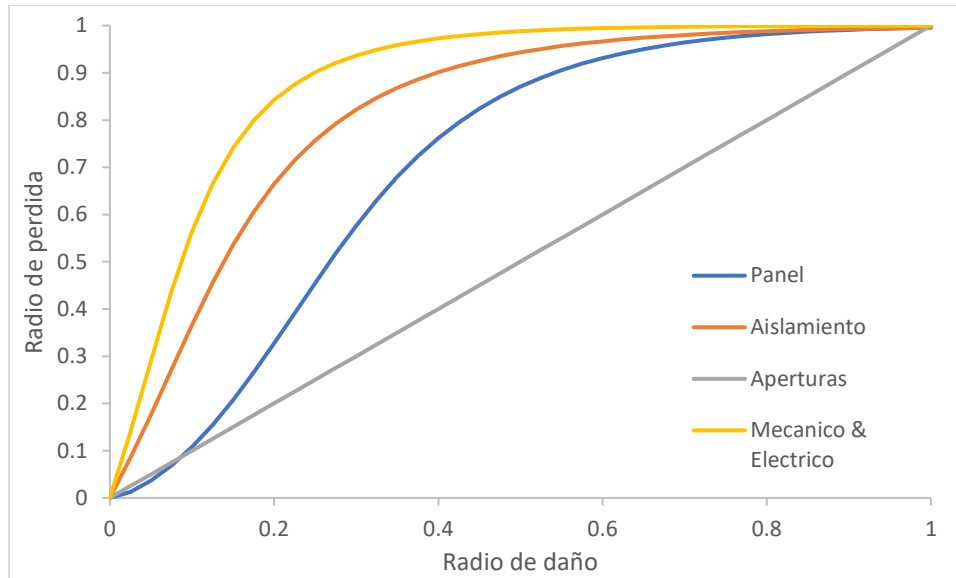


Figura 71 - Funciones de pérdida HAZUS-MH

La distribución de costos utiliza en esta investigación se basa en los datos proporcionados por RS Means. Esta plataforma provee información sobre costos, para desarrolladores, arquitectos, ingenieros, etc., estos valores se presentan en la *tabla 7*.

Tabla 7 - Radio de costo de componentes (RS MEANS)

Componente	Radio de costo (%)
Sistema de techo	5.50
Aislamiento	3.50
Aberturas	1.00
Cubierta Σ =	10.00
Construcción interior	8.00
Mecánico	18.50
Eléctrico	9.50
Mecánico y eléctrico Σ =	28.00

Para estimar el daño en contenidos, se utiliza una relación de daño entre daño interior y y contenidos. Los daños interiores se deben generalmente a la penetración de agua tras haberse presentado el fallo en la cubierta. La relación de daño se establece de la siguiente manera:

$$CL_{roof} = 2.0 * DI \text{ para daño interior } = 0.5 \quad (\text{Eq-14})$$

$$CL_{roof} = 1.0 \text{ para da\u00f1o interior } > 0.5 \quad (\text{Eq-15})$$

La ecuaci\u00f3n anterior indica que hasta el 50% de da\u00f1o interior, el da\u00f1o en contenidos sigue una relaci\u00f3n lineal, a partir de all\u00ed, el da\u00f1o en contenidos es del 100%, es decir, igual a 1.0.

Para obtener el valor de la p\u00e9rdida total, se acude a las siguientes ecuaciones:

$$P_{total} = C_s (a * RP_{panel} + b * RP_{aislamiento} + c * RP_{abertura} + d * RP_{inte} + e * RP_{mec} + f * RP_{elec}) * \alpha + RP_{cont} C_c \quad (\text{Eq-16})$$

Debido a que, en la ecuaci\u00f3n anterior, la funci\u00f3n de p\u00e9rdida es iguales para RP_{inte} , RP_{mec} y RP_{elec} , pueden ser reemplazadas por una sola funci\u00f3n RP_{ime}

$$RP_{inte} = RP_{mec} = RP_{elec} = RP_{ime} \quad (\text{Eq-17})$$

Por lo tanto, tenemos que:

$$d * RP_{inte} + e * RP_{mec} + f * RP_{elec} = RP_{ime} (d + e + f) \quad (\text{Eq-18})$$

Y la *ecuaci\u00f3n 16* quedar\u00eda de la siguiente forma:

$$P_{total} = C_s (a * RP_{panel} + b * RP_{aislamiento} + c * RP_{abertura} + RP_{ime} (d + e + f)) * \alpha + RP_{cont} C_c \quad (\text{Eq-19})$$

donde:

C_s = Es el costo de la estructura.

a, b, c, d, e y f = son relaciones de costo de los distintos componentes de cubierta, interior, sistema mec\u00e1nico y sistema el\u00e9ctrico.

C_c = Es el costo de los contenidos.

RP = Es la relaci\u00f3n de perdida para los componentes.

RP_{cont} = Es la relación de pérdida de contenidos debido a daños en interior.

α = Es el factor que toma en cuenta el costo asociado con el reemplazo y reparación, etc., igual a 1.3

Con el fin de evaluar el daño como un porcentaje del costo total de la edificación, se asume que los contenidos tienen un valor igual al 30% de esta, es decir $C_c = 0.3 * C_s$, por lo tanto la ecuación queda reducida a:

$$P_{total} = (a * RP_{panel} + b * RP_{aislamiento} + c * RP_{abertura} + RP_{ime}(d + e + f)) * \alpha + RP_{cont} * 0.3 \quad (\mathbf{Eq-20})$$

Se realiza el siguiente ejemplo con el fin de observar el impacto que tiene el viento en cuanto a las pérdidas económicas se refiere y que pueden llegar a presentarse cuando la cubierta presenta daños tras el paso de un huracán. Se tomará los valores de RMD para una edificación con las siguientes características.

Tipo de construcción= Edificación Industrial.

Uso= Almacenamiento de Fertilizante agrícola.

Costo de la construcción= \$14,194,790.61

Costo de contenidos= \$4,258,437.18

Pendiente de cubierta= 5%

Para esta estructura se propone un análisis de costos en el cual es interceptada por vientos de 25 m/s par aun ángulo de ataque de 40°. De las curvas obtenidas de RMD se obtiene para la velocidad y ángulo de ataque propuesto, los siguientes valores (*figura 72*):

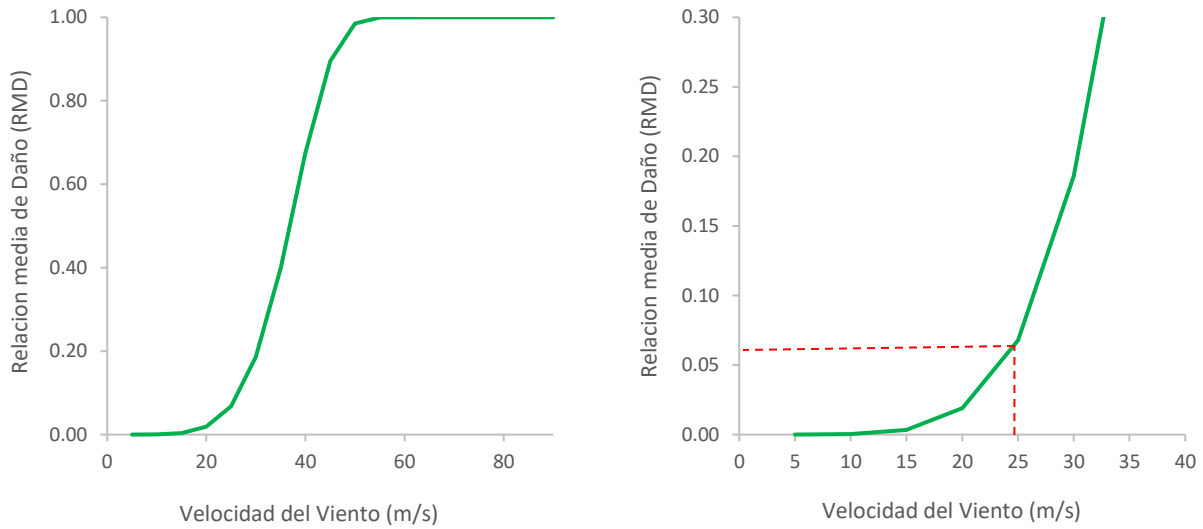


Figura 72 - RMD para 25 m/s

Una vez obtenido el RMD se emplea este valor para entrar a las curvas de daños para cada uno de los componentes de cubierta, es decir, panel, aislamiento, aberturas e IME (Interior, mecánico y eléctrico) (figura 73).

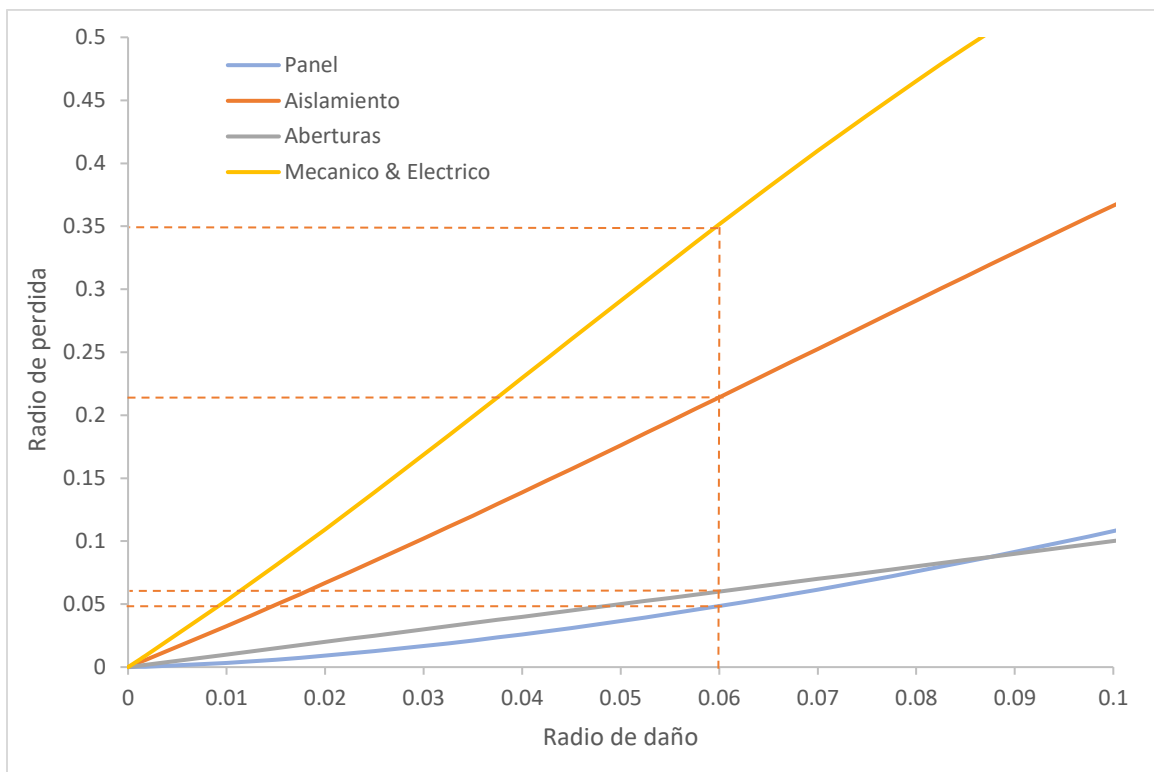


Figura 73 - Curvas de daño de distintos componentes.

Con estas relaciones se definen los siguientes valores:

$$RP_{panel} = 0.048$$

$$RP_{aislamiento} = 0.21$$

$$RP_{abertura} = 0.06$$

$$RP_{ime} = 0.35$$

Calculamos el daño en contenidos derivado del daño interior.

Sustituyendo los valores en la *ecuación 14*, obtenemos:

$$CL_{roof} = 2.0 * 0.35$$

$$CL_{roof} = 0.7$$

Sustituyendo en la *ecuación 20*, tenemos:

$$P_{total} = (0.055 * 0.048 + 0.035 * 0.21 + 0.01 * 0.06 + 0.35(0.08 + 0.185 + 0.095)) * 1.3 + 0.7 * 0.3$$

$$P_{total} = 0.3876$$

Es decir, hay una pérdida del 38% con respecto al valor de la estructura, derivado de daños en el sistema de cubierta y sus componentes y del daño en los contenidos.

En la sección 4.1.2 se estableció que las mayores fuerzas de succión se producen en los bordes de la cubierta, por lo que reforzar estas zonas es de vital importancia para generar una estructura con mayor capacidad y así evitar los posibles daños a futuro. Tomando en cuenta que el costo aproximado de los clips de sujeción a la fecha (Mayo, 2022) es de \$5.745 para un clip fijo calibre 24 (MBS del Norte, S.A. de C.V.), el costo por añadir elementos extras en los bordes de la cubierta con tal de reducir el área de influencia de la carga de succión es mínimo.

Capítulo 5

En este capítulo se presentan las conclusiones del estudio realizado en cuanto al comportamiento de cubiertas SSR ante eventos de vientos extremos, así como una serie de recomendaciones en base a los resultados del estudio.

5.1. Conclusiones

5.1.1. Sistema de Cubierta

Se estudió la capacidad ante cargas de succión presentes durante eventos de vientos extremos por medio de un análisis lineal elástico de elementos finitos del sistema de cubierta KR-18 cal 24 unido a los perfiles de cubierta por medio de clips de sujeción fijos y por un método de engargolado mecánico,

Las conclusiones del modelo son:

- El sistema alcanza su punto de falla aproximadamente a una fuerza de succión de 2500 Pa (2.5 kPa) bajo la prueba estandarizada ASTM E1592.
- La falla del sistema se presenta luego de que en la zona de conexión clip-lámina se presentara una rotación de 7.6° en dirección contraria a las manecillas del reloj, lo que se traduce en a la apertura del clip.
- El modo de falla observado, según diversas investigaciones, es común bajo la prueba E1592, por lo que los resultados obtenidos en este estudio son congruentes con estudios previos.
- La deformación en los bordes de los agujeros para las pijas autoperforantes que mantienen al clip conectado al elemento de soporte de cubierta presenta deformaciones medias, por lo que este fenómeno se mantiene como un segundo modo de falla y que podría presentarse en la zona si la fuerza de succión no es suficiente para generar la apertura del clip.
- Un aumento en la capacidad del sistema podría producirse al disminuir el espacio entre clips de conexión, lo cual podría ser benéficos en zonas costeras donde el impacto de huracanes es considerable.

5.1.2. *Distribución de presiones y velocidades*

El estudio de modelos de naves industriales se realizó con el fin de observar la distribución de presiones en el sistema de cubierta, las pendientes de cubierta utilizadas fueron de 3, 5 y 7%, así como también un estudio del efecto de las edificaciones colindantes sobre la cubierta de la nave industrial. Se presentan las conclusiones siguientes:

- Las fuerzas de presión negativa observadas en los modelos son mucho mayores a las fuerzas de presión positivas, por lo que en este tipo de edificaciones (edificios de baja altura) las succiones son predominantes.
- Las ráfagas de viento generan vórtices al alcanzar la estructura, estos vórtices son los responsables de generar las fuerzas de succión.
- Las fuerzas de succión se generan en zonas específicas y estas son muy pequeñas en comparación con el área total de cubierta.
- Se encontró que las mayores fuerzas de succión se producen cuando el ángulo de incidencia es de aproximadamente 20° con respecto a la dirección paralela a la cumbrera y se presentan menores succiones para ángulos oblicuos de $30-50^\circ$ con respecto a la dirección normal a la cumbrera.
- Se observó que al aumentar la pendiente de cubierta hay una disminución en las fuerzas de presión negativas máximas, sin embargo, las presiones positivas son mayores.
- Al considerar el efecto de edificaciones colindantes, se presenta un efecto de protección, disminuyendo los valores de presión negativas máximas observadas en los modelos, al igual que una disminución en las velocidades.
- Las direcciones de entrada de viento oblicuas a la cumbrera de la estructura presentan succiones con mayor uniformidad, al igual que mayores velocidades.
- Los ángulos de incidencia de viento oblicuos pueden presentar daños potencialmente mayores a los observados en otros ángulos debido a que las presiones se distribuyen en un área mayor.

5.1.3. *Análisis de costos*

El análisis de costos pretende establecer el impacto económico que puede presentarse tras un evento de vientos extremos en base a los daños estructurales de una edificación, en este caso, tomando en cuenta el daño en el sistema de cubierta y contenidos.

Las conclusiones son:

- Aunque el sistema de cubierta no alcance su punto de falla tras el impacto de un huracán, se presentan daños los cuales generan un impacto económico en la misma, si bien, podría darse el caso de no ser una pérdida total de la estructura y sus contenidos, podría tratarse de valores significativos dependiendo del uso de la nave y el valor de lo que guarece.
- El daño en la estructura es considerable aun a velocidades de viento relativamente bajas, asociadas a huracanes categoría 2 (43 m/s).

5.1.4. *Recomendaciones*

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio, se establecen una serie de recomendaciones en cuanto al desempeño y uso de los sistemas de cubierta SSR.

- El añadir más elementos resistentes o disminuir la distancia entre los mismos en los bordes de la cubierta de la nave podría generar un aumento de resistencia significativo que no tenga un mayor impacto en la inversión inicial del proyecto.
- El uso de un sistema de lámina engargolada a 180° o 360° puede presentar mayor resistencia a las fuerzas de succión, generando una mayor seguridad en la estructura y contenidos a un costo relativamente similar.
- La inclusión de árboles de altura media en los alrededores de la estructura, pueden llegar a generar un sistema de protección similar al observado con el modelo de edificios colindantes.

Bibliografía

- Agency, F. E. (1993). *Building Performance Hurricane Iniki in Hawaii: Observations Recommendations and Technical Guidance*. Federal Insurance Administration, Building Performance Assessment Team Report.
- ASCE. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- ASTM;. (2000). *Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process*. ASTM.
- Baker, C. J. (2007). Wind engineering—Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9-11), 843-870. doi:10.1016/j.jweia.2007.01.011.
- Bienkiewicz, B., & Sun, Y. (1992). Local wind loading on the roof of a low-rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 45(1), 11-24. doi:10.1016/0167-6105(92)90003-S
- Celigueta, J. T. (2000). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. San Sebastián: UNICOPIA C.B.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2021). *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México*. Ciudad de México: CENAPRED.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2021). *Series especiales- Impacto Socioeconómico de los desastres en México*. Retrieved from https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.
- Dabral, A., & Ewing, B. T. (2009). Analysis of Wind-Induced Economic Losses Resulting from Roof Damage to a Metal Building. *Journal of Business Valuation and Economic Loss Analysis*.
- Dixon , C. R., & Prevatt, D. O. (2010). What Do We Learn from Wind Uplift Tests of Roof Systems? *Structures Congress 2010*. Orlando, Florida, United States: ASCE.
- El Damatty, A. A., Rahman, M., & Ragheb, O. (2003). Component Testing and Finite Element Modeling of Standing Seam Roofs. *Thin-Walled Structures*, 41(11), 1053-1072. doi:10.1016/S0263-8231(03)00048-X
- Ferrari, D. M., & Díaz del Castillo, F. R. (2018). *Metodo del Elemento Finito*. Ciudad de México: Departamento de Ingeniería UNAM.
- García Palencia, A. J., Saffar, A., & Godoy, L. A. (2008). Curvas de Fragilidad debidas a Viento para Edificaciones Industriales Metalicas. *Revista internacional de Desastres Naturales, Accidente e Infraestructura*, 165-182.
- Gavansky, E., Kordi, B., Kopp, G. A., & Vikery, P. J. (2013). Wind Loads on Roof Sheeting of Houses. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 114, 106-121. doi:10.1016/j.jweia.2012.12.011.

- Ginger, J. D., & Letchford, C. W. (1995). Pressure Factors for Edge Regions on Low Rise Building Roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54-55, 337-344. doi:10.1016/0167-6105(94)00052-F
- Goliber, M. R. (2009). Pessure Distribution on the Roof Model Low-Rise Building Tested in a Boundary layer Wind Tunnel. *Graduate Theses and Dissertations*, 11103. doi:10.31274/etd-180810-1371
- HAZUS-MH: Technical Manual and Appendices. (2003). *Department of Homeland Security*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Historic England. (2011). *Industrial Buidlings: Listing Selection Guide* . English Heritage.
- IIUNAM. (Octubre de 2015). *El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California*. Ciudad de México: IIUNAM. Obtenido de <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Paginas/Series.aspx>
- Macías, J. M., & Avendaño, A. G. (2014). Climatología de tornados en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 83, 74-87. doi:10.14350/rig.35726
- MBMA. (2018). *Metal Building Systems Manual*. Metal Building Manufacturers Association.
- Medrano, M. M., & García, A. A. (2014). Climatología de Tornados en México. *Investigaciones Geográficas, Instítuo de Geografía, UNAM*, 75-88.
- Perry , D. C., ASCE, M., McDonald, J. R., ASCE, M., Saffir, H. S., & ASCE, F. (1990). Performance of Metal Buildings in High Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 985-999. doi:10.1016/0167-6105(90)90095-T
- Prevatt, D. O., Schiff, S. D., & Sparks, P. R. (1995). A Technique to Assess Wind Uplift Performance of Standing Seam Metal Roofs. *Eleventh Conference on Roofing Technology* (pp. 31-38). Gaithersburg, Md: NRCA.
- Qiaorong, L., Mingchao , L., Mengxi, Z., Qiaoling, M., Yongji, Z., & Xudong, L. (2022). Wind-resistance performance investigation of 360° vertical seam-locked roof system reinforced by sliding support and sandwich panel. *Journal of Building Engineering*, 45.
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Kheirkhah, G. H. (2018). A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 543-568.
- Simiu, E., & Yeo, D. (2019). *Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind*. Hoboken, NJ: Jhon Wiley & Sons.
- SMN. (2021). *Información Histórica - Ciclones tropicales. (2021)*. Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Unanwa, C. O., McDonald, J. R., Mehta, K. C., & Smith, D. A. (2000). The development of wind damage bands for buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84(1), 119-149. doi:10.1016/S0167-6105(99)00047-1