



Procedimiento para la simulación de las cargas de viento extremo en las cubiertas ligeras metálicas

Procedure for the simulation of extreme wind loads on light metal roofs

Anabel Reyes-Ramírez^I, Roberto Andrés Estrada-Cingualbres^{II}, Julio Ernesto de la Rosa-Melián^{III}, Roberto Pérez-Rodríguez^{II}, *

I. VERTICE-Empresa de Servicios de Ingeniería y Diseño. Holguín, Cuba.

II. Universidad de Holguín, Centro de Estudios CAD/CAM. Holguín, Cuba.

III. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Sevilla, España.

*Autor de correspondencia: roberto.perez@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 4 de marzo de 2022

Aceptado: 4 de abril de 2022

Resumen

El aumento apreciable de los fenómenos meteorológicos extremos en las últimas décadas, sobre todo de huracanes y ciclones tropicales, constituye una amenaza para la región del Caribe. El impacto de estos fenómenos en las viviendas y construcciones con cubiertas ligeras ha aumentado considerablemente en los últimos años. La presente investigación tiene como objetivo describir un procedimiento que permite la simulación numérica de las cubiertas ligeras metálicas ante las cargas estáticas y dinámicas propias de los vientos extremos, para obtener criterios acerca de las tensiones y deformaciones límites a que están sometidas, que faciliten la toma de decisiones. Se utilizaron los métodos de análisis y síntesis de sistemas, así como la modelación y

simulación por elementos finitos. El análisis dinámico de las cargas de viento permitió simular el comportamiento real de las cubiertas. Se demostró que en el área cercana a los agujeros de la cubierta se concentran los mayores valores de tensiones, constituyendo el punto más débil por donde comienza el fallo de la cubierta. Los resultados muestran que el procedimiento propuesto facilita la toma de decisiones para la búsqueda de soluciones constructivas que minimicen estos efectos.

Palabras claves: cubiertas ligeras metálicas; simulación numérica; vientos extremos; carga dinámica.

Abstract

The substantial increase in extreme weather events in recent decades, especially hurricanes and tropical cyclones, constitutes a threat to the Caribbean region. The impact of these phenomena on houses and buildings with light roofs has increased considerably in recent years. The objective of this research is to describe a procedure that allows the numerical simulation of light metal roofs in the aspect of static and dynamic loads typical of extreme winds, in order to obtain criteria about the limit stresses and deformations to which they are subjected, which facilitate the decision-making process. Systems analysis and synthesis methods were

used, as well as finite element modeling and simulation. The dynamic analysis of the wind loads made it possible to simulate the real behavior of the light roofs. It was shown that the highest stress values are concentrated in the area near the holes in the roof, constituting the weakest point where the failure of the metallic light roof begins. The results show that the proposed procedure facilitates decision making in the search for constructive solutions that minimize these effects.

Key words: light metallic roofs; numerical simulation; extreme winds; dynamic load.

Cómo citar este artículo:

Reyes Ramírez A, Estrada Cingualbres RA, de la Rosa Melián JE, Pérez Rodríguez R. Procedimiento para la simulación de las cargas de viento extremo en las cubiertas ligeras metálicas. Ingeniería Mecánica. 2022;25(2):e643. ISSN 1815-5944.

1. Introducción

Los ciclones tropicales representan el peligro natural que con mayor frecuencia e intensidad afecta a los países del Caribe, el Golfo de México y el Estrecho de la Florida, causando grandes daños al medio ambiente, la economía y ocasionando pérdidas de vidas humanas. El fondo habitacional es uno de los más afectados con el paso de estos fenómenos, aspecto que resulta de gran importancia debido al impacto directo que tiene en la sociedad. Dentro de los elementos constructivos de las edificaciones, las cubiertas ligeras constituyen el punto

más vulnerable ante el efecto de los fuertes vientos y las intensas lluvias que traen consigo estos eventos naturales [1].

En la región del Caribe, solo en cinco meses azotaron siete huracanes en 2016 y 2017, fenómeno sin precedentes con consecuencias catastróficas. Para las estructuras, las cargas de viento compiten con las cargas sísmicas como cargas dominantes. Estas producen aproximadamente igual cantidad de daño que los sismos, pero en un mayor periodo de tiempo. Un aspecto esencial y que requiere de investigaciones futuras, es el desempeño no satisfactorio de las estructuras y cubiertas ligeras de baja altura, bajo la acción de vientos extremos [2].

Son diversos los trabajos de investigación donde se aplica el método de los elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM) a la Ingeniería Civil, como es el caso de [3] que realizan sus estudios para determinar el potencial de la fricción superficial provocado por huracanes en zonas urbanas. En este caso utilizan las tecnologías LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) y GIS (*Geographic Information System*). Los autores no especifican estudios del efecto de las presiones de viento en las cubiertas ligeras. Por su parte, [4] presentaron resultados de la medición a gran escala de los efectos del viento en una estructura de techo de acero de gran envergadura, durante el paso del tifón Fanapi. Para ello, determinaron las frecuencias naturales de vibración, los modos de vibración, realizaron el análisis FEM y luego ensayaron en túneles de viento. La investigación no aborda el comportamiento a escala local de cubiertas ligeras.

Wu et al. [5] evaluaron experimentalmente los efectos de la turbulencia en el flujo de la capa límite atmosférica sobre la distribución de la presión superficial media sobre la cubierta de un edificio típico de baja altura. La investigación no tiene en cuenta los efectos específicos sobre cubiertas metálicas ligeras. Por otra parte, Womble, et al. [6] examinan la utilización remota de sensores en las investigaciones en tornados y tecnologías como LIDAR, demostrando los retos que existen en la recolección y procesamiento de los datos en diferentes niveles, así como la utilidad de la información para la comprensión de los efectos de este fenómeno atmosférico. No abordan las especificidades del comportamiento de las cubiertas ligeras metálicas ante fuertes vientos.

Autores como Whiteman, et al. [7], exploran el uso de los sistemas ciber-físicos para el diseño óptimo multi-objetivo de las estructuras de edificaciones de baja altura al efecto de las cargas de viento. En este caso, los autores tampoco especifican análisis puntuales FEM de las cubiertas ligeras ante fuertes vientos. Por su parte, autores como [8] realizan un interesante estudio del efecto del viento sobre las cubiertas, para el caso de viviendas con estructuras de madera y autores como [9, 10], evidencian en su análisis las fallas en las uniones estructurales en las cubiertas de edificaciones de baja altura, así como el modelo bidimensional de elementos finitos desarrollado para estimar a escala de los elementos estructurales y analizar los efectos de las cargas extremas de viento.

Doddipatla, et al. [11] investigan el anclaje y las cargas de viento envolvente en equipos montados en cubiertas a escala 1:50. Se demostró que las cargas de viento de la envolvente son distintas tanto de las cargas de anclaje, como de las cargas de revestimiento en edificios de poca altura con techo descubierto, debido a las diferencias en la aerodinámica local asociada. El estudio no analiza el caso de las cubiertas ligeras.

Amador, et al. [12] comparan los coeficientes de presión de las cubiertas de varias edificaciones bajas que han sido ensayadas tanto en túneles de viento como por métodos numéricos [modelación computacional de fluidos]. Investigan las posibles discrepancias entre el Eurocódigo EN1991-1-4 y los ensayos experimentales, como consecuencia de la no consideración de las variaciones de la intensidad de turbulencia y de la inclinación de la cubierta en la obtención de los coeficientes de presión en la normativa. Los autores se centran en las presiones de viento y no en la modelación numérica de los efectos dinámicos en las cubiertas metálicas ligeras.

En el caso de Guo, et al. [13], desarrollan un nuevo método para estimar los coeficientes de presión promedio del área máxima en la cubierta de un edificio de poca altura. El método se basa en el conocido modelo de vector cuasi-estacionario para tener en cuenta las fluctuaciones a gran escala y de baja frecuencia del viento. Tienen en cuenta los efectos de turbulencia a pequeña escala y generados por el cuerpo utilizando un modelo estocástico. El modelo proporciona buenas predicciones de los coeficientes de presión promedio del área máxima que no pueden ser capturados por el enfoque cuasi-estacionario. El estudio no aborda las condiciones particulares de las cubiertas metálicas ligeras.

De la misma forma Zhao, et al. [14], examinan los métodos de descomposición del viento para tormentas eléctricas no estacionarias en función de las respuestas de frecuencia. Finalmente, se brinda recomendaciones para la selección del método de descomposición y la frecuencia de corte para vientos no estacionarios como los de las tormentas eléctricas. Al igual que [14], no se especifican las condiciones particulares de las cubiertas metálicas ligeras.

Múltiples son los *softwares* profesionales FEM que se utilizan para la solución de problemas estructurales, entre los más conocidos se encuentran el *CosmosM*, el *Abaqus*, el *Ansys*, el *Nastran*, el *Pastran*, entre otros. A partir de comienzos de este siglo, se produjo una fructífera combinación de los sistemas CAD con robustas herramientas en la generación de forma amigable para el usuario de geometrías de una dimensión, chapas, superficies y sólidos, con los paquetes FEM. Estos últimos muy potentes en el ámbito de la solución de los sistemas de ecuaciones diferenciales, pero menos en la formación de las geometrías, entre ellos se encuentran el *SolidWorks/Simulation* (pionero en esta combinación), el *Autodesk Inventor*, el *SolidEdge*, *Pro/Engineer*, *CATIA*, etc. [15].

Del análisis realizado, se valora que aunque se han desarrollado investigaciones relacionadas con el efecto de los fuertes vientos sobre cubiertas ligeras en diferentes escenarios, aún se requieren de estudios en países en vías de desarrollo, donde se utilice de manera más efectiva la simulación numérica de estos eventos para facilitar la toma de decisiones y minimizar los efectos negativos.

2. Métodos y Materiales

2.1. Sistemas de ingeniería y modelación numérica de cubiertas ligeras

Las investigaciones actuales tienden a la aplicación de la teoría general de los sistemas de ingeniería en las disciplinas científicas especializadas. El análisis de sistemas requiere de una formulación exacta de los criterios que permiten distinguir los elementos que estructuran dichos sistemas; sus relaciones e interrelaciones, para de esta manera comprender de una manera más completa su estructura [16]. Por esta razón, la formulación del análisis externo de esta investigación, permite la construcción de un modelo representativo del proceso que se analiza.

El análisis externo de un sistema se inicia con la determinación de los indicadores de eficiencia, estos constituyen las variables de salida. En la presente investigación se definen como indicadores de eficiencia los valores de tensiones máximas y los desplazamientos verticales a los que están sometidas las cubiertas ante los vientos extremos, figura 1. En una segunda etapa se determinan las variables de entrada del proceso, y se clasifican en los siguientes grupos: datos de entrada, variables de coordinación y variables de decisión.

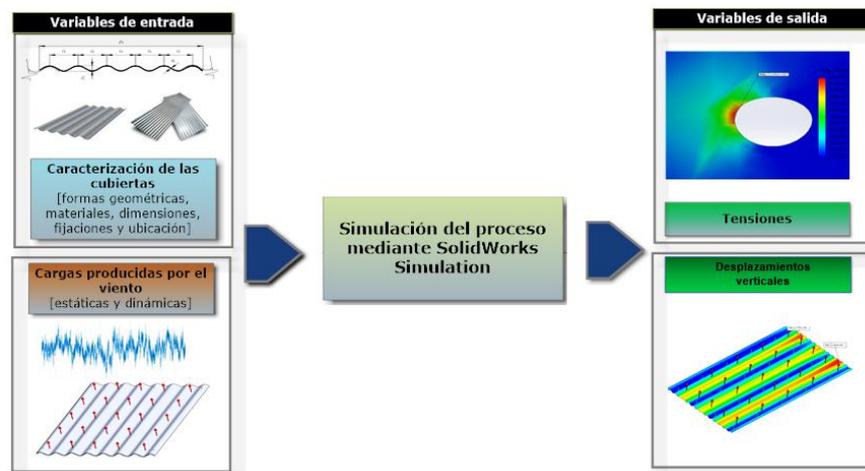


Fig. 1. Análisis externo utilizando los Sistemas de Ingeniería a la investigación. Fuente: autores

Los datos de entrada son datos propios del proceso, que adoptan valores conocidos con valores de probabilidad conocida o que pueden ser incluso desconocidos. Los datos de entrada lo constituyen las variables características de las cubiertas ligeras: forma, dimensiones, propiedades de materiales, etc. Las variables de decisión son aquellas que pueden ser modificadas a voluntad del usuario del sistema, con el fin de obtener el mejor compromiso posible entre los indicadores de eficiencia del proceso. Se identificaron como variables de decisión: el tipo de mado, el tipo de sujeción, el tipo de carga y la convergencia de la malla.

Las variables de coordinación son aquellas cuyos valores se determinan durante la solución de otra tarea de dirección de mayor envergadura, con respecto a la cual la tarea en análisis constituye una sub-tarea. Se definieron como variables de coordinación los valores de carga de viento extremo, tanto la carga estática como la dinámica, las cuales deben ser determinadas en un proceso previo a la simulación, para luego ser introducidas en el software FEM.

Concluido el análisis externo se procede a realizar el análisis interno, el cual consiste en la determinación del algoritmo más racional para calcular los indicadores de eficiencia a partir de las variables de entrada; este proceso es sistemático y recurrente, puede que, encontrado el algoritmo, halla que modificar o agregar variables de entrada para ajustar el modelo.

En la figura 2 se muestra el procedimiento a utilizar para la simulación numérica de las cubiertas metálicas ligeras, el cual refleja la secuencia empleada para todo el proceso de modelación de las cubiertas y la simulación de las cargas que actúan sobre ella, que nos permitirá obtener los indicadores de eficiencia buscados. Se divide el análisis en tres etapas fundamentales, pre-proceso, proceso y post-proceso.

2.2. Etapa de pre-proceso

Esta primera etapa juega un papel fundamental dentro de la investigación, ya que su principal función es la de reunir, seleccionar y determinar toda la información, tanto cualitativa como cuantitativa, que será necesario introducir al modelo para su posterior simulación. Como toda etapa inicial de un proceso, mientras más acertados sean los datos obtenidos, mayor confiabilidad, seguridad y calidad tendrán los resultados finales y, por lo tanto, es ahí donde radica su especial importancia.

Existen dos materiales que son los más predominantes en la actualidad: las cubiertas de fibrocemento y las metálicas. En este trabajo solo se muestra el caso de las cubiertas ligeras metálicas.

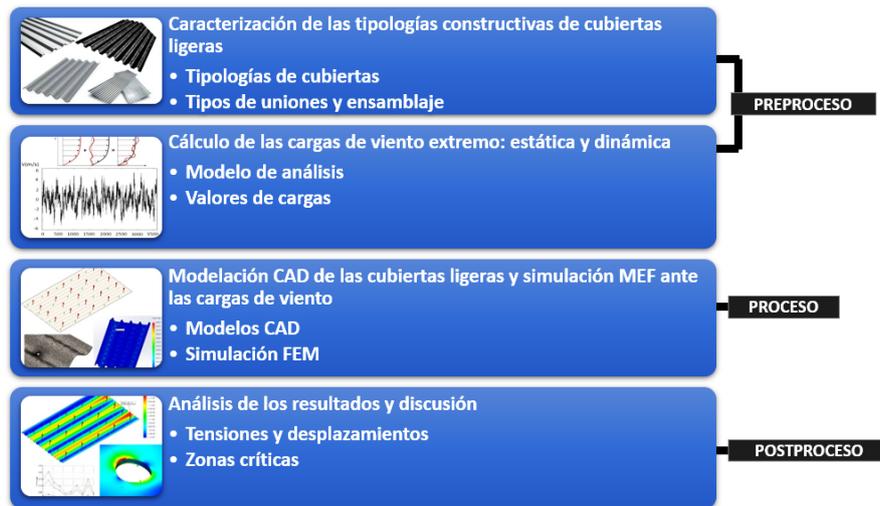


Fig. 2. Procedimiento a utilizar para la simulación numérica de las cubiertas ligeras metálicas. Fuente: autores

En ambos materiales se diversifican, además, las formas de la cubierta. En el caso de las cubiertas de fibrocemento se encuentran: las cubiertas onduladas y las de tipo canalón. Mientras tanto, en las metálicas podemos encontrar tres formas: onduladas, trapezoidal y acanalada, figura 3. Al ser estas las variantes más comercializadas y usadas en el país, se hizo necesario recopilar todas las variables geométricas, físicas y mecánicas que permitieran una correcta caracterización y modelación.



Fig. 3. Cubiertas seleccionadas para la modelación numérica. Fuente: autores

Dentro de la estructura de la cubierta, las uniones constituyen un elemento de gran importancia, debido a que garantizan la seguridad de estas ante el efecto de fenómenos naturales, para soportar los vientos extremos e intensas lluvias. Se tuvieron en cuenta los dos tipos fundamentales de uniones entre las tejas, la monta transversal y la monta longitudinal.

La última tarea de la etapa de pre-proceso consiste en el cálculo y obtención de los valores de carga de viento extremo, tanto en su componente estática como dinámica. La norma cubana NC 285 de 2003 establece el método de cálculo para determinar la carga de viento que debe utilizarse en los cálculos estáticos y dinámicos de los edificios y obras de ingeniería, o de sus partes y elementos, para los cuales el viento resulta ser una sobrecarga de uso. En el caso de la componente estática, todo el procedimiento para la determinación del valor de la carga actuante fue tomado de la investigación de [1].

La componente dinámica de la carga de viento es la que corresponde al valor de la componente fluctuante de la velocidad del viento. Su magnitud influye en gran medida en la respuesta dinámica de la estructura debido a las pulsaciones provocadas por el viento. Para realizar una evaluación numérica de estos efectos, es preciso simular series temporales representativas de las velocidades fluctuantes del campo de flujo, que consideren la aleatoriedad espacial y temporal del viento atmosférico durante la ocurrencia de un fenómeno extremo determinado, como, por ejemplo, un huracán.

Existen en la literatura especializada diferentes métodos para generar digitalmente registros representativos del campo de velocidades de viento. Esta simulación digital de registros es un requisito previo para una correcta implementación del análisis de la respuesta estructural inducida por el viento, en el espacio y en el tiempo.

La obtención de registros de viento en la zona del Caribe, está condicionada por la presencia de anemómetros en las estaciones meteorológicas. En el área estudiada, no se encontraron datos de registros de vientos a escala

micro temporal [mediciones en minutos y segundos] que faciliten un estudio dinámico del viento en pequeñas escalas. Por esta razón fue necesario recurrir a registros simulados, obtenidos a partir de datos de viento de regiones que, por su clima y localización geográfica son lo suficientemente similares a los del área seleccionada. Entre la bibliografía consultada, se encontró la base de datos que ofrece la página *web* de la División de Ingeniería y Estadística para vientos extremos, del *National Institute of Standard and Technology*, NIST, de los Estados Unidos, para el análisis de velocidades de vientos extremos y otros fenómenos relacionados con la ingeniería del viento.

De ella se descargó una base de datos que contiene registros simulados de velocidades de viento de un Huracán, tomadas a 10 metros de altura, en 55 puntos a lo largo de la costa del Golfo de México. Cada fichero contiene 999 mediciones simuladas cada 60 segundos en 16 direcciones de viento alrededor de un mismo punto. De cada instante de tiempo se seleccionó la dirección más desfavorable [aquella con el valor máximo de velocidad del viento], con el objetivo de generar una serie de tiempo de velocidad de viento que pueda ser validado para simular el comportamiento aleatorio real, se introdujo estos datos en una rutina computacional desarrollada en MATLAB®.

Al introducirle como dato el valor medio de velocidad en m/s obtenido de los registros de velocidades máximas, se genera una serie de tiempo para el periodo considerado. Este propio archivo de MATLAB® permite generar, además, una gráfica con el espectro de energía resultante, que no es más que la representación de la Densidad Espectral de Potencia basados en el espectro de Kaimal, figura 4.

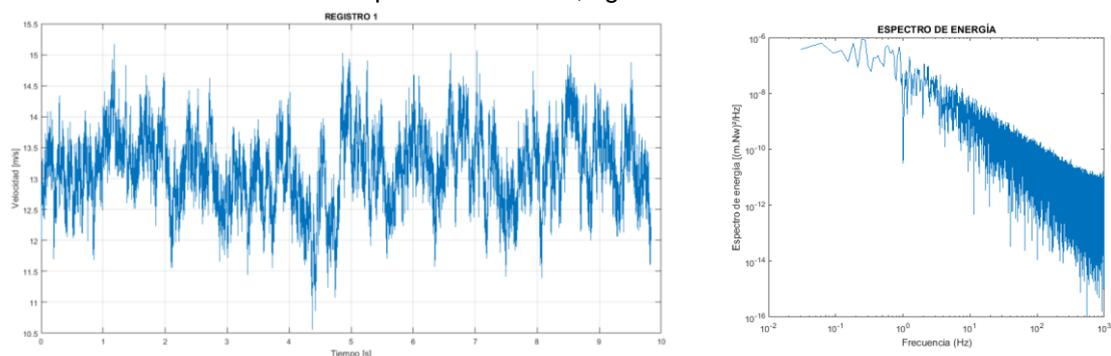


Fig. 4. Gráfico de velocidad del viento [m/s] versus tiempo [s] según espectro de Kaimal. Fuente: autores

Ya obtenidos estos valores de velocidades, se procesan en el *Flow Simulation* para obtener los valores de presiones correspondientes, los cuales serán necesario introducir al software *SolidWorks/Simulation* para el análisis dinámico.

2.3. Etapa de proceso y post-proceso

Una vez concluidas todas las tareas comprendidas en el pre-proceso, ya se está en condiciones de realizar el proceso de modelación de las cubiertas ligeras. Estos modelos constituyen básicamente una representación simplificada del sistema, cuya elaboración implica la selección y cuantificación de las variables necesarias para representarlo con el nivel de detalle requerido.

Una vez representadas las cubiertas en *SolidWorks*, se le asignan a cada una el material correspondiente y sus propiedades, de tal manera que el software sea capaz de simular su comportamiento en función de las características físico-mecánicas propias de cada elemento. Para ello se necesitan las siguientes propiedades: Módulo Elástico [MPa], Coeficiente de Poisson, Límite de Tracción (MPa), Límite Elástico (MPa) y Densidad de Masa (kg/m^3), de los dos materiales que fueron escogidos para esta investigación: fibrocemento y el acero galvanizado utilizado para la fabricación de las cubiertas metálicas.

El siguiente paso consiste en aplicar al modelo numérico los valores de carga actuante sobre las cubiertas, con el objetivo de reproducir del mejor y más completo modo posible las condiciones que se encuentran en la naturaleza. La última parte de la etapa de modelación es realizar el mallado o la discretización en elementos finitos. Al generar la malla, ella en general consta de miles (e incluso centenares de miles) de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla, y por otro lado las fuerzas, se asignan a los puntos de la malla.

De esta manera quedan definidos en el software las características físicas y geométricas de las cubiertas, así como los valores de carga actuante, por lo que ya se está en condiciones de ejecutar el modelo para obtener los valores finales de tensiones y desplazamientos.

Para la construcción de los modelos geométricos de las cubiertas se utilizó el software profesional de diseño en 3D *SolidWorks 2016*. Se tuvo en cuenta la forma y dimensiones de las cubiertas descritas. En el caso de las cubiertas onduladas, tanto metálicas como de fibrocemento, se construyó a partir de una curva conducida por una ecuación con sus características, y a partir de estos, se realizó una extrusión con la herramienta superficies, a la cual se le asignó el espesor correspondiente. La cubierta de fibrocemento presenta seis orificios y la metálica 20, utilizados para modelar las restricciones en la cubierta producidas por la acción de los anclajes realizados a los elementos estructurales que permiten el empleo de las cubiertas como cubiertas de edificaciones.

Con los valores de los parámetros expuestos se procedió a realizar el cálculo de los diferentes modelos de cubiertas, mediante el programa profesional de análisis por elementos finitos *SolidWorks/Simulation*, versión 2016.

3. Resultados y Discusión

El análisis estático de la distribución de tensiones para el caso de las cubiertas metálicas ondulada y trapezoidal se muestra en la figura 5a. Se modeló el caso de las cubiertas de 1 mm de espesor. En ambos casos, el valor máximo de las tensiones principales apareció en los bordes de los agujeros de sujeción. Este estudio se realizó variando las direcciones del viento, para el caso de una vivienda a dos aguas, figura 5b. En este caso, se evidenció la importancia que tiene para la prevención de las fallas los orificios para las sujeciones de las cubiertas metálicas. Los resultados coincidieron con los obtenidos de manera experimental por otros autores [4] [9].

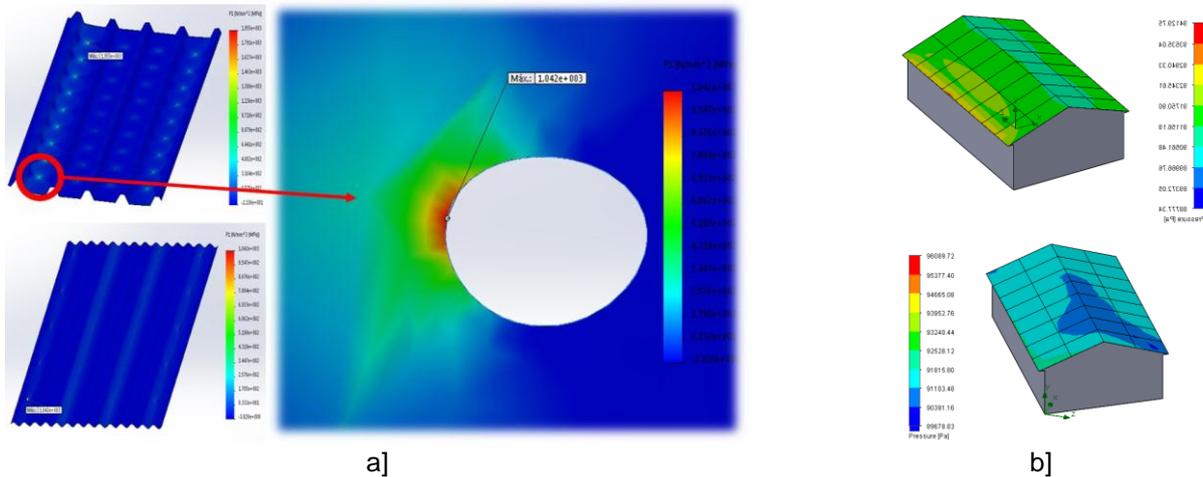


Fig. 5. a) Distribución de las tensiones para el modelo de una cubierta metálica ondulada y trapezoidal de 1 mm de espesor; b) Comportamiento en una cubierta a dos aguas. Fuente: autores

En el caso del estudio dinámico del comportamiento del viento extremo [ráfagas de viento] sobre las cubiertas ligeras metálicas onduladas, constituyó un elemento distintivo de la investigación. Para realizarlo, se aplicó una presión variable en el tiempo según la curva de carga definida. En la figura 6a se representa el estado tensional que se obtuvo en la cubierta metálica ligera a los 600 segundos de comenzado el estudio [en el paso final de cálculo]. La presión que actuaba en ese instante de tiempo fue de 21,06 Pa. Como se observa, prácticamente en toda la cubierta ocurren valores muy bajos de tensión, incluso algunos negativos [tensiones de compresión]. Sin embargo, en las inmediaciones de los agujeros estas tienen un súbito aumento en su valor.

Este resultado ocurre por el fenómeno de la concentración de tensiones en los cambios de sección, y al mismo tiempo, por la presencia de las restricciones en esa zona debido a la acción de los pernos de sujeción, lo que impide los libres desplazamientos. La figura 6b representa la distribución de tensiones en el orificio, donde surgen las mayores tensiones. En el paso representado, las tensiones equivalentes máximas tienen un valor de 11,33 MPa y son menores que el límite elástico del material, y por esa razón no se produce el fallo de la cubierta.

La figura 7a muestra un conjunto de puntos seleccionados para mostrar el comportamiento de las tensiones en el tiempo ante la acción de la presión variable [ráfagas de viento]. Los puntos seleccionados se corresponden con un punto de sujeción, un extremo libre y en el centro de la cubierta. Por otro lado, se encuentra la curva de respuesta proporcionada por el complemento *Simulation* después de concluido el estudio.

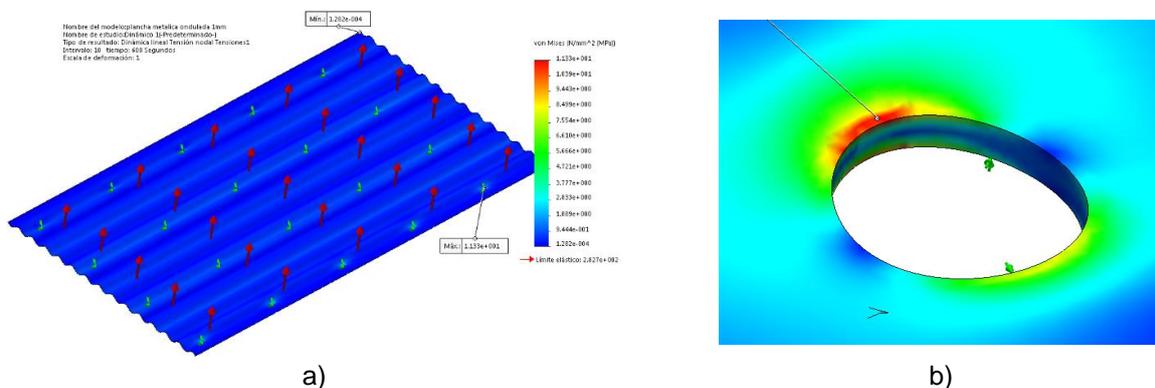


Fig. 6. Estado tensional en la cubierta a los 600 segundos de comenzado el estudio. a) Modelo completo. b) Ampliación de la distribución de tensiones alrededor del agujero donde se alcanzan los valores máximos. Fuente: autores

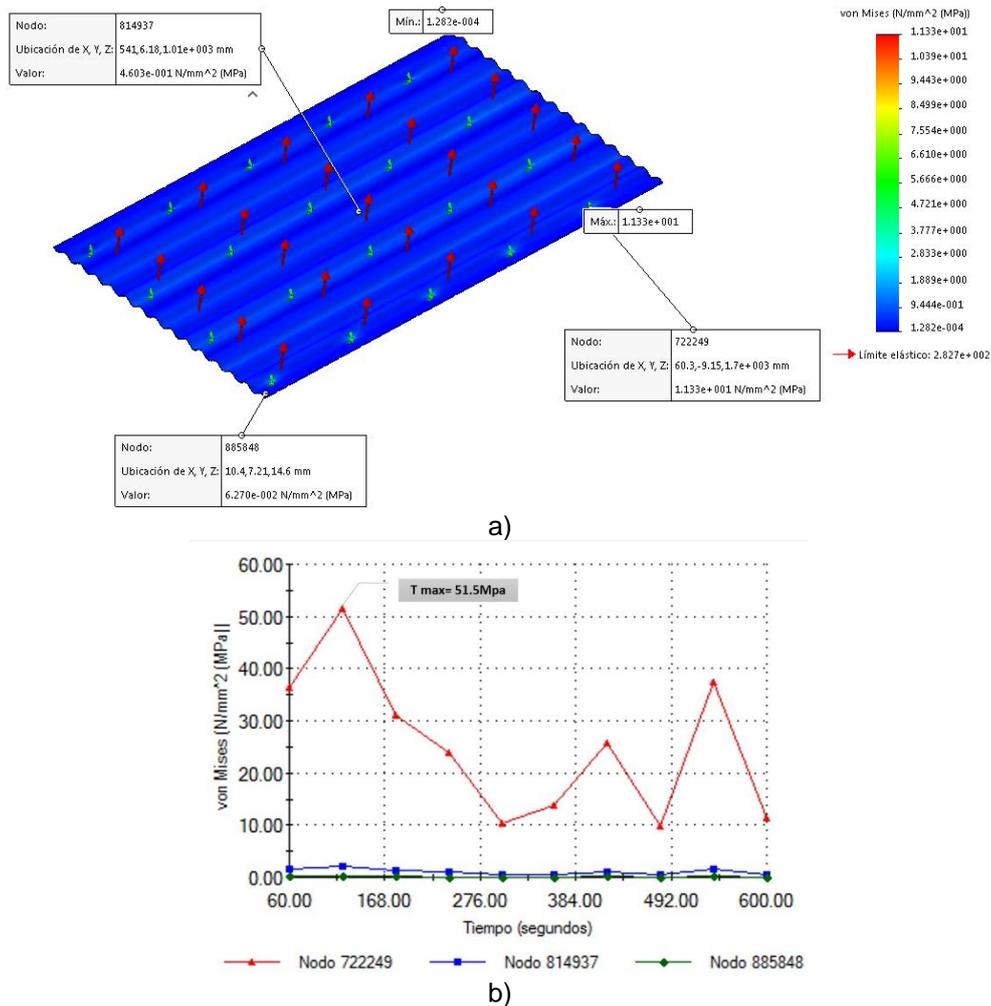


Fig. 7. a) Puntos seleccionados para evaluar la evolución de las tensiones en el tiempo. b) Curva de respuesta sobre el comportamiento de las tensiones en el tiempo. Fuente: autores

En la figura 7b se muestra el análisis de las tensiones de von Mises en función del tiempo (estudio dinámico), donde se observaron las tensiones evolutivas por cada uno de los nodos seleccionados. El nodo 722249 (donde se encuentra uno de los agujeros de sujeción), muestra el valor máximo de tensiones de von Mises a los 120 segundos del estudio, con una tensión máxima de 51,5 MPa.

Este análisis mostró desde el punto de vista de las ráfagas de viento, cómo ejercen una presión en los diferentes puntos analizados. Se observó que el nodo 722249 alcanzó el valor de tensión máxima. Estas observaciones visualizaron numéricamente, la distribución de tensiones en función del tiempo, lo que permite analizar de una manera más cercana a la realidad, lo que sucede cuando ocurren ráfagas de viento. A diferencia de [8] y [9], las variables de la modelación que se tomaron en cuenta, están contextualizadas a las tipologías constructivas que predominan en estudios previos [1].

Tanto en el análisis estático como en el dinámico, se demostró que en el área cercana a los agujeros de sujeción de las cubiertas metálicas onduladas se concentran los mayores valores de tensiones, constituyendo el punto más débil por donde comienza el fallo de la cubierta. Los resultados muestran que el procedimiento propuesto facilita la toma de decisiones para la búsqueda de soluciones constructivas que minimicen estos efectos. Las soluciones tecnológicas derivadas de esta investigación, pueden favorecer a todas las viviendas con cubiertas ligeras metálicas.

Conclusiones

En los estudios estático y dinámico, se corrobora que en la zona alrededor de los agujeros de la cubierta se concentran los mayores valores de tensiones, y constituye el punto más débil por donde comienza el fallo de la cubierta. Para la serie de vientos analizada, se determinó que el máximo valor de tensión ocurre a los 120 segundos. Se corresponde con el mayor pico de presión en la curva de carga y ocurre en un nodo ubicado en la zona de las sujeciones, afirmándose nuevamente que esta zona constituye el punto más crítico, aun cuando la carga varía en el tiempo. Las soluciones tecnológicas derivadas de esta investigación, pueden favorecer a todas las viviendas con cubiertas ligeras metálicas, lo que, según los datos del último censo de población y viviendas, representan aproximadamente el 33 % del total de viviendas en Cuba. Los resultados muestran que el

procedimiento propuesto facilita la toma de decisiones para la búsqueda de soluciones constructivas que minimicen estos efectos.

Referencias

- Estrada Cingualbres RA, Rodríguez Peña JC, Lengarán Ávila Y, Campos Mobilla S. Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados. *Informes de la Construcción*. 2017;69[547]:e214. DOI 10.3989/id55349
- He J, Pan F, Cai C. A review of wood frame low rise building performance study under hurricane winds. *Engineering Structure*. 2017;141:512–29. DOI 10.1016/j.engstruct.2017.03.036
- Knight RI, Khalid F. Evaluation of the potential of friction surface analysis in modelling hurricane wind damage in an urban environment. *Natural Hazards*. 2015;76[2]:891–911. DOI 10.1007/s11069-014-1527-3
- Fu J, Zheng Q, Wu J, Xu A. Full scale tests of wind effects on a long span roof structure. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2015;14[2]:361–72. DOI 10.1007/s11803-015-0028-z
- Wu C H, Akon AF, Kopp GA. Effects of turbulence on the mean pressure field in the separated reattaching flow above a low rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;171:79–92. DOI 10.1016/j.jweia.2017.09.013
- Womble JA, Wood RL, Mohammadi ME. Multi Scale Remote Sensing of Tornado Effects. *Frontiers in Built Environment*. 2018;4. DOI 10.3389/fbuil.2018.00066
- Whiteman ML, Fernández Cabán PL, Phillips BM, Masters FJ, Bridge JA, Davis JR. Multi Objective Optimal Design of a Building Envelope and Structural System Using Cyber Physical Modeling in a Wind Tunnel. *Frontiers in Built Environment*. 2018;4. DOI 10.3389/fbuil.2018.00013
- Stevenson SA, Kopp GA, El Ansary AM. Framing Failures in Wood Frame Hip Roofs under Extreme Wind Loads. *Frontiers in Built Environment*. 2018;4. DOI 10.3389/fbuil.2018.00006
- Kopp GA. Editorial: Large Scale and Full Scale Laboratory Test Methods for Examining Wind Effects on Buildings. *Frontiers in Built Environment*. 2018;4. DOI 10.3389/fbuil.2018.00025
- Kopp GA, Hong E, Gavanski E, Stedman D, Sills DML. Assessment of wind speeds based on damage observations from the Angus [Ontario]. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2017;44[1]:37–47. DOI 10.1139/cjce.2016.0232
- Doddipatla LS, Kopp GA. Wind loads on roof mounted equipment on low rise buildings with low slope roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;211:104552. DOI 10.1016/j.jweia.2021.104552
- Amador M, Fernández Lorenzo I, López Llanusa A, Elena Parnás V. Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales. *Ingeniería y Desarrollo*. 2021;39[2]:296–314. DOI 10.14482/inde.39.2.725.4
- Guo Y, Wu C H, Kopp GA. A method to estimate peak pressures on low rise building models based on quasi steady theory and partial turbulence analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;218:104785. DOI 10.1016/j.jweia.2021.104785
- Zhao S, Ge Y, Kopp G. Assessment of gust factors and wind speed decomposition methods for thunderstorms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022;223:104953. DOI 10.1016/j.jweia.2022.104953
- Rudyk OY, Shepilo OV, editors. Computer simulation of the electrohydraulic lift with the help SolidWorks Simulation. In: 10th International scientific and practical conference; London, United Kingdom: Cognum Publishing House; 2021. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10268>
- Asgher U, Ruiz JA, Gutiérrez Gualotuña ER, Ayaz Y, Sajid M, Khalil K, et al. AHFE [1] Mathematical Modeling and Optimization of Downdraft Gasifiers Using Artificial Neural Networks [ANN] and Stochastic Programming Techniques. Springer International Publishing; 2020. DOI 10.1007/978-3-030-51041-1_50

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Anabel Reyes Ramírez. <https://orcid.org/0000-0001-5735-4115>

Organizó y estructuró el trabajo. Realizó la revisión bibliográfica y toma de los datos. Desarrolló el procedimiento propuesto, participó en la realización de la modelación CAD-FEM, y procesamiento de los resultados. Participó en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final

Roberto Andrés Estrada Cingualbres. <https://orcid.org/0000-0002-0616-3201>

Participó en la interpretación de resultados CAD-FEM y CAD-CFD, así como en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.

Julio Ernesto de la Rosa-Melián. <https://orcid.org/0000-0002-4299-3648>

Participó en la toma de los datos, realización de la modelación CAD-CFD, procesamiento de los resultados, así como en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.

Roberto Pérez Rodríguez. <https://orcid.org/0000-0001-5741-5168>

Participó en la revisión bibliográfica, diseño de la investigación, en la revisión crítica del contenido, en la redacción y aprobación del trabajo final.