

Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados

Mitigation of the collapse of asbestos cement light covers by hurricane winds

R. A. Estrada Cingualbres (*), J. C. Rodríguez Peña (**), Y. Lengarán Ávila (***), S. Campos Mobilla (***)

RESUMEN

La región del Caribe, el Golfo de México y el Estrecho de la Florida es una zona de alta vulnerabilidad ante huracanes de altas categorías. Las cubiertas ligeras son los elementos más vulnerables durante la ocurrencia de estos fenómenos, su colapso genera un gran peligro para la vida de los habitantes de estas viviendas, así como un alto impacto económico y social en las mismas y en obras sociales e industriales. El objetivo de esta investigación ha sido la caracterización de las cubiertas ligeras de fibrocemento (amianto-cemento) más utilizadas en Cuba y, a través de la modelación por el Método de los Elementos Finitos, determinar las causas del colapso de éstas cuando ocurren vientos extremos producidos por huracanes de alta intensidad, realizar el análisis comparativo del comportamiento resistivo de las cubiertas estudiadas y mitigar el colapso de las mismas.

Palabras clave: elementos finitos; cubiertas ligeras; huracán; vientos; fibrocemento.

ABSTRACT

The Caribbean region, the Gulf of Mexico and the Strait of Florida, is an area of high vulnerability to high-level hurricanes. Light covers are the most vulnerable during the occurrence of these phenomena, their collapse generates a great danger to the life of the residents of these homes, as well as a high economic and social impact. The objective of this research has been the characterization of the lightweight fiber cement roofs (asbestos-cement) most commonly used in Cuba and through the modeling of the Finite Element Method to determine the causes of the collapse of these when extreme winds occur due to high intensity hurricanes, perform the comparative analysis of the resistive behavior of the covers studied and to mitigate the collapse of the covered ones.

Keywords: finite elements; light covers; hurricane; winds; asbestos cement.

(*) Centro de Estudios CAD/CAM, Universidad de Holguín. Holguín (Cuba).

(**) Empresa Nacional de Proyectos de la Agricultura. Holguín (Cuba).

(***) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Holguín. Holguín (Cuba).

Persona de contacto/Corresponding author: roberto@uho.edu.cu (R. A. Estrada Cingualbres)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0616-3201> (R. A. Estrada Cingualbres); <http://orcid.org/0000-0001-6212-3960>

(J. C. Rodríguez Peña); <http://orcid.org/0000-0002-8478-7052> (Y. Lengarán Ávila);

<http://orcid.org/0000-0001-6521-0218> (S. Campos Mobilla).

Cómo citar este artículo/Citation: Estrada Cingualbres, R. A., Rodríguez Peña, J. C., Lengarán Ávila, Y., Campos Mobilla, S. (2017). Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados. *Informes de la Construcción*, 69(547): e214, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/id55349>.

Copyright: © 2017 CSIC. **Licencia / License:** Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Attribution License (CC BY) Spain 3.0.

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 (ver Figura 1).

El Centro de Estadísticas de la Provincia Holguín, Cuba, en el Censo de Población y Vivienda (CPV) realizado en el año 2012 muestra que el 512% de las viviendas de la provincia tienen cubiertas ligeras, de ellas la mayor parte están constituidas por tejas de fibrocemento. Una situación semejante se presenta para el resto del país con un menor por ciento en La Habana, capital de Cuba.

Para disminuir el riesgo al que están sometidas las cubiertas ligeras es necesario realizar investigaciones encaminadas a estudiar los factores que inciden en la baja resistencia que tienen estos elementos ante sucesos de esta naturaleza, lo cual permitirá llegar a conocer las causas que originan los elevados índices de vulnerabilidad y proponer soluciones para mitigar el impacto sobre las mismas.

Varios son los trabajos donde se aplica el análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF) para el estudio del comportamiento resistivo de elementos estructurales. En Calzadilla *et al.* (1) (2), por ejemplo, se realiza el estudio numérico para determinar la vulnerabilidad de la estructura de una casa de cultivo utilizada en Cuba cuando actúan vientos de un huracán de alta categoría. En Ocampo *et al.* (3) se aplica de igual forma el MEF al análisis de la estructura de una casa de cultivo utilizada en Veracruz, México, donde se obtienen los esfuerzos y deformaciones más críticos en la estructura debido a las diferentes cargas que actúan sobre la misma.

Uno de los aspectos importantes que se manejó en el desarrollo de esta investigación estuvo relacionado con la acción del viento. Son varias las investigaciones relacionadas sobre esta temática, en Fabrè *et al.* (4) se muestra una recopilación estadística de las características aleatorias del viento con vistas a considerar sus efectos de carga sobre estructuras esbeltas. En Payán *et al.* (5) se estudian diversos modelos de densidad espectral de potencia del viento con la finalidad de generar series de tiempo apropiadas para el análisis dinámico estructural.

En las últimas décadas los ordenadores de alta capacidad de proceso y sofisticados programas de simulación han permitido a los investigadores producir modelos numéricos capaces de describir, con alto nivel de exactitud, el comportamiento de los vientos extremos. Estos avances permitieron la aparición de lo que hoy se conoce como «Computational Wind Engineering» (CWE), que no es más que la aplicación de métodos computacionales para estudiar y resolver los problemas relativos a la ingeniería del viento. A finales de los años ochenta se logran importantes avances utilizando métodos basados en (CFD) «Computational Fluid Dynamics» como parte esencial dentro de (CWE). Ejemplos de aplicaciones fueron los desarrollados por investigadores como Murakami, 1992; Larsen y Tamura, 1997 y Mochida, 2002 (6). Con estos modelos fue posible la obtención de valores de fuerzas del viento, su interacción con las estructuras, incluso con formas oblicuas, así como la evaluación de la distribución espacial de la energía del viento. Estos estudios sentaron las bases para la verificación y validación de futuros modelos numéricos.

El objetivo general de la presente investigación ha sido la determinación de las causas que provocan el colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento, así como la comparación de las características de las variables másico-geométricas y resistivas que identifican las mismas, empleadas para cubrir las viviendas y obras industriales en la ciudad de Holguín, similares a las utilizadas en el resto del país, determinándose cuales de ellas tienen mejores características resistivas y cuales pueden tener mayor vulnerabilidad al accionar de las ráfagas de los vientos huracanados, generándose un procedimiento para mitigar el efecto de éste.



Figura 1. Impacto de los huracanes sobre las cubiertas ligeras de fibrocemento en las provincias del oriente cubano.

2. MATERIALES Y METODOS

En Cuba las cubiertas que se utilizan son disímiles en función de distintos factores que pueden ser desde el desarrollo económico y social de cada lugar hasta los materiales disponibles que se tengan en la localidad. Entre las cubiertas ligeras del tipo plancha más empleadas se destacan las de fibrocemento, las cuales adoptan distintas formas y dimensiones.

Se resaltan en (7) (8) (9) un conjunto de variables muy importantes que caracterizan las cubiertas ligeras, entre las que se destacan: los materiales, formas y dimensiones, uniones, los elementos de fijación y su geometría, así como el proceso tecnológico de fabricación y colocación en la vivienda.

Los materiales constituyen un elemento fundamental de una cubierta, los cuales le ofrecen resistencia, durabilidad, confort, impermeabilidad, aislamiento térmico y peso reducido, entre otros aspectos.

2.1. Particularidades del empleo de las cubiertas ligeras en viviendas y obras industriales en la ciudad de Holguín

En la Tabla 1 se aprecia la composición de las viviendas (según su cubierta) para Cuba, la provincia y el municipio capital Holguín y dentro de éste el Consejo Popular del cual se tomarán las muestras.

Para la determinación del tamaño de la muestra se utilizó el muestreo aleatorio probabilístico con la siguiente expresión:

$$n = \frac{4 \cdot p \cdot q \cdot N}{d^2 \cdot (N - 1) + 4 \cdot p \cdot q}$$

Para una confiabilidad del 95%:

$$n = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1.936}{(0,1)^2 \cdot (1.936 - 1) + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 96$$

donde:

p = 0,5 - probabilidad de éxito.

q = 0,5 - probabilidad de fracaso.

d = 0,1 - error máximo permisible.

N = 1.936 - tamaño de la población, total de viviendas con cubiertas ligeras de fibrocemento y metálicas en el Consejo Popular seleccionado.

La cantidad de viviendas con cubiertas de fibrocemento y metálicas se determina mediante las expresiones:

$$ne = n \left(\frac{Ne}{N} \right)$$

donde:

ne - tamaño de la muestra en el estrato.

Ne - tamaño del estrato.

Estrato 1 (viviendas con cubiertas de fibrocemento):

$$ne = 96 \left(\frac{1.344}{1.936} \right) = 66$$

Estrato 2 (viviendas con cubiertas metálicas):

$$ne = 96 \left(\frac{596}{1.936} \right) = 30$$

A su vez se seleccionaron las tres obras industriales de mayor importancia económica en el Consejo Popular: Unidad Empresarial Básica (UEB), Bebidas y Refrescos (EMBER), la UEB Ómnibus Urbano y la Dirección Municipal de UMBRALES, todas con cubiertas ligeras.

Se realizó una selección aleatoria de las muestras y de las 96 viviendas visitadas se obtuvo que la mayoría (66) usan planchas de fibrocemento del tipo onduladas de 5,5 mm y en menor cuantía del tipo canalón de 7,0 mm. Estas planchas con sus parámetros geométricos y propiedades físico-mecánicas de los materiales que la componen son objeto de estudio en este trabajo a través de la modelación numérica por elementos finitos.

2.2. Estudio de la resistencia de las planchas de fibrocemento componentes de las cubiertas ligeras

El Método de los Elementos Finitos es ampliamente usado en la actualidad en diferentes aplicaciones del análisis estructural con el fin de determinar el estado tensional-deformacional de los elementos que conforman la estructura sin importar el grado de complejidad de la misma y teniendo en cuenta inclusive, los concentradores de tensiones que puedan existir en ésta (10) (11).

2.2.1. Confección de los modelos geométricos de las cubiertas ligeras

Para la confección del modelo geométrico de las diferentes tejas objeto de estudio se tuvieron en cuenta las formas y dimensiones de la sección transversal de las mismas, según la Norma Cubana correspondiente (8). El modelo geométrico

Tabla 1. Composición de las cubiertas de las viviendas en Cuba y el territorio de Holguín (datos del CPV-2012).

Lugar	Total de viviendas	Viviendas con cubiertas ligeras	%	Cubierta de fibrocemento	Cubierta metálica
Cuba	3.620.152	1.650.491	45,6	788.770	412.114
Provincia de Holguín	331.452	169.226	51,0	77.105	52.758
Municipio de Holguín	115.932	32.499	28,0	16.218	8.735
Consejo Popular Distrito Lenin	12.148	2.615	21,5	1.340	596

de la teja acanalada de fibrocemento (Figura 2) se obtuvo a través de una operación de extrusión de la curva que define su sección transversal, posteriormente a través de una operación de extruir corte se perforan los agujeros correspondientes a la sujeción de las tejas. En el caso de las tejas del tipo canalón de fibrocemento se procedió de igual manera (ver Figura 3).

2.2.2. Selección del tipo de análisis

Cuando se aplican cargas a un sólido, éste se deforma y el efecto de las cargas se transmite a través del mismo. Las cargas externas inducen fuerzas internas y reacciones para mantener el sólido en un estado de equilibrio. El análisis estático lineal calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de las cargas aplicadas.

En esta investigación se supone que los modelos tienen un comportamiento lineal. Todos los materiales del modelo cumplen con la Ley de Hooke, los desplazamientos inducidos son lo suficientemente pequeños como para ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga. Las condiciones de contorno no varían durante la aplicación de las cargas. Las cargas aplicadas serán constantes en cuanto a magnitud, dirección y distribución, no deben cambiar mientras se deforma el modelo.

2.2.3. Asignación de las propiedades físico - mecánicas de las cubiertas

A partir de *Guardia et al.* (12) se obtienen las propiedades mecánicas del fibrocemento, las que aparecen en la Tabla 2. Se asumió un modelo constitutivo isotrópico elástico lineal, característico de dicho material.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las cubiertas de fibrocemento.

Nomenclatura	Denominación	Valor
E (Pa)	Módulo elástico	2,4 e + 010
μ	Coefficiente de Poisson	0,15
ρ (kg/m ³)	Densidad	1.400
σ_{ft} (MPa)	Resistencia a la flexotracción	30

2.2.4. Cálculo de la carga de viento extremo

En diversos trabajos se considera al viento como magnitud variable en dos escalas, una macro, donde se analiza su comportamiento en minutos, horas días, y otra micro para el análisis en pocos segundos (13).

En este trabajo se realizará un estudio con las cargas estáticas ponderadas por diferentes coeficientes que originan el valor máximo de la carga instantánea actuante.

Las cargas introducidas al modelo son las de viento correspondiente al límite inferior de los huracanes de quinta categoría, con vientos de 250 km/h (69,44 m/s). Para ello se utilizó la Norma Cubana 285-2003 (14).

La carga del viento se determina a partir de la expresión

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f$$

donde:

- q_{10} - presión básica del viento.
- C_t - coeficiente de recurrencia.
- C_s - coeficiente de topografía o sitio.

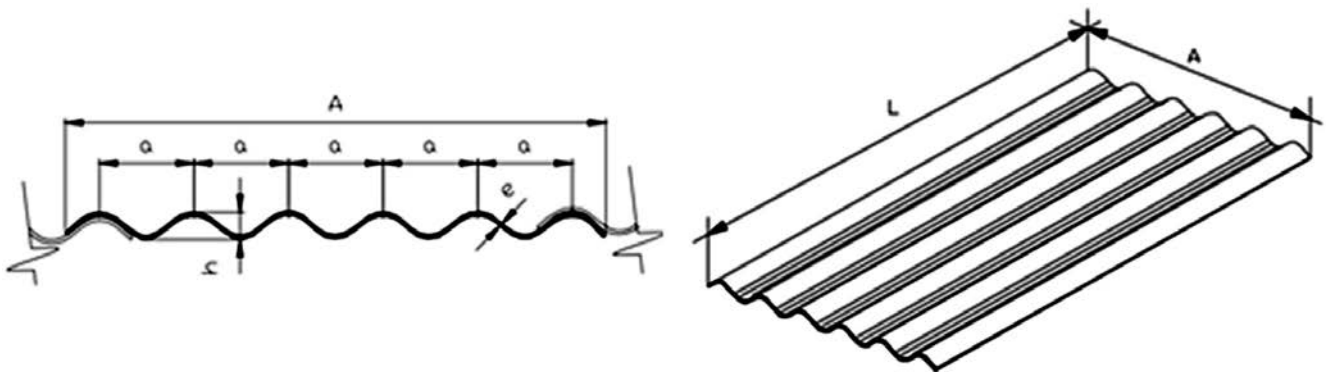


Figura 2. Modelo geométrico de la plancha acanalada de fibrocemento (7).

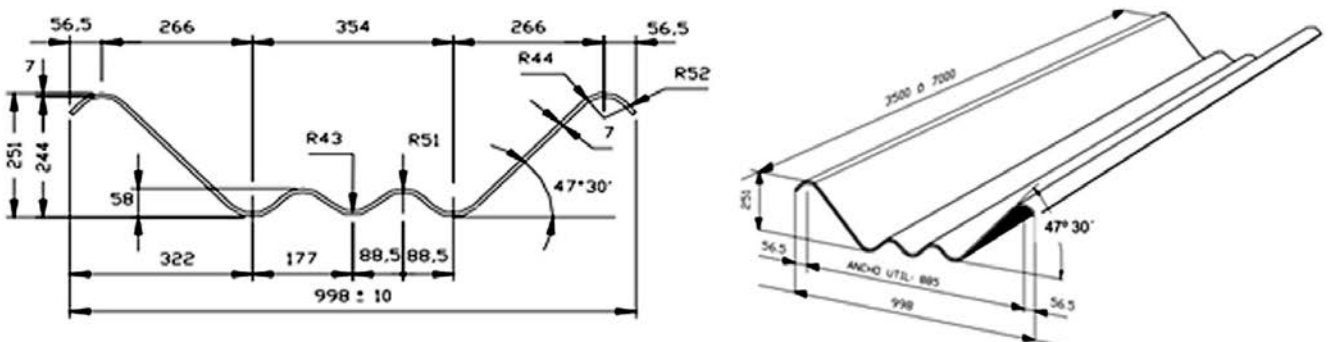


Figura 3. Modelo geométrico de la plancha de fibrocemento tipo canalón (7).

C_h - coeficiente de altura.
 C_r - coeficiente de ráfaga.
 C_{ra} - coeficiente de reducción por área expuesta.
 C_f - coeficiente de forma.

Se tuvieron en cuenta los valores críticos de los diferentes coeficientes a partir de condiciones que produzcan cargas de succión, que son las más peligrosas.

Presión básica del viento

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1,6 \cdot 10^3}$$

donde:

V_{10} - velocidad característica del viento para un periodo básico de recurrencia y a una altura de 10 m sobre el terreno (m/s).

1,6 - factor empírico.

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1,6 \cdot 10^3} = \frac{(69,44 \text{ m/s})^2}{1,6 \cdot 10^3} = 3 \text{ kN/m}^2$$

Coefficiente de recurrencia (C_r)

La velocidad básica del viento se toma con un periodo básico de recurrencia de 50 años para todas las estructuras permanentes y que además presenten características normales de sensibilidad al viento, importancia económica y duración, se obtiene un valor de 1 para el mismo.

Coefficiente de sitio (C_s)

La influencia de caracteres topográficos definidos permite variar la presión mediante el coeficiente de topografía o sitio. Se considera un sitio normal en este trabajo, por lo que es igual a 1.

Coefficiente de altura (C_h)

Para determinar C_h es necesario conocer el tipo de terreno en el que se está trabajando. En este caso el coeficiente de altura C_h es igual a 0,48 porque la altura de ninguna de las construcciones excede los 5 m.

Coefficiente de ráfaga (C_r)

Los coeficientes de ráfagas (C_r) son empleados para tener en cuenta la naturaleza fluctuante de los vientos y su interacción con edificaciones y otras construcciones. Para el cálculo de elementos aislados, ventanas, paneles de fachada (fenestración) se determinará el coeficiente de ráfaga C_r (Z) evaluando para la altura sobre el terreno a la cual se encuentra ubicado el elemento o panel que se está analizando en la estructura, como la altura objeto de estudio es menor de 10 m, C_r será igual a 1,46.

Coefficiente de reducción por área expuesta (C_{ra})

Las presiones del viento que actúan sobre los elementos constituyentes de una edificación u obra (paneles, vigas, columnas y otros) deben ser afectadas por un coeficiente de reducción en función de la mayor dimensión (horizontal o vertical) de la superficie o área expuesta a la que el viento actúa o transmite

carga sobre el elemento considerado. Para una longitud de 12 m de la construcción objeto de análisis con un ancho de 36 m, correspondiente a una nave industrial, el coeficiente C_{ra} tendrá un valor de 0,76.

Coefficientes de forma (C_f)

Las presiones básicas del viento están afectadas por el coeficiente de forma o aerodinámico (C_f), el cual tiene en cuenta la forma, los volúmenes, el ángulo de las superficies expuestas al viento, es decir, el carácter aerodinámico de la estructura. El estudio se realiza para cubiertas a dos aguas por ser las de mayor uso. Se obtiene a partir de la relación de la altura y el ancho respecto a la longitud de la construcción teniendo en cuenta además el ángulo de la pendiente de la cubierta. Para el caso objeto de estudio en esta investigación con el largo y ancho antes planteado y un ángulo de 20 grados en la pendiente de la cubierta, se obtiene un valor del coeficiente de forma igual a -0,67.

El valor de la carga del viento extremo para un huracán de quinta categoría con las características antes planteadas será igual a:

$$q = 1,38 \text{ kN/m}^2$$

2.2.5. Aplicación de las restricciones a los desplazamientos en los puntos de sujeción de las planchas

En ambos modelos las restricciones se colocaron en el lugar donde van ubicados los tornillos, seleccionándose la sujeción radial en el interior de los agujeros y en la ubicación de la arandela se limitan los desplazamientos en el eje vertical, simulando las sujeciones de la plancha cuando se encuentra sometida a succión (estado de carga más crítico).

2.6. Mallado de las planchas

Se realizó un mallado general en las planchas utilizando elementos finitos tipo tetraédrico de alto orden con 10 nodos y 3 grados de libertad por nodo, con un tamaño de elementos inicial de 20 mm, luego 15 mm, hasta disminuir a 5,5 mm y 7 mm para el modelo de la plancha acanalada y la del tipo canalón, respectivamente, y una tolerancia de 0,3 mm para el mallado global, con un control en el mallado en los agujeros y en la superficie correspondiente al contacto con la arandela, lugar donde van ubicadas las sujeciones con un tamaño del elemento de 0,5 mm con un cociente de crecimiento de 1,1, alcanzándose una convergencia de 2,3 %, obteniéndose finalmente un mallado con 2.064.656 nodos y 1.248.251 elementos para la plancha de fibrocemento ondulada y 3.766.994 nodos y 2.114.641 elementos para la del tipo canalón.

En la Figura 4 puede apreciarse el modelo numérico de la plancha acanalada de fibrocemento con las cargas actuantes (en rojo), las sujeciones (en verde) y el mallado aplicado al modelo.

3. RESULTADOS

3.1. Determinación de las tensiones producto a la carga equivalente máxima

La modelación de una cubierta completa requiere de altos recursos computacionales, por otra parte no existe un límite en cuanto a las dimensiones que pueda tener una obra industrial

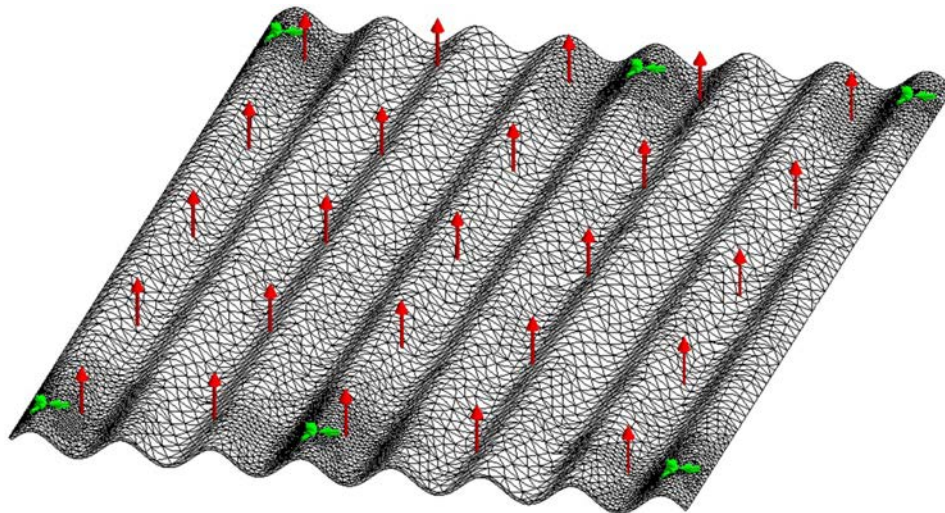


Figura 4. Modelo numérico de la plancha acanalada de fibrocemento.

o social y de la cantidad de tejas o planchas que llevará la cubierta, surge, por tanto, la necesidad de comparar los resultados del estado tensional para varias tejas y en caso de obtenerse resultados similares, podrá trabajarse en lo adelante con una plancha con el ahorro computacional que esto representa.

Para realizar la comparación del estado tensional para una cantidad diferente de tejas se realizó la simulación de: una, dos, tres y cuatro planchas, respectivamente (ver Figura 5). La forma 1 consiste en ensamblar las planchas de forma transversal a la onda (a lo largo de la magnitud A en la Figura 2 hasta 4 × 1 planchas), la forma 2 ensamblándolas de forma longitudinal a la onda (a lo largo de la magnitud L en la Fi-

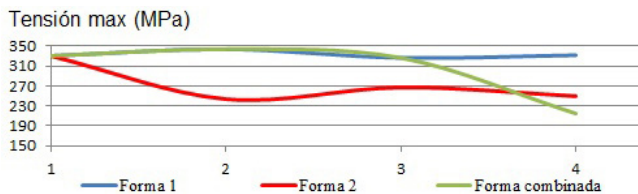


Figura 5. Tensiones principales en los modelos de cubiertas con plancha acanalada de fibrocemento.

gura 2 hasta 1 × 4 planchas), en el caso de cuatro planchas existe la posibilidad además de combinar las dos primeras formas ensamblando de manera que se encuentran ubicadas las planchas en un mismo ensamble transversal y longitudinal a la onda (ensamblaje de 2 × 2 planchas).

Puede apreciarse en la gráfica de la figura como los resultados de las tensiones principales para un número diferente de planchas con variadas disposiciones muestra una tendencia lineal con cierto decrecimiento, lo que se justifica, ya que al realizar el montaje de las cubiertas con varias tejas el área total expuesta de la cubierta disminuye con el ensamblaje, por lo que al actuar la misma presión la carga total actuante es un tanto menor. Puede, por tanto, trabajarse con una sola plancha como estado más crítico en el montaje de la cubierta ligera.

En la Figura 6 se muestra la distribución de las tensiones principales en la teja acanalada de fibrocemento.

En la Tabla 3 aparecen los resultados de las tensiones principales máximas y el coeficiente de seguridad (en base al límite de resistencia del fibrocemento de 30 MPa) para ambos modelos de tejas.

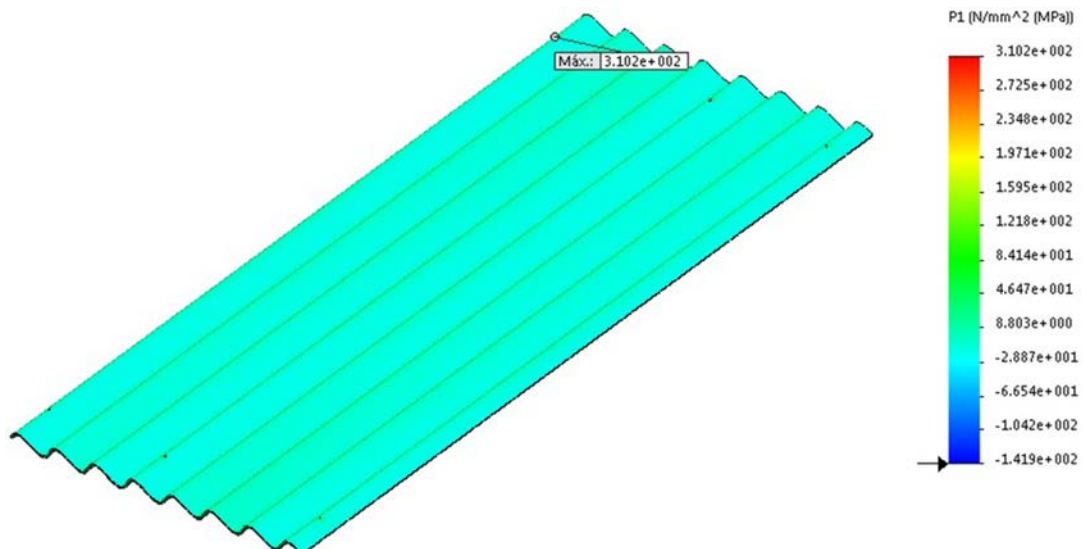


Figura 6. Distribución de las tensiones principales en la teja acanalada de fibrocemento.

Tabla 3. Comparación entre las tensiones principales en las planchas para una velocidad del viento de 250 km/h.

Tipo de plancha	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Tensión principal (MPa)	Factor de seguridad
Acanalada de fibrocemento	5,5	1.750	1.130	310,2	0,09
Canalón de fibrocemento	7,0	7.000	1.008	594,5	0,05

En la Figura 7 se muestra la distribución de las tensiones en la plancha acanalada para la zona donde las mismas superan el límite de resistencia a tracción del fibrocemento. Una situación similar ocurre en la teja tipo canalón. En ambos casos la zona de tensiones por encima de este parámetro se localizan en una pequeña área alrededor de los agujeros y la arandela de sujeción.

3.2. Simulación del proceso de colapso de las planchas ante la carga extrema

Para simular el proceso de colapso de las tejas cuando actúan vientos de 250 km/h se procedió a suprimir las restricciones

en aquellos agujeros donde ocurrían las tensiones máximas que superaban el límite de resistencia de fibrocemento; en estudios consecutivos se continuaron suprimiendo las restricciones en los nuevos agujeros donde aparecían entonces las tensiones máximas. En la Figura 8 puede apreciarse la distribución de las tensiones por encima de los 30 MPa en la teja acanalada de fibrocemento al fallar la sujeción en un agujero, mientras que en la Figura 8 se aprecia la zona donde las tensiones superan el valor de tensiones mencionado cuando han fallado dos sujeciones en los agujeros de anclaje de las tejas. En ambos casos puede apreciarse la región en color azul distintiva de la zona donde las tensiones superan los 30 MPa; puede apreciarse el aumento de esta región a medida que van fallando más agujeros.

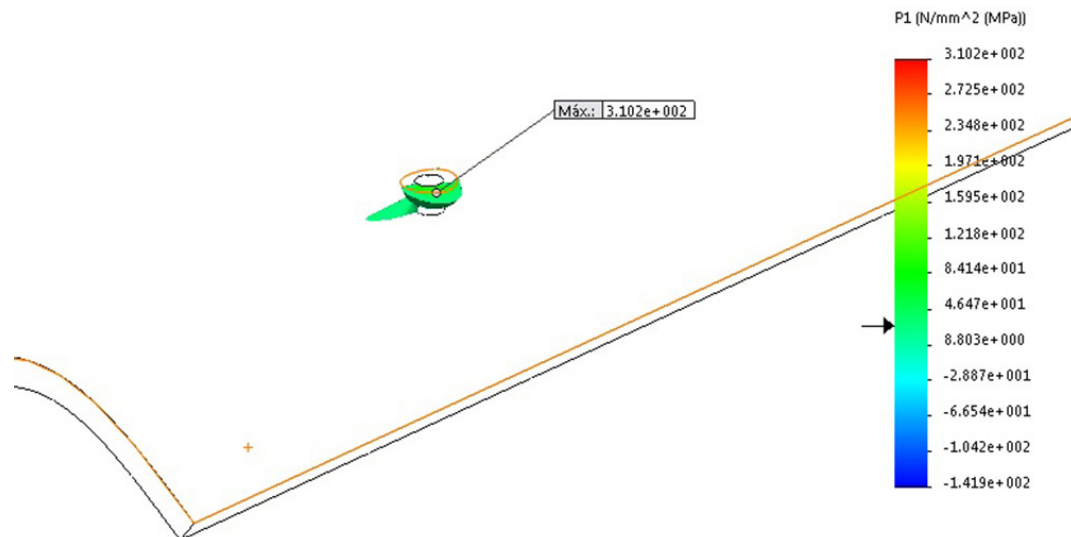


Figura 7. Distribución de las tensiones principales en las zonas por encima a 30 MPa en la teja acanalada de fibrocemento.

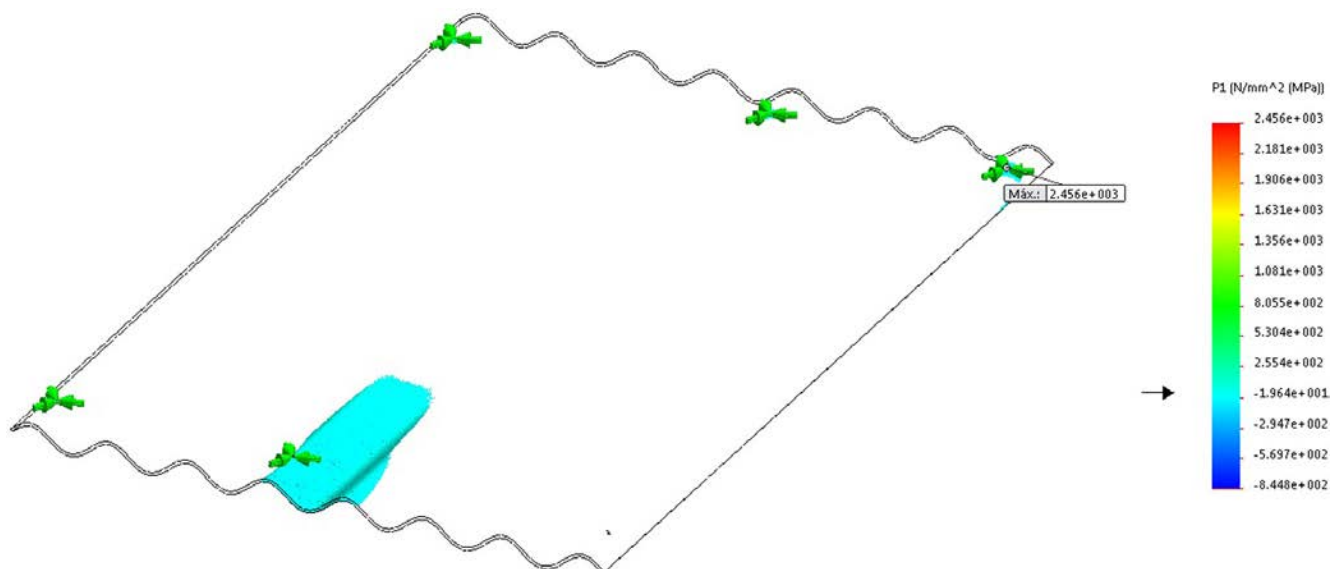


Figura 8. Distribución de las tensiones principales en las zonas por encima a 30 MPa al fallar la sujeción en el primer agujero.

4. DISCUSIÓN

Como puede apreciarse en la Tabla 1, en Cuba el 45,60 % de las viviendas poseen cubiertas ligeras, de ellas el 65,68 % son de fibrocemento del tipo acanalada fundamentalmente y del tipo canalón en segundo orden. En su gran mayoría las cubiertas de los almacenes de variados productos y obras industriales, así como diversos centros sociales poseen este tipo de cubierta por ser económica y fácil de montar, sin embargo es alta la vulnerabilidad de las mismas ante la ocurrencia de huracanes de mediana y alta intensidad.

Según la Figura 6 y la Tabla 3 se aprecia que ninguno de los dos tipos de tejas es capaz de soportar el embate de un huracán con vientos de 250 km/h al producirse presiones de succión, siendo peor el comportamiento de las tejas tipo canalón.

En la Figura 7 puede apreciarse que las zonas donde ocurren los valores máximos de las tensiones que superan el límite a tracción del fibrocemento se hallan alrededor de la sujeción de la arandela con el tornillo que fija la teja en su parte superior a las vigas o *purling*, al actuar las cargas de succión éstas provocan grietas en esta zona y el posterior colapso de la cubierta.

Al simular el proceso de colapso de las planchas se aprecia en las Figuras 8 y 9, para el caso de las tejas acanaladas de fibrocemento, como la zona donde las tensiones superan el límite de resistencia del fibrocemento (de color azul) aumenta, llegando a atravesar prácticamente toda la teja, en ese instante la teja de fibrocemento se desprenderá o como ocurre frecuentemente se fracturará sobre la cubierta.

4.1. Procedimiento para la sujeción temporal antihuracán de cubiertas ligeras de fibrocemento onduladas

Se implementa un procedimiento para la sujeción temporal durante la ocurrencia de huracanes de cubiertas ligeras de

fibrocemento onduladas, el que consiste en la colocación a presión moderada de cintas de polipropileno de 65 mm de ancho y 2 mm de espesor. Todas las cintas quedarán fijadas a sujeciones colocadas en las paredes del inmueble cuando sea conveniente o sujeciones fijadas al suelo aledaño del inmueble (Figura 10a). Se asumen restricciones verticales nulas producto a la colocación de la cinta en el área de contacto de ésta con la plancha. Se realiza el análisis de las tensiones en las planchas al colocar las cintas en varias posiciones: longitudinalmente a lo largo de la onda en el medio sobre cada plancha, modelo en el cual las tensiones principales máximas alcanzan un valor de 209 MPa, esta sujeción no satisface la condición de resistencia; tres cintas longitudinales, colocadas 2 de ellas sobre los puntos de sujeción y una en el medio de la plancha, en este modelo las tensiones principales máximas alcanzan un valor de 39,76 MPa, con una mejora sustancial pero superior aún a la resistencia de la plancha de fibrocemento; tres cintas colocadas de manera transversal a la plancha dos en sesiones aledañas a los puntos de sujeción y una intermedia entre estos puntos, se midió experimentalmente la huella de contacto de la cinta con las ondas de la cubierta con las que hace contacto, para este caso las tensiones principales máximas en las planchas alcanzan un valor de 9,74 MPa (Figura 10b), lo que garantiza la resistencia de las planchas ante vientos huracanados de 250 km/h.

5. CONCLUSIONES

1. En Cuba, según el Censo de Población y Viviendas de 2012, el 45,60 % de las viviendas poseen cubiertas ligeras, de ellas el 72,76 % son de fibrocemento o metálicas y de éstas el 65,68 % son del tipo acanaladas de fibrocemento de 5,5 mm de espesor y del tipo canalón de 7 mm.
2. Se lograron obtener modelos de elementos finitos adecuados para las estructuras estudiadas.
3. El análisis numérico ejecutado evidenció que las planchas de fibrocemento utilizadas hoy en día en las cubiertas de las viviendas, obras industriales y sociales son incapaces de soportar el embate de un huracán de categoría 5 con vientos a partir de 250 km/h.

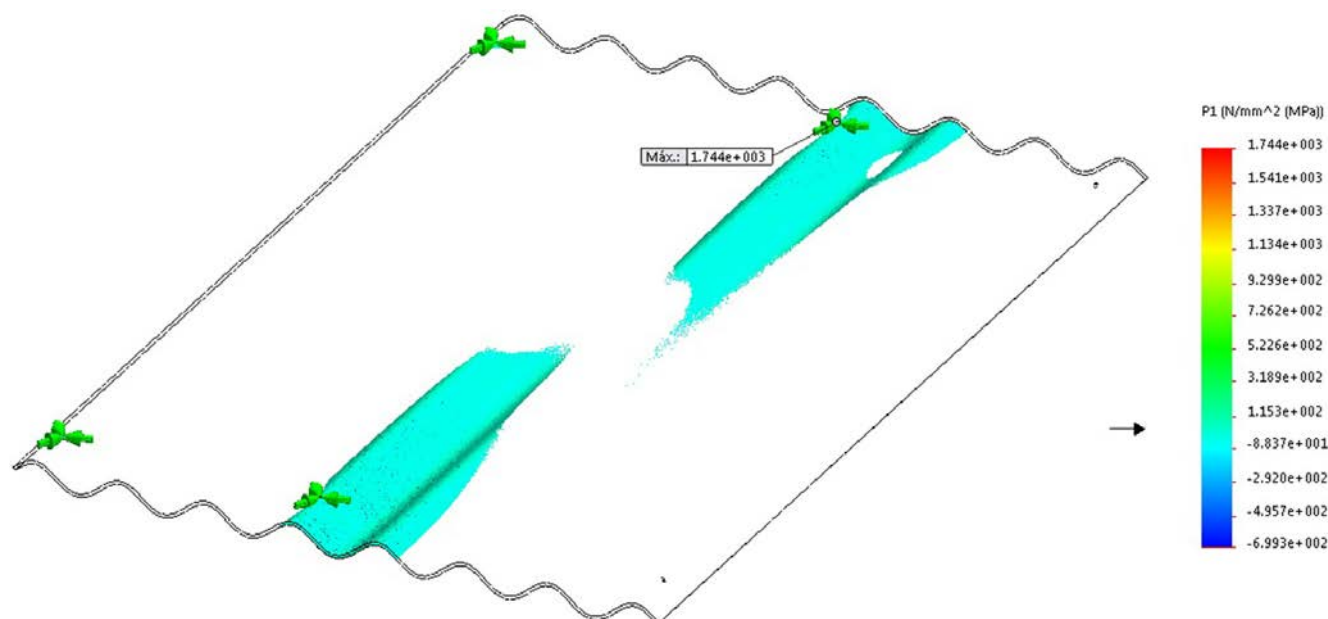


Figura 9. Distribución de las tensiones principales en las zonas por encima a 30 MPa al fallar las sujeciones en dos agujeros.

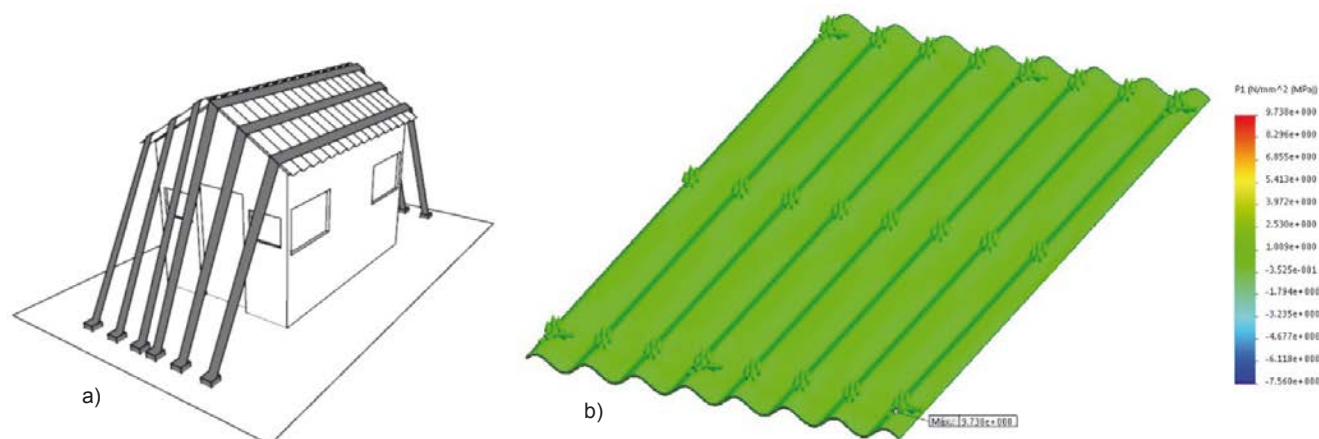


Figura 10. a) Procedimiento para mitigar el impacto sobre las cubiertas; b) distribución de las tensiones principales en la teja acanalada de fibrocemento con tres cintas transversales.

4. El proceso de colapso de las planchas se produce por deformaciones inadmisibles en la zona de sujeción, lo que conlleva al desprendimiento y/o la fragmentación de éstas cuando actúan las cargas de succión.
5. La colocación temporal de tres cintas transversales a las planchas disminuye las tensiones a 9,74 MPa, lo que garantiza la resistencia de éstas durante el embate de un huracán con vientos de 250 km/h (huracán de categoría 5).

REFERENCIAS

- (1) Calzadilla, D. H., Pérez, P. R., Estrada, C. R. A., Gómez, G. E. (2007). Análisis numérico de la estructura metálica del modelo de casa de cultivo EMBA-MSC (Parte I, análisis resistivo de la estructura). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(003): 53-57.
- (2) Calzadilla, D. H., Pérez, P. R., Estrada, C. R. A., Gómez, G. E. (2007). Análisis numérico de la estructura metálica del modelo de casa de cultivo EMBA-MSC (Parte II: análisis dinámico de la estructura). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4): 1-5.
- (3) Ocampo, R. A., Hernández, G. L., Fernández, V. D., Cervantes, B. R. (2014). Análisis estático de los esfuerzos y deformaciones de la estructura de un Invernadero tipo Ventila Cenital ubicado en Veracruz. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(04): 10-16.
- (4) Fabrè, C., Sánchez, M., González, M., García, E., Wellesley, J. (2006). Fundamento estadístico del efecto aleatorio del viento para el cálculo de estructuras delgadas. *Ingeniería Mecánica*, 9 (002), Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/153>.
- (5) Payán, S. O. J., Bojórquez, M. E., Reyes, S. A. (2014, 27 de noviembre). Simulación de la componente longitudinal del viento por representación Espectral y el análisis dinámico en edificios de cortante. En *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- (6) Baniotopoulos, C., Borri, C., Stathopoulos, T. (Eds.) (2011). *Environmental wind engineering and design of wind energy structures*, Vol. 531. Springer Science & Business Media.
- (7) Normalización, O. N. d. (2002). *NC-206-2002. Norma Cubana. Láminas acanaladas de fibrocemento y sus piezas accesorias. Especificaciones y métodos de ensayo*.
- (8) Normalización, O. N. d. (2006). *NC-431-2006. Norma Cubana. Código de buenas prácticas para la ejecución de cubiertas con canalón de fibrocemento y sus piezas accesorias*.
- (9) Normalización, O. N. d. (2006). *NC-432-2006. Norma cubana. Código de buenas prácticas para la ejecución de cubiertas con láminas acanaladas y piezas accesorias de fibrocemento*.
- (10) Ferrer, G. C., Ferrán, G. J. J., Torregrosa, S. J., Sánchez, R. F., Redón, S. M., Pérez, S. M. (2016). Contribución al estudio de espesores de soleras de hormigón para cargas de estanterías mediante elementos finitos. *Informes de la Construcción*, 68(543): e154, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.093>.
- (11) Estrada, C. R. A., Ricardo, A. C., Pérez, P. R. (2013). Análisis dinámico del mecanismo paralelogramo del cortacogollo desfibrador para la cosechadora cañera cubana CCA-5000. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(001), 05-11.
- (12) Guardia, P. Y., Rodríguez, P. S., Pacheco, G. R., Ramos, B. Y., Palma, R. L. (2015). Análisis estructural de un bioreactor anaerobio de fibrocemento por el método de los elementos finitos. *Ingeniería Mecánica*, 18(3): 21-28.
- (13) Francisco, G. L., Amaya, O., Coz, M., Durán, L., Peraza, C., Arteaga, F., Villanueva, C. (2007). Modelación y simulación de la velocidad de viento por medio de una formulación estocástica. *Revista Ingeniería UC*, 14(3): 7-15.
- (14) Normalización, O. N. d. (2013). *NC 285-2013. Norma Cubana. Cálculo de las cargas del viento*.

* * *