



Resistencia al viento de tejas de fibrocemento y compuesto de poliéster y fibra de vidrio

Resistance to wind of light covers of fiber cement and composite of polyester and fiberglass

Roberto Andrés Estrada-Cingualbres^{1, *}, José Costa de Macedo-Neto^{II},
Darbens Silvio Correia-Junior^{II}, Pavel Michel Almaguer-Zaldivar^I, Josiel Bruno-de Oliveira^{II}

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

II. Universidad del Estado Amazonas, Coordinación de Ingeniería de Materiales. Manaus, Brasil

*Autor de correspondencia: cingualbres2005@gmail.com

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



Recibido: 25 de febrero de 2020

Aceptado: 24 de abril de 2020

Resumen

El asbesto cemento es un material utilizado en la producción de tejas para cubiertas ligeras. Se ha demostrado que es altamente tóxico y cancerígeno por lo que se necesita obtener nuevos materiales que no presenten esta problemática, con características físico-mecánicas iguales o superiores, que puedan ser utilizados en la fabricación de tejas para cubiertas de diferentes obras de construcción. El objetivo de esta investigación ha sido la caracterización mecánica de la teja del tipo ondulada con base a una matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio y la comparación del comportamiento resistivo a través del Método de los

Elementos Finitos de las cubiertas ligeras construidas con este material y las de asbesto cemento, sometidas a la acción del viento. Se obtuvieron los valores críticos de las grietas para las tejas fabricadas de ambos materiales. La teja reforzada con fibra de vidrio presentó más resistencia y mayor tamaño crítico de grieta.

Palabras claves: elementos finitos; mecánica de la fractura; cubiertas ligeras; vientos; fibrocemento; materiales compuestos.

Abstract

Asbestos cement is a material used in the production of lightweight roof tiles. It has been shown to be highly toxic and carcinogenic, which is why it is necessary to obtain new materials that do not present this problem, with equal or superior physical-mechanical characteristics, which can be used in the manufacture of roof tiles for different construction works. The objective of this research has been the mechanical characterization of the wavy type tile based on a polymeric matrix reinforced with fiberglass and the

comparison of the resistive behavior through the Finite Element Method of light roofs built with this material and those made of asbestos cement, subjected to the wind loads. The critical crack values were obtained for the tiles made of both materials. The fiberglass reinforced tile presented more strength and a larger critical crack size.

Key words: finite elements; fracture mechanic; light covers; winds; asbestos cement; composite materials.

Cómo citar este artículo:

Estrada Cingualbres RA, de Macedo Neto JC, Correia Junior DS, et al. Resistencia al viento de tejas de fibrocemento y compuesto de poliéster y fibra de vidrio. Ingeniería Mecánica. 2020;23(2):e601. ISSN 1815-5944.

Introducción

Materiales que tienen como base el asbesto cemento son ampliamente utilizados en la construcción civil. Las tejas de cubiertas, cajas de agua, tubos hidráulicos, entre otros, son algunos ejemplos de elementos fabricados con este tipo de material. En varios países entre ellos Brasil, se utilizan ampliamente las cubiertas de viviendas con tejas de este material siendo una solución para el sector de la población con menor poder adquisitivo, debido a lo económico de esta solución frente a otras menos convencionales [1].

Las propiedades tóxicas del asbesto cemento han sido estudiadas en diferentes investigaciones [2, 3], demostrándose la alta incidencia de enfermedades en la vías respiratorias, incluido el cáncer debido a la exposición a esta sustancia, sobre todo cuando se producen fracturas de las tejas debido a una mala manipulación o al embate de fenómenos naturales como huracanes, tornados o tormentas locales severas.

Se han realizado diversos estudios para la mejora de los componentes y las propiedades del asbesto cemento, utilizándose fibras naturales de origen animal y vegetal, así en [4] se estudiaron las propiedades del concreto

endurecido, utilizando fibra sintética y fibra natural de origen animal, realizándose un análisis comparativo entre la fibra sintética y la fibra natural de origen animal (plumas de aves), las cuales se estudiaron en ensayos normados por la ASTM y pruebas experimentales. Otros trabajos tratan sobre la adición de fibras vegetales como refuerzo, que proporciona a las matrices cementosas mayor resistencia al impacto, causado por una mayor absorción de energía y un aumento en la capacidad de aislamiento termo acústico [5, 6].

El uso de materiales compuestos a base de matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio tiene una gran difusión y uso en diferentes ámbitos de la industria aeronáutica, automotriz, la construcción civil, entre otras. Los productos fabricados de materiales compuestos traen numerosas ventajas para diversas aplicaciones, incluyendo alta durabilidad, peso reducido, resistencia a la corrosión, bajo costo de manutención y de instalación y estabilidad dimensional [7, 8].

En aquellas regiones que están sometidas periódicamente a eventos que producen vientos extremos como tormentas locales severas, huracanes, etc., es necesario realizar diferentes investigaciones que coadyuven a mitigar el impacto de los mismos sobre las cubiertas ligeras, ya sea mediante la búsqueda de materiales de mayor resistencia en general, o el cambio de formas o uso de dispositivos que aumenten la resistencia de las mismas. En [9] se determinaron las causas del colapso de tejas de asbesto cemento empleando el Método de los Elementos Finitos para determinar las tensiones sobre las cubiertas ligeras ante vientos huracanados.

La Mecánica de la Fractura es una ciencia con un desarrollo teórico relativamente reciente, el no tener en cuenta las propiedades de fractura del material en el diseño de diferentes piezas y estructuras, conlleva a fallas no previstas, las cuales pueden ser catastróficas. La mecánica de la fractura considera el efecto de los defectos semejantes a fisuras (tanto en micro como en macro escala) sobre la integridad estructural. Se basa en la suposición de que fisuras o defectos semejantes a fisuras están inicialmente presentes, o podrían desarrollarse durante el servicio. Uno de los aspectos relevantes de esta ciencia es la determinación del tamaño de la grieta relacionado con el factor de intensidad a la fractura [10, 11].

El asbesto cemento es un material utilizado en la producción de tejas para cubiertas ligeras. Se ha demostrado que es altamente tóxico y cancerígeno por lo que se necesitan obtener nuevos materiales que no presenten esta problemática con características físico-mecánicas iguales o superiores, que puedan ser utilizados en la fabricación de tejas para cubiertas de diferentes obras de construcción. El objetivo de esta investigación ha sido la caracterización mecánica de la teja del tipo ondulada con base a una matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio y la comparación del comportamiento resistivo a través del Método de los Elementos Finitos de las cubiertas ligeras construidas con este material y las de asbesto cemento, sometidas a la acción del viento. Se obtuvieron los valores críticos de las grietas para las tejas fabricadas de ambos materiales. La teja reforzada con fibra de vidrio presentó más resistencia y mayor tamaño crítico de grieta.

Métodos y Materiales

Caracterización de la composición y de las propiedades mecánicas del material compuesto a base de matriz polimérica y fibra de vidrio

Se confeccionó una placa de 2 mm de espesor, de compuesto de poliéster con refuerzo en forma de manta de fibra de vidrio al 15 %, se transformó en polvo a través del proceso de limado, el cual se separó en recipientes para a través de los procesos de, Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX) y también por los análisis de Termogravimetría (TG) y Calorimetría Exploratoria de Barrido (CEB), realizar la caracterización de la composición química de sus componentes en los Laboratorios del Departamento de Química de la Universidad Federal de Amazonas, Manaus, Brasil.

Los análisis del compuesto de fibra de vidrio en forma de polvo se caracterizó químicamente en el equipo de FRX de la marca Panalytical modelo Epsilon 3-X, con una tensión máxima de 50 kV, corriente máxima de 3 mA, gas helio (presión 10^6 Pa). Para los análisis de difracción de rayos X de las muestras se utilizó un difractómetro de la marca Panalytical modelo Empyrean, utilizando radiación Cu-K α ($\lambda = 1,5418$ Å), con rango de de barrido para el ángulo de incidencia 2θ de 10 - 100° . Para los análisis de TG y DSC, se utilizó un equipo modelo SDT Q600 de la Empresa TA Instruments Systems, donde se aplicó una tasa de calentamiento de 10 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 1000 °C.

El espécimen de ensayo de material compuesto a base poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) se obtuvo a partir de una placa rectangular con las características similares a la de las tejas fabricadas de dicho material. Se cortaron probetas rectangulares de 150 mm x 25 mm x 2 mm. Se tomaron aleatoriamente 15 de ellas del total de la población obtenida. Para determinar las propiedades mecánicas del material compuesto (módulo de elasticidad, límite de fluencia y límite de rotura), las probetas fueron sometidas a un ensayo de tracción, según Norma ASTM D-638/14, que define como determinar la resistencia a la tracción, deformación en la tracción y módulo de elasticidad en la tracción. La temperatura de referencia para las pruebas fue de 23 ± 2 °C y la humedad relativa del aire de 50 ± 10 %. La probeta se sometió a una carga axial gradualmente creciente a una velocidad de $1,5$ mm/min, hasta lograr su rotura en una máquina de ensayo marca INSTRON 5984 de 150 kN de capacidad, ubicada en el Laboratorio de Ensayos del Departamento de Ingeniería de Materiales de la Escuela Superior de Tecnología (EST) de la Universidad del Estado de Amazonas (UEA)

Para la obtención del coeficiente de Poisson, expresión 1, se midió con un pie de rey el ancho de la probeta en la zona de la rotura una vez culminado el ensayo. La elongación de la probeta se obtiene en los reportes digitales de los resultados de la máquina de ensayo.

$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta b}{b}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (1)$$

Donde:

ε' – deformación transversal

ε – deformación longitudinal

b – ancho inicial de la probeta

l – longitud inicial de la probeta

Δb – variación del ancho de la probeta

Δl – variación de la longitud de la probeta

Valoración del estado tensional-deformacional de las tejas aplicando el Método de Elementos Finitos

Las tejas empleadas en las cubiertas ligeras tienen diferentes formas y están fabricadas de diversos materiales. En esta investigación se trabaja con tejas de forma ondulada a partir de los resultados obtenidos en [9] donde se concluyó que las tejas de este tipo son las de mayor resistencia y las de fibrocemento son las que se encuentran en mayor porcentaje de uso. En dicha investigación aparece la descripción para la confección del modelo geométrico de la teja, cuyas dimensiones generales se tomaron a partir de la Norma Cubana 206-2002: Láminas acanaladas de fibrocemento y sus piezas accesorias. Especificaciones y métodos de ensayo. Las tejas se modelan con un espesor de 5,5 mm según lo contemplado en dicha Norma.

Se trabaja a partir de las siguientes suposiciones:

- En el modelo los materiales cumplen la Ley de Hooke.
- Los desplazamientos que se producen son lo suficientemente pequeños lo que permite ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga.
- Las condiciones de contorno se mantienen fijas durante la aplicación de las cargas.
- Las magnitud, dirección y distribución de las cargas aplicadas no variarán mientras se deforma el modelo.

En [12, 13] se muestran las propiedades mecánicas del fibrocemento. En la tabla 1 se pueden observar estas propiedades al igual que las del material compuesto de PRFV obtenidas experimentalmente en esta investigación.

Tabla 1. Propiedades mecánicas utilizadas en el modelo de las tejas estudiadas. Fuente: autores

| Propiedad | Denominación | Fibrocemento | PRFV |
|------------------|-------------------------|--------------|-------|
| E (GPa) | Módulo elástico | 26 | 4,8 |
| μ | Coefficiente de Poisson | 0,15 | 0,27 |
| σ_f (MPa) | Límite de fluencia | - | 34,88 |
| σ_t (MPa) | Límite de tracción | 30,00 | 76,22 |

La modelación de una cubierta completa requiere de altos recursos computacionales, fundamentalmente en lo que respecta al microprocesador y la memoria RAM, por otra parte no existe un límite en cuanto la cantidad de tejas o planchas que llevará la cubierta de una edificación. 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. En [9] se hace un estudio sobre modelos con diferentes cantidades de tejas con ensamblajes de las mismas en sentido longitudinal y transversal. Se apreció cómo los resultados de las tensiones principales para un número diferente de planchas con variadas disposiciones, muestran 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, concluyéndose en la misma que se puede trabajar con una sola plancha como estado crítico.

En el modelo se colocarán las cargas máximas actuantes a partir de la metodología empleada en [9,14] donde se tuvieron en cuenta aquellos parámetros que influyen sobre la carga del viento siendo ellos: la presión básica del viento q_{10} , el coeficiente de recurrencia C_t , el coeficiente de topografía o sitio C_s , el coeficiente de altura C_h , el coeficiente de ráfaga C_r , el coeficiente de reducción por área expuesta C_{ra} y el coeficiente de forma C_f .

La carga del viento obtenida en es igual a expresión 2:

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f = 1,38 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Siendo la presión básica del viento (q_{10}) igual a 3 kN/m² para un viento con una velocidad de 69,44 m/s² obtenida a partir de la expresión

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

Donde:

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

1,6: factor empírico.

El producto de los diferentes coeficientes que aparecen en la ecuación de la carga del viento (1) que llamaremos de C_{tot} es igual a 0,46.

La presión básica del viento (expresión 3) para una velocidad de este de 100 km/h (27,77 m/s²) será de 0,482 kN/m².

Con lo que la carga del viento en el presente estudio será igual a 0,22 kN/m².

En ambos modelos las restricciones se colocaron en el lugar donde van ubicados los tornillos o grapas. Se impide el desplazamiento radial en el interior de los agujeros y en la ubicación de la arandela se impiden los desplazamientos en el eje vertical, que simulan las sujeciones de la plancha cuando se encuentra sometida a succión (estado de carga más crítico).

En el mallado realizado al modelo se utilizaron elementos finitos tipo tetraédrico de alto orden con 10 nodos y tres grados de libertad por nodo que correspondiente con los desplazamientos en los ejes cartesianos globales, con un tamaño de elementos inicial de 20 mm, luego 15 mm, hasta disminuir a 5,5 mm con una tolerancia de 1,1 mm para el mallado global. Se realizó 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, obteniéndose un modelo con 2 064 656 nodos y 1 248 251 elementos, para un 3,1 % de convergencia.

El modelo numérico de la plancha ondulada con las cargas actuantes (en rojo), las sujeciones (en verde) y el mallado aplicado al mismo aparecen en la figura 2:

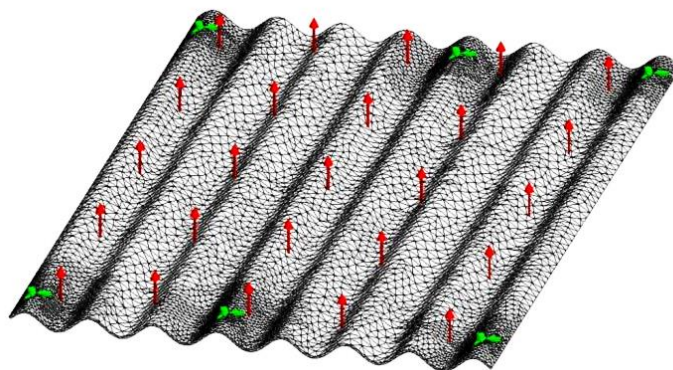


Fig. 2. Modelo numérico de la plancha acanalada de fibrocemento y de material compuesto PRFV. Fuente: autores

Determinación del tamaño crítico de la grieta

Luego de determinar las zonas críticas y las tensiones en ambas tejas, se procedió a calcular el tamaño crítico de la grieta para estas en la zona del agujero de fijación, aplicando los principios de la mecánica de la fractura.

Se asumieron las condiciones de desarrollo de la grieta en esta zona como una grieta simple. Dadas las características de la sección en proporción con la grieta el factor de intensidad de tensión se calcula según la expresión 4, [16]

$$K_I = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4)$$

Donde

β - es el factor de modificación de la intensidad del esfuerzo [16]

σ - tensión en el punto de interés (MPa)

a - tamaño de la grieta (m)

Se toma el ancho de la semionda donde se encuentra el agujero, y se asume preliminarmente un valor de $\beta = 1$. Se trabaja con la tensión máxima determinada por MEF para la zona crítica de las tejas de ambos materiales, y luego con el valor de K_{Ic} (factor de intensidad de tensión crítico o tenacidad a la fractura del material), se calcula un valor preliminar del tamaño de la grieta a y con la relación de esta respecto al ancho de la placa b (longitud de la semionda donde se encuentra el agujero) y la relación entre el radio del agujero de la sujeción r y b , se determina el valor definitivo de β . Se calcula finalmente el valor del tamaño crítico de la grieta, expresión 5:

$$a_{crit} = \left[\frac{K_{Ic}}{\sigma_{max}\beta} \right]^2 \cdot \frac{1}{\pi} \quad (5)$$

Resultados y Discusión

Composición de las probetas de PRFV

El análisis químico del material de las probetas de PRFV permitió la identificación de los elementos presentados en la tabla 2, así como la asociada a óxidos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 2. Elementos componentes de la probeta de PRFV. Fuente: autores

| Elementos | Aluminio | Silicio | Fósforo | Cloro | Potasio | Calcio | Titanio | Hierro |
|-----------|----------|---------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|
| % | 4,99 | 21,94 | 0,92 | 0,179 | 0,694 | 61,89 | 1,877 | 5,64 |

Tabla 3. Composición de óxidos en la probeta de PRFV.
Fuente: autores

| Óxidos | Óxido de aluminio Al_2O_3 | Dióxido de silicio SiO_2 | Óxido de calcio CaO | Óxido de hierro III Fe_2O_3 |
|--------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| % | 7,12 | 34,04 | 50,71 | 4,12 |

Determinación de las tensiones principales y los desplazamientos verticales en el modelo

En las figuras 3 y 4 se muestra la distribución de las tensiones principales en la plancha de fibrocemento y de material compuesto de PRFV y un acercamiento con una representación isocromática a la derecha de la zona del agujero donde las tensiones superan el límite de resistencia en las mismas. Los valores de las tensiones principales máximas, el coeficiente de seguridad y los desplazamientos verticales máximos para ambos modelos de tejas se observan en la tabla 4.

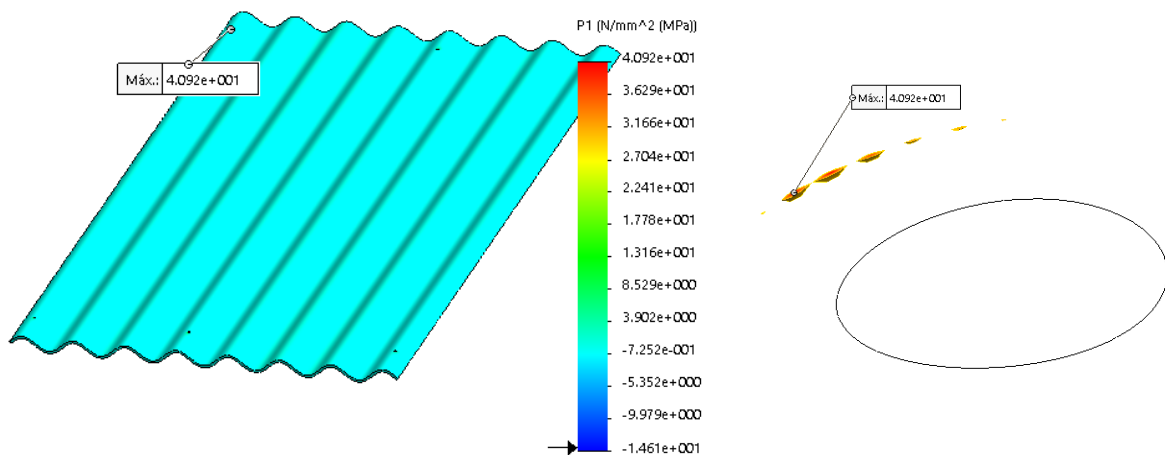


Fig. 3. Distribución de tensiones principales en la plancha de fibrocemento. Fuente: autores

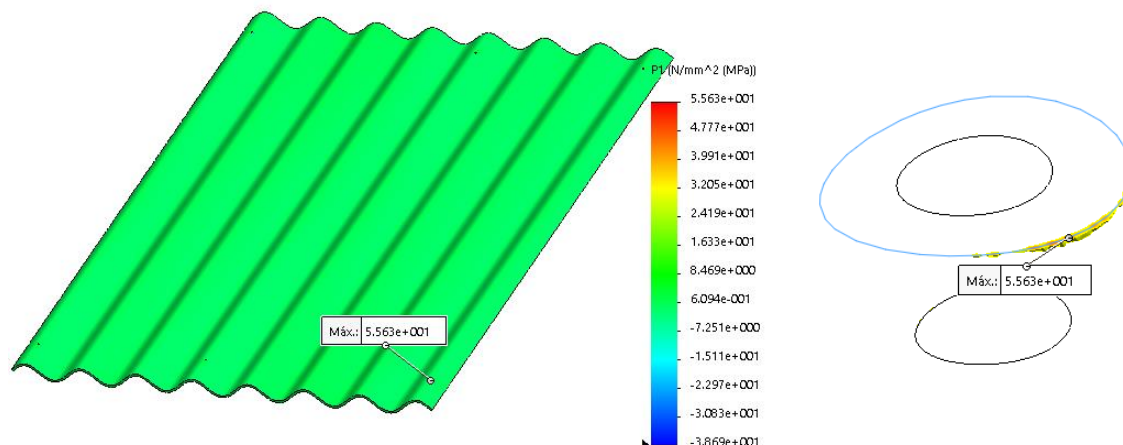


Fig. 4. Distribución de tensiones principales en la plancha de compuesto de PRFV. Fuente: autores

Tabla 4. Tensiones principales, coeficiente de seguridad y desplazamientos verticales máximos.
Fuente: autores

| Tipo de plancha | Espesor (mm) | Largo (mm) | Ancho (mm) | Tensión principal (MPa) | Factor de seguridad | Desplazamiento vertical (mm) |
|--------------------------|--------------|------------|------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Ondulada de fibrocemento | 5,5 | 1 750 | 1 130 | 40,92 | 0,73 | 0,38 |
| Ondulada de PRFV | 5,5 | 1 750 | 1 130 | 55,63 | 1,37 | 3,46 |

Tamaño crítico de la grieta

Los valores del factor de intensidad de crítico de tensiones para las tejas es el siguiente [15]:

Para el asbesto cemento = $0,4 \text{ MPa.m}^{1/2}$

Para el PRFV = $10 \text{ MPa.m}^{1/2}$

Para un valor preliminar de $\beta = 1$ y con el valor de las tensiones máximas en los bordes de los agujeros de la plancha de asbesto y PRFV iguales a 40,92 y 55,63 MPa respectivamente se calcula el tamaño preliminar de la grieta para cada teja igual a 0,0304 mm para la teja de asbesto y de 10,29 mm para la de PRFV.

Se realiza el cálculo definitivo de la grieta crítica para ambos materiales teniendo en cuenta el radio del agujero de sujeción igual a 5 mm, el valor de la longitud de la semionda donde se encuentra el agujero (86,78 mm) y los valores preliminares de la grieta. Con estos valores se determinó el valor de β , siendo este de 1 para la teja de asbesto y 1,05 para la de PRFV. Pasando a calcular finalmente el valor del tamaño crítico de grieta, siendo estos de 0,0304 mm para la teja de asbesto y 10,8 mm para la de PRFV.

Tomando como base los resultados de las tensiones principales puede verse que en el caso de la teja de fibrocemento esta superan el límite de resistencia de dicho material, aunque debe resaltarse que esto solo ocurre en una zona muy pequeña en los bordes de la arandela de los tornillos o grapas de sujeción que fijan la teja en su parte superior a las vigas o purling inferiores, siendo esta zona el origen de una microgrieta que será la causa del inicio del colapso la teja, algo similar en cuanto a la zona de máximas tensiones ocurre en la teja de PTFV, solo que en este caso las tensiones están por debajo del límite de resistencia de este material. Los desplazamientos verticales en ambas tejas tienen sus valores máximos como es de esperar en el centro de la teja, con valores superiores en la teja de PRFV debido a su mayor tenacidad en comparación con el fibrocemento.

Del resultado de la determinación del tamaño de la grieta crítica, se aprecia un valor muy bajo de esta para el caso de la teja de asbesto cemento, lo que resulta de la baja tenacidad a la fractura de este material, lo que conlleva a un desarrollo inestable de dicha microgrieta con la consiguiente fractura acelerada de la teja. En el caso de la teja de PRFV, se aprecia un valor mayor de la grieta crítica producto a una mayor tenacidad a la fractura de este material, con lo cual grietas alrededor del agujero de sujeción con valores inferiores, no serían peligrosas, no produciéndose una propagación inestable de esta al actuar una carga igual o inferior a la del caso de estudio.

Conclusiones

Las planchas de material compuesto a base de poliéster reforzado con fibra de vidrio al 15 %, presentan una mayor resistencia, con un coeficiente de seguridad mayor a uno y 1,88 veces superior respecto a la de fibrocemento.

Debido a la mayor tenacidad a la fractura del poliéster reforzado con fibra de vidrio al 15 %, el valor del tamaño crítico de la grieta en la teja de este material es 355 veces superior respecto a la grieta crítica de la teja de fibrocemento.

El valor tan pequeño del tamaño de la grieta crítica en la teja de asbesto cemento, es indicativo de la necesidad de un taladrado cuidadoso y de calidad al abrir el agujero de fijación de la teja, so pena de un desarrollo inestable de la grieta en esta zona.

Referencias

- Agopyan V, Savastano Jr H, John, VM, et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. *Cement and Concrete Composites*. 2005;27:527-536.
- Mejía MM, Rendón I. Prevalencia de patologías relacionadas con el asbesto crisotilo en trabajadores de una empresa de productos de crisotilo-cemento. *Revista Colombiana de Neumología*. 2016;28(2):62-71.
- Accinelli RA, López LM. Asbesto: la epidemia silenciosa. *Acta Médica Peruana* 2016;332:138-141.
- Díaz CP. Concreto reforzado con fibra natural de origen animal. *Revista Científica Ingeniería, Ciencia, Tecnología e Innovación*. 2016;3(2):92-95.
- Paricaguán BM, Albano CL, Torres RV, et al. Efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón. *Revista DYNA*. 2013;88(4):424-432.
- Kannojiya R, Kumar G, Ravi R, et al. Extraction of pineapple fibres for making commercial products. *Journal of Environmental Research and Development*. 2013;7(4):1385-1390.
- Aperador WA, Delgado TA, Bautista RJ. Influencia de las fibras de carbono y fibras de vidrio en materiales compuestos como modelo en la implementación de pisos industriales. *Respuestas*. 2010;152:63-69.

8. Paredes SJ, Pérez SC, Castro MC. Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz. Enfoque UTE. 2017;83:1-15.
9. Estrada RA, Rodríguez JY, Lengarán Y, Campos MS. Mitigación del colapso de las cubiertas ligeras de fibrocemento ante vientos huracanados. Informes de la Construcción. 2017;69(547):e214.
10. Grajales JA, Vanegas LV. Métodos para determinar el factor de intensidad de esfuerzos. Entre Ciencia e Ingeniería. 2016;1019:70-80.
11. Rodríguez CW, Rojas AR, Yépez AJ, et al. Análisis de sensibilidad y de estabilidad numérica en el cálculo de factores de intensidad de tensiones en un caso de mecánica de fractura. UIS Ingenierías. 2016;162:151-160.
12. Ferrer GC, Ferrán JJ, Torregrosa SJ, et al. Contribución al estudio de espesores de soleras de hormigón para cargas de estanterías mediante elementos finitos. Informes de la Construcción. 2016;6(85):43-9.
13. Guardia PY, Rodríguez PS, Pacheco GR, et al. Análisis estructural de un biorreactor anaerobio de fibrocemento por el método de los elementos finitos. Ingeniería Mecánica. 2015;18(3): 196-202.
14. Claudio KA, Estrada RA, Pereira G, Martínez J, et al. Estudio del comportamiento resistivo de planchas de material compuesto y de asbesto cemento. Ingeniería Mecánica, 2019;22(3):161-168.
15. Oller S. Fractura Mecánica un enfoque global. Barcelona, España: Artes gráficas Torres S. A., 2001.
16. Murakami Y. Stress Intensity Factors Handbook. Oxford, U. K: Pergamon Press, 1987.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

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

Participó en el diseño de la investigación, en la preparación y en los ensayos para determinar las propiedades mecánicas, en los estudios realizados al objeto de estudio a través del Método de los Elementos Finitos, así como en el análisis a través de la teoría de la Mecánica de la fractura realizada a las dos tejas objeto de estudio. Participó en la búsqueda de información y el análisis de los resultados experimentales, así como en el análisis de los resultados así como en la redacción y aprobación del informe final.

José Costa de Macedo Neto. <https://orcid.org/0000-0002-0616-3201>

Participó en el diseño de la investigación y la determinación y análisis de las propiedades del material compuesto a base de poliéster y fibra de vidrio así como en la preparación y realización de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas de este. Participó en la búsqueda de información y el análisis de los resultados experimentales, así como en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.

Darbens Silvio Correia Junior. <https://orcid.org/0000-0001-9540-1779>

Participó en los análisis de las propiedades del material compuesto a base de poliéster y fibra de vidrio. Participó en la búsqueda de información y el análisis de los resultados experimentales, así como en el análisis de los resultados finales y en la revisión crítica del contenido del trabajo así como en la redacción y aprobación del informe final.

Pavel Michel Almaguer Zaldivar. <https://orcid.org/0000-0001-6879-9961>

Participó en los estudios realizados al objeto de estudio a través del Método de los Elementos Finitos, así como en el análisis a través de la teoría de la Mecánica de la fractura realizada a las dos tejas objeto de estudio. Participó en la búsqueda de información y el análisis de los resultados numéricos, así como en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido y en la redacción y aprobación del informe final.

Josiel Bruno de Oliveira. <https://orcid.org/0000-0003-3402-8821>

Participó en la preparación y realización de los ensayos experimentales para determinar las propiedades mecánicas del material compuesto a base de poliéster y fibra de vidrio, y en el procesamiento de los resultados. Participó en la búsqueda de información, así como en el análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.