

Evaluación numérica de la rigidez y la tenacidad en materiales compuestos bioinspirados

Numerical evaluation of stiffness and toughness in bio-inspired composite materials

Juan Fernando Cucuyame-Morales ^{1a}, Junes Abdul Villarraga-Ossa ^{1b}, Liliana Marcela Bustamante-Góez ^{1c}

¹ Grupo de Diseño Mecánico, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0001-9300-0453 ^a, 0000-0002-7893-5362 ^b, 0000-0002-1150-1252 ^c. Correos electrónicos: juan.cucuyame@udea.edu.co ^a, junes.villarraga@udea.edu.co ^b, liliana.bustamante@udea.edu.co ^c

Recibido: 11 diciembre, 2022. Aceptado: 29 abril, 2023. Versión final: 14 mayo, 2023.

Resumen

La naturaleza ha servido de inspiración para múltiples áreas del conocimiento y de desarrollo de la humanidad, en el caso de los materiales su proceso evolutivo de millones de años ha logrado obtener una buena compatibilidad entre las propiedades mecánicas de rigidez y tenacidad, algo que es complicado en los materiales de ingeniería convencionales, debido a que estas propiedades presentan un comportamiento inversamente proporcional entre sí. Se ha establecido que una de las características que la naturaleza utiliza es la formación de estructuras jerárquicas, que pueden ir desde la escala micrométrica hasta la macro escala, con este tipo de organización ha logrado mejorar diversas propiedades, dependiendo de la necesidad a resolver, del medio ambiente en que se encuentre y los materiales disponibles. Uno de estos tipos de estructuras son las helicoidales, presentes en escamas de peces, conchas de moluscos, exoesqueletos, etc., la cual provee protección y buenas propiedades de resistencia mecánica, resistencia a la penetración, al impacto y la fractura. Por tal motivo se pretende realizar un estudio numérico de materiales compuestos por fibras continuas empleando diferentes modelos constitutivos (lineales y plásticos bilineales) para la matriz (suave) y las fibras (rígidas) y observar como la variación del modelo empleado y el ángulo de rotación de las fibras afectan la rigidez general y la tenacidad del material.

Palabras clave: biomimética; materiales compuestos; estructura jerárquica; fibras continuas; propiedades mecánicas; rigidez; tenacidad.

Abstract

Nature has served as inspiration for multiple areas of knowledge and development of humanity, in the case of materials, their evolutionary process of millions of years has managed to obtain a good compatibility between the mechanical properties of rigidity and toughness, something that is complicated in conventional engineering materials, because these properties behave inversely proportional to each other. It has been established that the formation of hierarchical structures is one of the features that nature uses, ranging from the micrometric scale to the macro scale, with this type of organization, nature has improved various properties, depending on the need to be resolved, the environment in which it is located and the available materials. Helicoidal structures are one of these types of structures

and they are present in fish scales, mollusk shells, exoskeletons, etc., these structures provide protection and good mechanical properties and resistance to penetration, impact and fracture. For this reason, it is intended to carry out a numerical study of materials composed of continuous fibers using different constitutive models (lineal and bilinear plasticity) for the matrix (soft) and fibers (stiff) and observe how the variation of the pattern used and the angle of rotation of the fibers affect the overall stiffness and toughness of the material.

Keywords: biomimetics; composite materials; hierarchical structure; continuous fibers; mechanical properties; stiffness; toughness.

1. Introducción

La ingeniería desde hace mucho tiempo ha tomado a la naturaleza como inspiración para resolver múltiples problemas, (crear elementos más Aerodinámicos, armaduras de protección, estructuras para construcción) entre los cuales está el diseño y/o optimización de materiales. De esta interacción surge el término Bioinspiración, que se utiliza para describir la aproximación que se hace desde diferentes áreas de estudio para sintetizar soluciones basadas en sistemas biológicos, es decir, estudiar e imitar la naturaleza, y en el área de estudio de los materiales, diseñarlos a partir de esta observación y análisis, en la mayoría de los casos, este diseño emplea las diferentes estructuras jerárquicas que se han obtenido a través de millones de años de evolución [1], [2], [3]. Estas estructuras brindan una distribución, dimensiones y propiedades, adecuadas a los componentes de un sistema para que responda de manera óptima ante la necesidad de una especie [4].

Existen varios tipos de estructuras jerárquicas, algunas se conforman por fibras, placas, partículas o inclusiones, poros, configuración multicapa, interfaz orgánica e inorgánica y dependiendo de la organización se pueden clasificar como unidireccionales, ortogonales, y helicoidales o Bouligand [5], [6] e incluyen detalles como estructuras onduladas y/o corrugadas y la variación funcional de la composición del material. Algunos ejemplos de estas estructuras son las escamas de algunos peces, los exoesqueletos de algunos crustáceos y conchas de moluscos, los cuales proveen de protección, presentando adicionalmente buena resistencia a la penetración, al impacto y la fractura [3]. Las estructuras bioinspiradas han sido empleadas en una amplia gama de aplicaciones como en la parte frontal de los autos y trenes, para construcción de estructuras, alas de aviones, estructura de misiles y armaduras de protección, entre otros [7], [8], [9]. Estas diferentes organizaciones estructurales permiten que la naturaleza presente una combinación de propiedades difíciles de conseguir en la ingeniería como resistencia, tenacidad, ductilidad, poco peso y flexibilidad en algunos casos.

El funcionamiento óptimo de estas estructuras se logra por el alto grado de organización que van desde el nivel molecular hasta la macro escala.

Los diferentes estudios de materiales bioinspirados compuestos han mostrado en algunas configuraciones que la resistencia a la penetración se amplifica 40 veces disminuyendo en tan solo 5 veces la flexibilidad, lo que brinda un material muy resistente pero aun así con una flexibilidad considerablemente buena. Así sucesivamente se pueden encontrar diversas estructuras compuestas formadas por placas, capas y fibras las cuales con una configuración específica brindan cambios en las propiedades del material.

Varias de estas estructuras bioinspiradas se asemejan estructuralmente a materiales compuestos, más específicamente a materiales reforzados con fibras FRC (por sus siglas en inglés *Fiber Reinforce Composite*), o simplemente RP (*Reinforce Plastic*), estos materiales tienen como característica principal que algunas de sus propiedades mecánicas como: la resistencia, la deformación y la tenacidad, presentan mayores valores que los de sus constituyentes, especialmente al material continuo o matriz, es por esto que pueden ser definidos como la combinación de varios materiales para crear un material superior [10]. Su naturaleza anisótropa y heterogénea les provee un comportamiento marcadamente diferente al de los materiales convencionales [5], [6], por lo cual es importante conocer su comportamiento mecánico. Los FRC pueden presentar fibras continuas o discontinuas, en una o varias direcciones y distribuidas uniforme o aleatoriamente. Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los materiales constituyentes, de su geometría, su distribución y su fracción volumétrica. El estudio de materiales bioinspirados se ha llevado a cabo empleando en muchas ocasiones el método de los elementos finitos, lo que ha facilitado el entendimiento de estas estructuras y también su funcionalización, con el fin de encontrar diseños que cuenten con los requisitos y características buscadas [3], [11].

El análisis de estos materiales se ha abordado desde la mecánica de materiales compuestos, en este caso, materiales compuestos por varias láminas, en las cuales

su espesor es varios ordenes de magnitud inferior que sus demás longitudes, por lo cual se han analizado como elementos tipo placa, en donde la relación constitutiva para una lámina sometida a esfuerzo plano y con las fibras orientadas en dirección de la carga se expresa por la ecuación (1).

$$\{\varepsilon\} = [s] \cdot \{\sigma\} \quad (1)$$

Donde $\{\varepsilon\}$ es la deformación normal, $[s]$ es la matriz de flexibilidad y $\{\sigma\}$ es el vector de esfuerzos. Esta expresión también puede ser dada en términos de sus componentes globales x y y cuando las fibras no se encuentran alineadas con la dirección de la carga y las constantes ingenieriles de la lámina no orientada pueden determinarse directamente a partir de las constantes elásticas de la lámina y el ángulo de orientación (ecuaciones (2) y (3)).

$$\{\varepsilon_{xy}\} = \overline{[S]} \cdot \{\sigma_{xy}\} \quad (2)$$

$$\overline{[S]} = [T_\varepsilon(\theta)]^{-1} \cdot [S] \cdot [T_\sigma(\theta)] \quad (3)$$

En esta expresión $\{\varepsilon_{xy}\}, \{\sigma_{xy}\}$ corresponden con a las deformaciones normales y los esfuerzos en las direcciones x y y , $\overline{[S]}$ es la matriz de flexibilidad global, $[T_\varepsilon(\theta)], [T_\sigma(\theta)]$ son las matrices de transformación de coordenadas para los vectores deformación y esfuerzo respectivamente. Así en el análisis de materiales fibrosos, se hacen necesarias cuatro constantes elásticas y el ángulo de las fibras, el cual tienen una gran incidencia las propiedades mecánicas del compuesto.

En la naturaleza es común encontrar el apilamiento de múltiples capas sucesivas (que pueden cambiar de orientación), con lo cual se logra aumentar la resistencia de la sección, permite minimizar el efecto de anisotropía en el plano, mejorando los valores de rigidez (tanto a tracción como a cortante) y presentando comportamiento cuasi-isotrópico, esto introduce la secuencia de apilado como una nueva variable, la cual abre grandes posibilidades en el proceso de diseño de materiales, algunos ejemplos de este tipo de estructura se encuentran en las escamas de peces, la caparazones de crustáceos y las alas de las mariposas, entre otros. Por esto es de vital importancia conocer el comportamiento del material laminado, el cual se basa en la teoría básica de placas [12], [13] y de la cual se desprende la ecuación general de placas laminadas.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} \quad (4)$$

En esta ecuación se encuentran las variables de diseño de laminados delgados y se relacionan las fuerzas en el plano $\{N\}$ y los momentos $\{M\}$, con la deformación $\{\varepsilon\}$ y la curvatura $\{k\}$ del plano de referencia del laminado, donde: $[A]$ es la matriz de rigidez plana, $[B]$ es la matriz de acoplamiento y $[D]$ es la matriz de rigidez a flexión.

En este trabajo se realizó un estudio numérico sobre el comportamiento de las estructuras compuestas por láminas y capas de fibras, el cual depende de la configuración de los arreglos y las propiedades de los materiales, entre otros. Se calcularon los módulos y las tenacidades para los materiales compuestos variando la orientación de las fibras y modelos constitutivos de los materiales.

2. Metodología

Para simular algunas de las estructuras que se encuentran en la naturaleza, se tomaron valores de rigidez para la matriz con magnitudes menores que las fibras, según la literatura los materiales compuestos que se encuentran en la naturaleza, podrían variar su relación de rigidez hasta llegar a valores de seis ordenes de magnitud mayores en las fibras [14], [15]. En este trabajo se analizaron dos tipos de probetas, la primera con una sola capa de fibras (*una capa*) y la segunda con dos capas de fibras orientadas con ángulos complementarios a la dirección de la carga (*monobalanceada*), como se pueden apreciar en la [figura 1 a\)](#) y [b\)](#). Cada organización de fibras se definió según su orientación θ_F , este ángulo fue medido con respecto a la dirección de la fuerza de tracción aplicada sobre la probeta.

El subíndice “F” representa la orientación de las fibras en ese modelo, por ejemplo θ_{45} indica que las fibras de la probeta están a 45° (ver [figura 1 c\)](#)). Las fibras tienen una sección transversal cuadrada de lado w y el espaciado entre las fibras de manera tridimensional tienen un valor $t = w$, la relación de aspecto del largo de la probeta con respecto al ancho es igual a $L/W = 25/11$; siendo L el largo y W el ancho de la probeta. Para simular el agarre de la probeta, se agregaron dos zonas de material en los extremos, con la misma sección transversal y una altura H , en la [figura 1 c\)](#) se pueden ver las dimensiones anteriormente planteadas. Sobre esta geometría se colocaron las condiciones de restricción y de desplazamiento para obtener una deformación unitaria total de $\varepsilon = 0,8$.

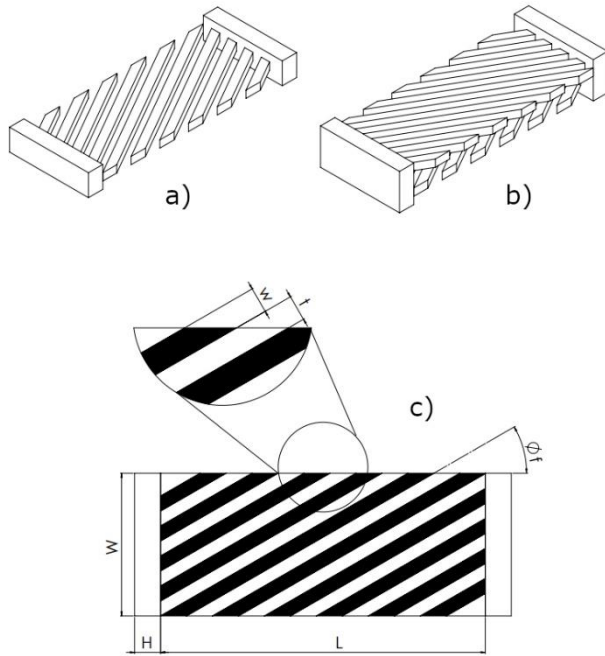


Figura 1. Geometrías empleadas a) Modelo una sola capa, b) Modelo Monobalanceado y c) Dimensiones generales de las probetas. Fuente: elaboración propia.

Se estableció una relación entre las rigideces de la matriz y las fibras E_{M-F} para las zonas elásticas. La relación de rigidez establecida es:

$$E_{M-F} = \frac{E_F}{E_M} \quad (5)$$

Donde: E_F es el módulo de elasticidad de las fibras y E_M es el módulo de elasticidad de la matriz. Para la zona plástica se definió un módulo de rigidez E_{n-i}^{**} , el cual fue proporcional al módulo de rigidez E_{M-F} definido anteriormente, siendo n el número del modelo e i el material al que hace referencia, es decir, matriz o fibra. La zona plástica inicia a partir del valor de $\varepsilon = 0.2$ para todos los modelos propuestos. En el análisis realizado con los materiales plásticos se usó una relación de E_{1-10} para la parte elástica para todos los valores de θ_F . La relación E_{n-i}^{**} se calculó como:

$$E_{1-i}^{**} = \frac{E_i^*}{10}, E_{2-i}^{**} = \frac{E_i^*}{100} \text{ y } E_{3-i}^{**} = \frac{E_i^*}{1000} \quad (6)$$

La relación de Poisson empleada para todos los materiales fue de 0.43, esta relación corresponde a los valores reportados por los fabricantes de los materiales.

Se analizaron cuatro modelos con diferentes relaciones de rigidez para la elasticidad y la plasticidad. A continuación, se muestra las características para cada uno de ellos:

- Modelo 1: la fibra y la matriz tienen un comportamiento lineal con diferentes valores de rigidez, en este caso se tomaron los valores de 2, 3, 4, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 [Mpa] para la matriz y se calcularon los de la fibra empleado la relación de ecuación (5). Por último, se varió el ángulo de las fibras de 0° a 90° , cada 15° , para un total de 140 combinaciones, resultantes de la combinatoria de todos estos parámetros.
- Modelo 2: la fibra cuenta con un comportamiento lineal y la matriz con un comportamiento plástico bilineal, los ángulos empleados fueron los mismo que en el modelo 1, para un total de 42 combinaciones.
- Modelo 3: la fibra tiene un comportamiento plástico bilineal y la matriz un comportamiento lineal, los ángulos empleados fueron los mismo que en el modelo 1, para un total de 42 combinaciones.
- Modelo 4: los dos materiales tuvieron un comportamiento plástico bilineal con valores de ángulos de $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ y 45° , para un total de 144 combinaciones.

Los modelos CAD se elaboraron en el software Inventor 2019. Las simulaciones numéricas se realizaron en el software ANSYS 2020R1 y se emplearon modelos de tipo estático implícito y las deformaciones se asumieron como finitas. Se usó un mallado de primer orden con elementos tetraédricos. El tamaño de la malla se seleccionó mediante un proceso de convergencia garantizando un error máximo del 2%, un ejemplo de este resultado se aprecia en la figura 2. El promedio de nodos obtenidos fue de 25.402 y el tamaño de los elementos fue de 0.6 mm.

Las condiciones de borde impuesta en el modelo numérico replican el comportamiento en un ensayo de tracción en una máquina de ensayos universal, para lograr esto se restringió el desplazamiento en una cara perpendicular a la carga en dirección de la carga y las dos caras restantes se restringieron en su desplazamiento en el eje perpendicular a cada una de ellas, adicionalmente se aplicó un desplazamiento correspondiente al 80% de la longitud de la para la cara libre. Las zonas en contacto se asumieron con propiedad *Bonded*, la cual no permite la separación de las superficies.

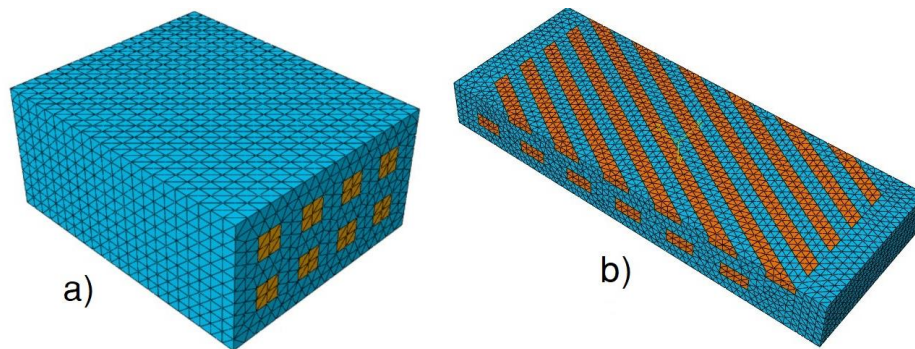


Figura 2. a) Vista corte transversal probeta mallada 90° b) Vista corte Longitudinal Probeta 30°. Fuente: elaboración propia.

Se realizaron cálculos analíticos para comparar los resultados de las simulaciones con la ley de mezclas (ecuación 6), tomando en cuenta las capas de fibra y matriz.

$$E_x = \frac{E_m}{h_c} \sum_{M=1}^m h_M - h_{M-1} + \frac{E_F}{h_c} \sum_{F=1}^n h_F - h_{F-1} \quad (6)$$

Donde:

E_m = Rigidez de la matriz

h_M = Altura de la matriz

E_F = Rigidez de la Fibra

h_F = Altura de la Fibra

m = número láminas de matriz

n = número de láminas con fibras

h_c = altura del compuesto

3. Resultados y discusión

3.1. Modelo 1

Para este modelo en donde se tiene que las fibras y la matriz son elásticas, se obtiene un compuesto con una rigidez que siempre se encuentra entre la de los materiales que lo componen, lo cual es coherente con lo planteado por la ley de mezclas y los resultados de otras investigaciones [5], [10], [16]. En la figura 3 a) se muestran los resultados para las rigideces de los compuestos variando la relación entre el módulo de la matriz y el módulo de las fibras (E_{M-F}), se observó que el efecto de aumentar la rigidez de la fibra es aumentar la rigidez del compuesto y este resultado es más evidente cuando se incrementa por lo menos un orden de magnitud la rigidez de la fibra, este comportamiento se observa mejor en la figura 3 c), donde se comparan las rigideces del compuesto para todas las relaciones E_{M-F} y θ_F .

En la figura 3 b) se observó la influencia del ángulo de las fibras para la relación E_{1-10} , en donde la rigidez de la matriz corresponde a un valor de 1 *Mpa* y la de las fibras a 10 *Mpa*, y se estableció que a medida que aumenta el ángulo de las fibras disminuye la rigidez del compuesto, este comportamiento es más notorio a partir de los 45° y cuando se acerca al valor de 90° el aporte de las fibras es despreciable, es decir, el comportamiento del compuesto es casi idéntico al de la matriz, este comportamiento es similar para el resto de relaciones E_{M-F} analizadas.

Adicionalmente se encontró que los resultados de los modelos de una capa y monobalanceado tienen la misma tendencia en todos los casos, este comportamiento también fue reportado por Wang [15] en su estudio sobre el efecto de la orientación de las fibras en materiales compuestos.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se compararon con los resultados analíticos de la ecuación (5), en la figura 4 se puede ver la comparación para las relaciones de rigidez normalizadas E_{1-10} y E_{1-100} , en donde, el comportamiento de las simulaciones presenta la misma tendencia de los resultados analíticos, con una rigidez mayor del compuesto, la cual se puede deber a dos aspectos, primero, la reorientación de las fibras durante el proceso, lo cual contribuye a la rigidización del sistema [17] y segundo, la variación de las fracciones de volumen de matriz y fibra que no son tomadas en consideración en el desarrollo matemático del problema de materiales compuestos. Este primer factor está siendo estudiado en la actualidad por diferentes investigadores, para cuantificar su efecto sobre los materiales compuestos fabricados [8], [18].

La energía de deformación puede ser un criterio importante a la hora de diseñar un material para una aplicación particular [19], por tal motivo, se analizan estos valores de energía normalizados con respecto a la fibra (T_c/T_f), donde: T_c es la energía de deformación del

material compuesto y T_f es la energía de deformación de la fibra, para cada una de las relaciones de rigidez y los

ángulos estudiados, en la figura 5 se muestran estos resultados.

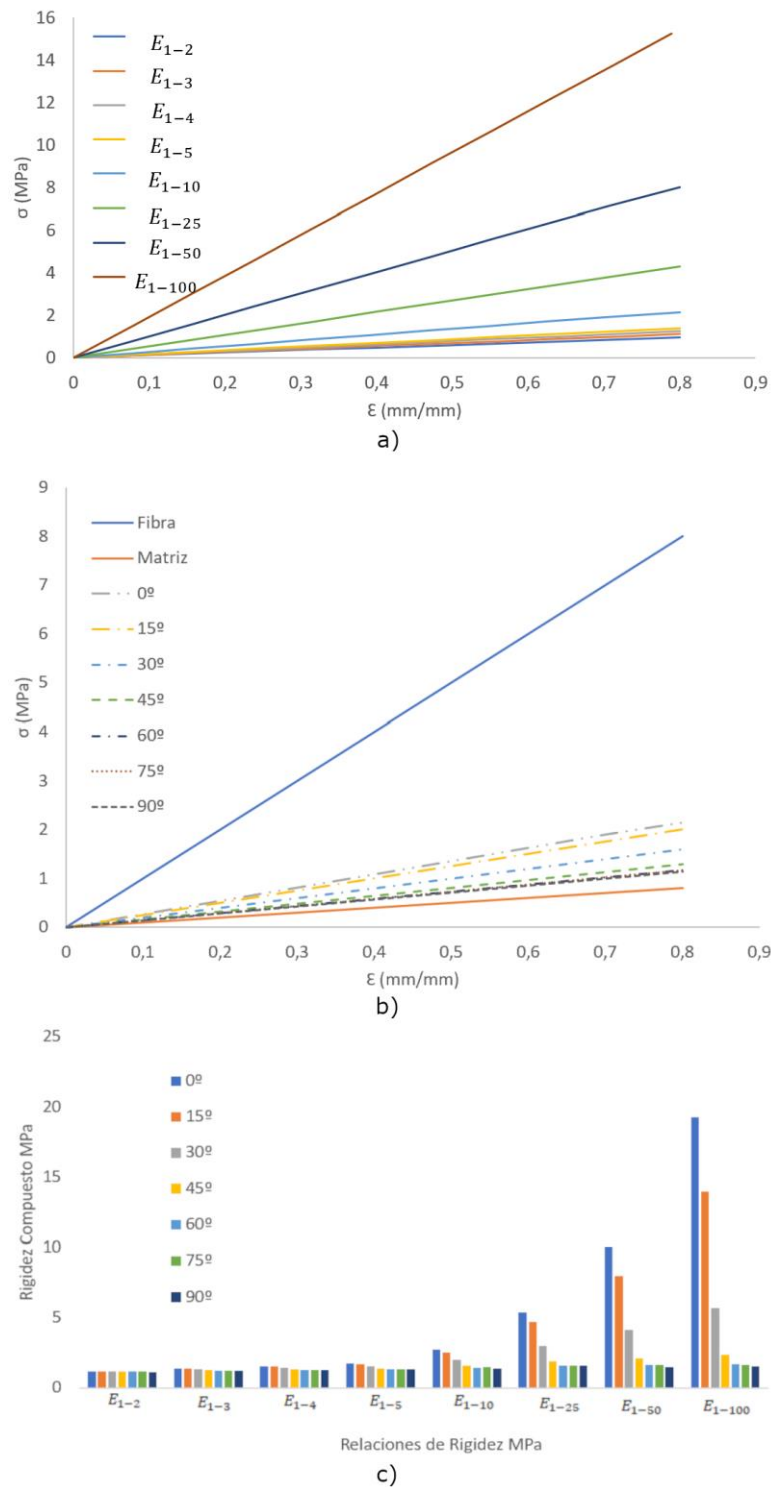


Figura 3. a) Rigidez del compuesto para diferentes relaciones E_{M-F} , b) Comportamiento de la rigidez del compuesto en función del ángulo de las fibras para una relación de rigidez de E_{1-10} y c) Comparación de la rigidez del compuesto variando la relación de rigidez y el ángulo de las fibras. Fuente: elaboración propia.

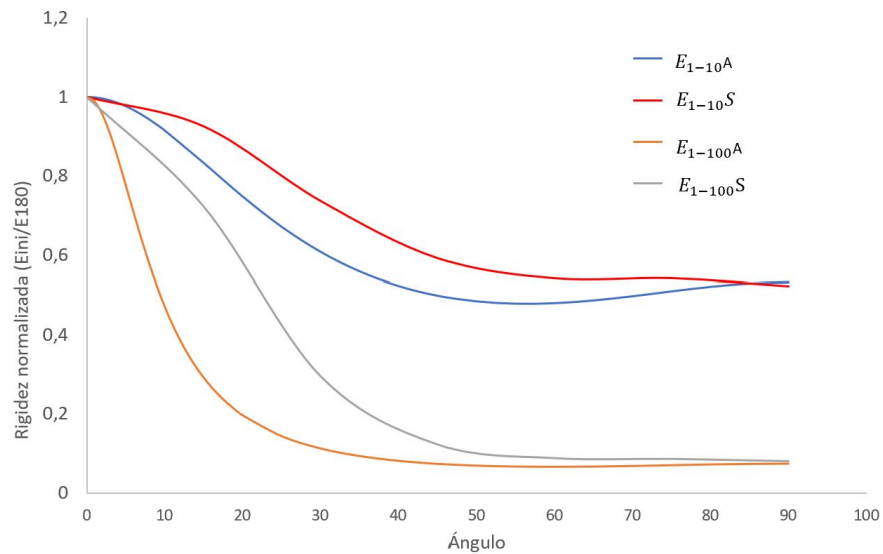


Figura 4. Comparación de rigidez normalizada para resultados numéricos (S) y analíticos (A) de probetas monobalancedas de 0° . Fuente: elaboración propia.

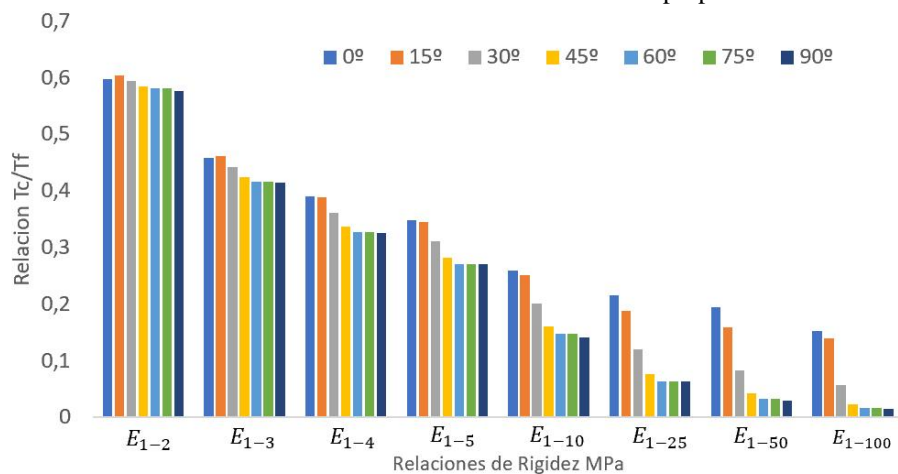


Figura 5. Energía de deformación con respecto a las relaciones de rigidez y el ángulo. Fuente: elaboración propia.

Para relaciones de rigidez menores a E_{1-5} se obtuvieron mejores valores para la tenacidad normalizada, es decir, hay una mayor influencia de las propiedades de la fibra sobre el compuesto, para este caso van desde el 35 % hasta el 60% aproximadamente, mientras que para la relación E_{1-100} se obtuvo tan solo una tenacidad resultante del 15%. Para relaciones de rigidez bajas se tiene que la tenacidad tiende a ser constante con la variación de θ_F . A partir de una relación de rigidez superior a un orden de magnitud la orientación de las fibras afecta la tenacidad del compuesto, siendo este efecto más notorio para ángulos menores a $\theta_F = 30^\circ$. Al aumentar el ángulo de las fibras se reduce la energía de deformación normalizada, excepto en los casos E_{1-2} y E_{1-3} , lo cual también podría ser explicado por el efecto del giro de las fibras al ser traccionadas, el cual incrementaría la fuerza necesaria para deformar la

probeta y así su energía de deformación. En anteriores estudios se ha encontrado que a gran escala las propiedades mecánicas de absorción de energía y de energía de la fractura cambian, pero aún no se entienden a la perfección [6].

3.2. Modelos 2 y 3

Para los modelos 2 y 3 se implementa plasticidad en la matriz y a la fibra respectivamente, para estos modelos se definieron materiales bilineales con una región elástica y una plástica, se tomó la gráfica y los valores de E_{1-10} para definir las propiedades de la zona elástica en todos los θ_F . En la figura 6 a se muestran los resultados de las rigideces de los compuestos a diferentes valores de ángulos, teniendo en cuenta un valor de E_{1-M}^{**} para la plasticidad de la matriz.

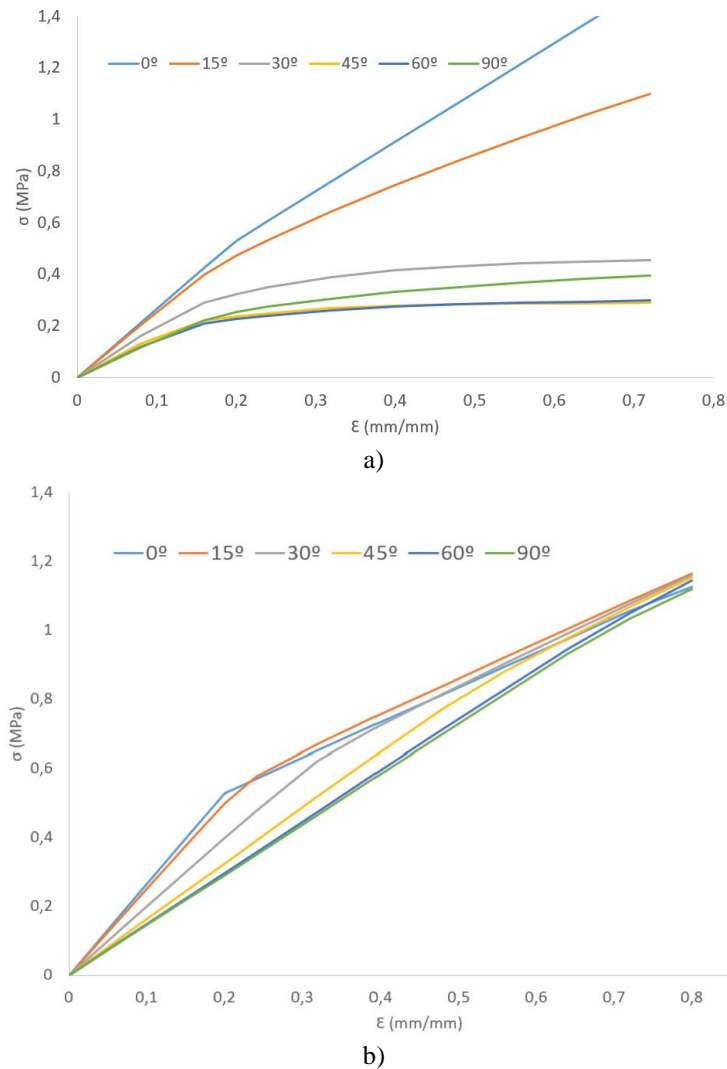


Figura 6. a) Rigidez del compuesto con plasticidad E_{1-M}^{**} para el modelo 2. b) Rigidez del compuesto con plasticidad E_{1-F}^{**} para el modelo 3. Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 b) se tiene la rigidez del compuesto usando un valor de E_{1-F}^{**} para la plasticidad de la fibra. El cambio de sección de la parte elástica a plástica no se genera en el mismo punto para las diferentes probetas, la plasticidad se empieza a notar una vez el material que tiene definida la plasticidad alcanza un valor de deformación específico superando la barrera elástica. Para los diferentes ángulos los materiales alcanzan la plasticidad en diferentes valores de deformación del compuesto. Para las probetas del modelo 2 mayores a 0° se puede evidenciar que el inicio de la zona plástica se presenta antes del 20% de deformación, debido al endurecimiento por deformación de la matriz que ocasiona que las fibras se flecten lo cual al aumentar el ángulo θ_F genera que la plasticidad del compuesto se presente a menores valores de deformación; caso contrario ocurre en el modelo 3 en el cual para llegar a la

zona plástica de la fibra y que afecte al compuesto, se debe deformar cada vez más la probeta al aumentar el ángulo θ_F .

Para los modelos 2 y 3 se analizó la energía de deformación cambiando el ángulo y las rigideces en la zona de deformación plástica E_{1-F}^{**} y E_{1-M}^{**} . Se observa que al aumentar el ángulo de las fibras hay una tendencia a disminuir la tenacidad del compuesto y se obtienen mayores resultados para la tenacidad en las probetas con mayores valores de rigidez en la zona plástica. Comparando los modelos 2 y 3 para los ángulos menores a 45° se encuentran mayores valores para la propiedad de tenacidad para las probetas del modelo 2, pero para los ángulos mayores a 45° el modelo 3 presenta mayores valores para estas propiedades, este efecto puede ser ocasionado por las diferencias en las fracciones de

volumen para cada probeta que se presentan por el cambio en el ángulo de las fibras y adicionalmente al efecto de alineación de las fibras con la dirección de la carga aplicada, generando un efecto similar al endurecimiento por deformación. En la **figura 7** se presentan estos resultados.

Comparando los resultados de las deformaciones obtenidas numéricamente (modelo 2) con algunas pruebas de laboratorio realizadas, el cual es una buena aproximación a los modelos reales que se encuentran en la naturaleza, en los cuales la matriz es menos rígida que las fibras. En la **figura 8** se observa una correspondencia en los comportamientos de la matriz formando surcos entre las fibras.

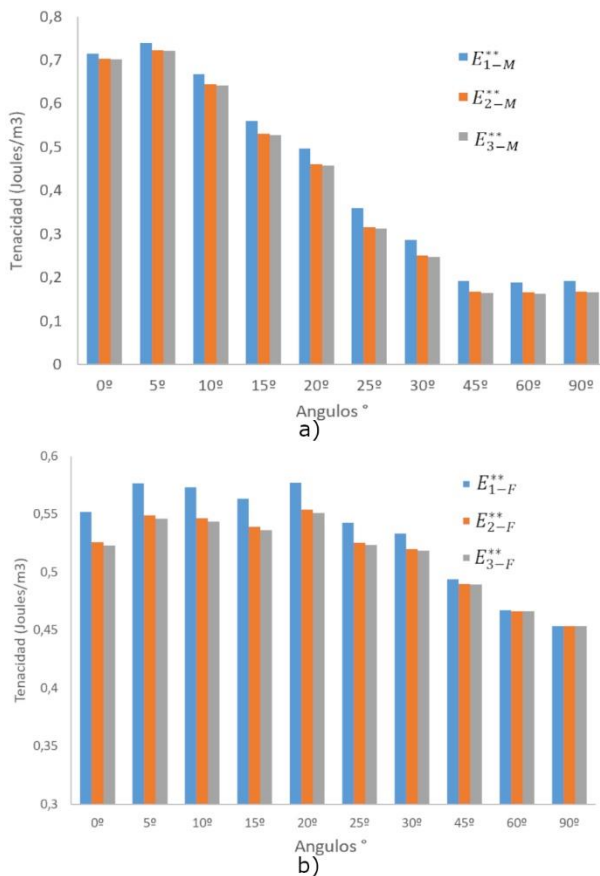


Figura 7. Tenacidad con respecto a los ángulos de las fibras para los diferentes comportamientos de la zona plástica de las probetas. a) Probetas con matriz plástica y fibras elásticas y b) Probetas con matriz elástica y fibras plásticas. Fuente: elaboración propia.

3.3. Modelos 4

Para el modelo 4 se tomaron la fibra y la matriz como materiales con comportamiento plásticos combinando las propiedades de los modelos 2 y 3, obteniendo nueve combinaciones de materiales como se puede apreciar en la **tabla 1**. Para las combinaciones del modelo 4 se realizó un análisis de tenacidad para comparar como cambia esta propiedad para las diferentes combinaciones.

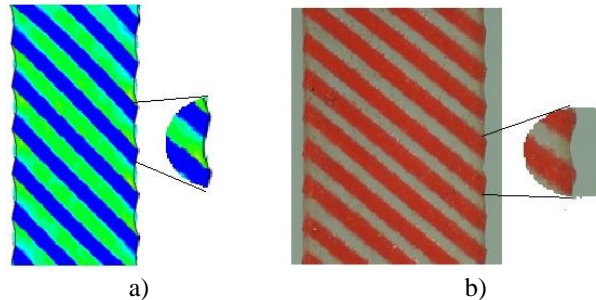


Figura 8. a) Simulación modelo 2 *Single* con fibras a 60° y b) Probeta ensayada en laboratorio con fibras en PLA y matriz en silicona a 60° *Single*. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Combinaciones de materiales empleadas en el modelo 4

Combinación	Propiedad matriz	Propiedad fibra
1	E_{1-M}^{**}	E_{1-F}^{**}
2		E_{2-F}^{**}
3		E_{3-F}^{**}
4	E_{2-M}^{**}	E_{1-F}^{**}
5		E_{2-F}^{**}
6		E_{3-F}^{**}
7	E_{3-M}^{**}	E_{1-F}^{**}
8		E_{2-F}^{**}
9		E_{3-F}^{**}

Fuente: elaboración propia

En la **figura 9** se observan los resultados para la tenacidad y el comportamiento a tracción de este modelo, en la **figura 9 a** se puede notar que para las combinaciones con mayores valores de plasticidad en la fibra (E_{1-F}^{**}) se encuentran mejores propiedades de tenacidad, esto es ocasionado a que la zona plástica de estas combinaciones tiene un mayor valor para su módulo de rigidez por lo tanto realiza un mayor aporte a la tenacidad del compuesto.

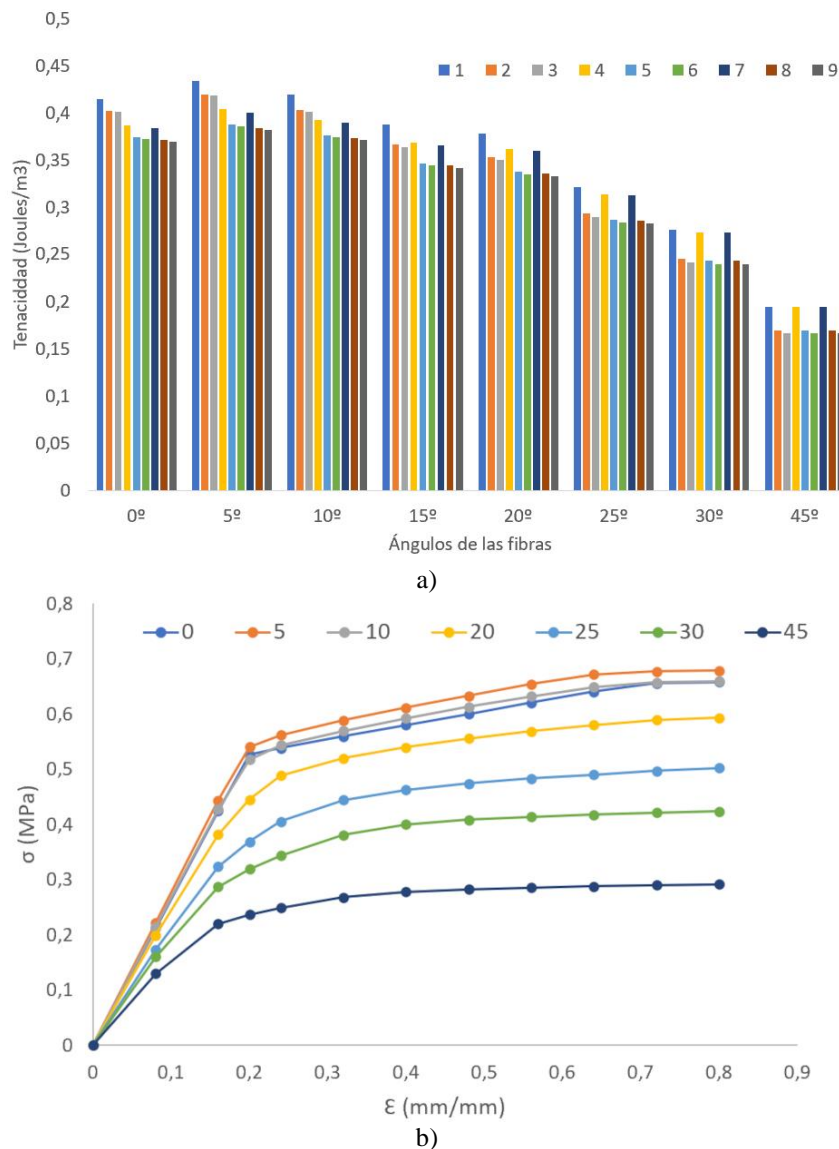


Figura 9.a) Resultados de rigidez para el comportamiento del compuesto con combinación 1 y b) Tenacidad para diferentes ángulos y combinaciones de rigidez para el modelo 4. Fuente: elaboración propia.

Para ángulos $\theta_F < 10^\circ$ se obtuvieron los mayores valores de tenacidad del compuesto. A medida que aumentaba este ángulo la zona plástica empieza a manifestarse para valores de deformación más pequeño como se puede reconocer en la figura 9 b). Los cambios de la zona elástica a la plástica se presentan en diferentes puntos, esto se genera debido a que la matriz alcanza la plasticidad en diferente momento que las fibras. Cuando se incluye la plasticidad en el modelo emplear ángulos pequeños en las fibras ayuda a mejorar la tenacidad del compuesto hasta valores de un 5% superiores.

4. Conclusiones

El estudio biomimético es muy importante para encontrar nuevos materiales compuestos que cumplan con ciertas características y propiedades mecánicas. Diferentes estructuras que la naturaleza ha creado sirven de inspiración para satisfacer diferentes necesidades como protección, aerodinámica, fluidodinámica, adherencia etc.

Los modelos computacionales son una buena herramienta para determinar el comportamiento de materiales compuestos bioinspirados, lo cual podrá

ayudar en el diseño de materiales con diferentes aplicaciones en diversas áreas.

El modelo constitutivo empleado para modelar la matriz y las fibras, al igual que el ángulo θ_F , influyen en los resultados del comportamiento mecánico del compuesto, variando tanto la resistencia como la tenacidad. Se observó que al aumentar la relación de rigidez E_{M-F} aumenta la rigidez del compuesto y disminuye la ganancia en tenacidad en el mismo.

Como tendencia general para ángulos $\theta_F > 10^\circ$, disminuyen los valores de rigidez y tenacidad del compuesto. Este efecto es más notorio cuando se incluyen los efectos de la plasticidad en los modelos numéricos y esto es coherente con los resultados experimentales.

Los resultados de los modelos numéricos 2 y 4 son los que mejor representan el comportamiento real observado en el compuesto bioinspirado. Se podría recomendar emplear el modelo 2 para investigaciones o aplicaciones de compuestos con fibras continuas ya que este modelo representa ahorros en tiempo computacional con una buena aproximación de los resultados.

Para materiales compuestos con fibras con ángulos θ_F iguales o mayores a 45° con respecto a la aplicación de la carga no generan un aporte significativo en la rigidez y en la tenacidad del compuesto.

Financiación

Universidad de Antioquia Proyecto CODI 2017-15996.

Contribuciones de los autores

J. F. Cucuyame-Morales: análisis formal y redacción – borrador original. J. A. Villarraga-Ossa: investigación, redacción – borrador original y redacción – revisión y edición. L. M. Bustamante-Góez: investigación y escritura – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] Y. Yang et al., “Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials to Functional Structures,” *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 36, p. 1706539, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/ADMA.201706539>
- [2] N. S. Ha, G. Lu, “A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 181, no. September 2019, p. 107496, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496>
- [3] B. Bhushan, “Biomimetics: lessons from nature-an overview,” *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 367, no. 1893, pp. 1445–86, 2009, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
- [4] T. Ikoma, H. Kobayashi, J. Tanaka, D. Walsh, S. Mann, “Microstructure, mechanical, and biomimetic properties of fish scales from Pagrus major,” *J. Struct. Biol.*, vol. 142, no. 3, pp. 327–333, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S1047-8477\(03\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S1047-8477(03)00053-4)
- [5] M. A. Pérez, M. Sánchez, “Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos,” in *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*, OmniaScience, 2014, pp. 19–50, doi: <https://doi.org/10.3926/oms.200>
- [6] L. S. Arias, L. Vanegas, “Falla de los materiales compuestos laminados,” *Sci. Tech.*, no. 25, pp. 113–118, 2004.
- [7] N. Du, Z. Yang, X. Y. Liu, Y. Li, H. Y. Xu, “Structural Origin of the Strain-Hardening of Spider Silk,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 21, no. 4, pp. 772–778, 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/ADFM.201001397>
- [8] A. Zaheri et al., “Revealing the Mechanics of Helicoidal Composites through Additive Manufacturing and Beetle Developmental Stage Analysis,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 33, p. 1803073, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/ADFM.201803073>
- [9] A. Tasdemirci et al., “Crushing behavior and energy absorption performance of a bio-inspired metallic structure: Experimental and numerical study,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 131, no. July, pp. 547–555, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.051>

- [10] B. Kumbasa, “Progressive Interlaminar Failure Analysis in Composite Missile Structures,” 2016. [En línea]. Disponible en: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12620477/index.pdf>
- [11] K. Wu et al., “Discontinuous fibrous Bouligand architecture enabling formidable fracture resistance with crack orientation insensitivity,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 27, no. 117, p. 8, 2020, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2000639117>
- [12] R. Kienzler, I. Ott, H. Altenbach, Eds., *Theories of Plates and Shells*, vol. 16. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [13] J. N. Reddy, “Theory and analysis of laminated composite plates,” in *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 1999, pp. 1–79, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-011-4489-6_1
- [14] P.-Y. Y. Chen, J. McKittrick, M. A. A. Meyers, “Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 8, pp. 1492–1704, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.03.001>
- [15] D. Wang, A. Zaheri, B. Russell, H. Espinosa, P. Zavattieri, “Fiber reorientation in hybrid helicoidal composites,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 110, p. 103914, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103914>
- [16] A. Zaheri et al., “Revealing the Mechanics of Helicoidal Composites through Additive Manufacturing and Beetle Developmental Stage Analysis,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 33, pp. 1–11, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201803073>
- [17] B. Zelazny, A. C. Neville, “Quantitative studies on fibril orientation in beetle endocuticle,” *J. Insect Physiol.*, vol. 18, no. 11, pp. 2095–2121, 1972, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(72\)90243-0](https://doi.org/10.1016/0022-1910(72)90243-0)
- [18] A. V. Melnik, A. Goriely, “Dynamic fiber reorientation in a fiber-reinforced hyperelastic material,” *Math. Mech. Solids*, vol. 18, no. 6, pp. 634–648, 2013, doi: <https://doi.org/10.1177/1081286513485773>
- [19] E. Castillo-Sebastián, “Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos,” trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2016. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72577/CAS_TILLO%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20criterios%20de%20fallo%20para%20materiales%20compuestos.pdf?sequence=4