

DISEÑO DE MATERIALES COMPUESTOS PARA AUMENTO DE TENACIDAD BAJO EL ENFOQUE DE DISEÑOS BIO-INSPIRADOS

DESIGN OF COMPOSITES FOR TOUGHNESS ENHANCEMENT UNDER THE BIO-INSPIRED DESIGN APPROACH

Javier A. Zambrano^a, Alfredo E. Huespe^a, Santiago Serebrinsky^b, Sebastian Toro^a y
Pablo J. Sánchez^{a,c}

^aCIMEC-UNL-CONICET, Guemes 3450, CP 3000 Santa Fe, Argentina,
zambranoj88@cimec.unl.edu.ar, ahuespe@cimec.unl.edu.ar, storo@cimec.unl.edu.ar,
psanchez@cimec.unl.edu.ar, <https://cimec.conicet.gov.ar/>

^bYTEC-YPF-Tecnología, santiago.serebrinsky@ypftecnologia.com, <https://y-tec.com.ar/>

^cGIMNI-UTN-FRSF, Lavaise 610, CP 3000 Santa Fe, Argentina, gimni@frsf.utn.edu.ar,
<https://www.frsf.utn.edu.ar>

Palabras clave: materiales compuestos tipo nácar, resistencia a la fractura, propagación de fisuras, modelo de campo de fase, modelo de zona cohesiva.

Resumen. La gran mayoría de los compuestos biológicos, incluyendo los huesos, dientes y nácares, son interesantes de estudiar ya que poseen propiedades de resistencia a la fractura superiores a la de sus componentes. La compleja mezcla de sus constituyentes tanto rígidos como blandos contribuye a mejorar el comportamiento a la fractura. Este estudio se realiza con el propósito de comprender la resistencia a la fractura de los diseños bio-inspirados, a través de la implementación acoplada del modelo de campo fase y el modelo de interface de superficie cohesiva (Zambrano et al. (2022)). Se analiza el proceso de fractura, desde la iniciación del daño, la propagación de múltiples grietas hasta el fallo del material. Las simulaciones numéricas muestran que se puede obtener una mejora de la tenacidad a la fractura.

Keywords: nacre-like composites, fracture resistance, crack propagation, phase-field model, cohesive zone model.

Abstract. The great majority of biological composites, including bones, teeth and nacre, are interesting to study as they exhibit fracture toughness properties superior to those of their constituents. The complex mixture of both stiff and soft constituents contributes to improved fracture behavior. This study is performed with the purpose of understanding the fracture toughness of bio-inspired designs through the coupled implementation of the phase-field model and the cohesive surface interface model (Zambrano et al. (2022)). The fracture process, from damage initiation, multiple crack propagation to material failure, is analyzed. Numerical simulations show that an improvement in fracture toughness can be obtained.

1. INTRODUCCIÓN

Un propósito importante del estudio de los biomateriales es imitar su exquisita estructura para desarrollar materiales artificiales bioinspirados con unas características mecánicas avanzadas. El nácar es conocido por su atractiva combinación de rigidez, resistencia y dureza. Las impresionantes propiedades mecánicas del nácar pueden atribuirse a su estructura básica tipo 'brick-and-mortar'. Dicha estructura se compone de aproximadamente un 95 % de Aragonita ('tableta' de fase rígida con un módulo de Young entre 50-100 GPa) y un pequeño porcentaje de macromoléculas orgánicas ('interface' de fase blanda con un módulo de Young entre 50-100 MPa) (Ji y Gao (2004)). Este tipo de morfología se repite y se observa en diferentes escalas de longitud, como si fuese una microestructura replicada jerárquicamente en distintos niveles de observación, que contribuyen a la tenacidad y dureza del nácar.

En algunas especies de nácar se observan puentes minerales en las capas de la matriz orgánica (Song et al. (2002)), islotes minerales a nanoescala tanto en la superficie superior e inferior de las tabletas (Wang et al. (2001)), ondulaciones de las tabletas y entrecruzamientos de las mismas. Por otra parte, se observan arquitecturas únicas de nanopartículas y biopolímeros en las placas de Aragonita del nácar, que hasta ahora se consideraban frágiles, lo que permite la propagación de grietas en el interior de dichas placas y mejora enormemente la dureza y la resistencia (Huang y Li (2013); Li et al. (2014)). La estructura básica de tipo 'brick-and-mortar' y las estructuras detalladas de subnivel mencionadas afectan a las interacciones de los materiales duros y blandos, que son la clave de las excepcionales propiedades mecánicas del nácar (Barthelat et al. (2007); Katti et al. (2005)). Las propiedades mecánicas superiores de estas estructuras tipo nácar se deben a la mezcla ingeniosa de sus materiales constitutivos que poseen propiedades de fractura contrastadas. Ji y Gao (2004) descubrieron que las grandes relaciones de aspecto y una alineación escalonada de las plaquetas minerales son los factores clave que contribuyen a la gran rigidez y resistencia de los nanocompuestos biológicos. En presencia de pregrietas, los materiales heterogéneos mixtos tienen mecanismos de fractura específicos a diferentes escalas de longitud para evitar el fallo catastrófico por alta concentración de tensiones alrededor de la punta de la grieta. Los resultados experimentales de Dimas y Buehler (2014) dilucidaron el papel de las variaciones de la relación de rigidez de los constituyentes del material compuesto como una característica importante en la determinación de las propiedades globales del material.

Investigaciones previas han intentado abordar los mecanismos de la alta tenacidad de los biocompuestos desde varios puntos de vista, incluyendo sus estructuras jerárquicas (Menig et al. (2000); Kamat et al. (2000)), las propiedades mecánicas de la proteína (fase blanda) en la disipación de la energía de fractura (Smith et al. (1999)), la rugosidad de la interfaz proteína-mineral (Wang et al. (2001)) y la reducción de la concentración de tensiones en una grieta (Okumura y de Gennes (2001)). Por ende, los diferentes mecanismos analizados los cuales producen un aumento de la tenacidad estructural tanto en diferentes materiales compuestos, como en los diseños bioinspirados se encuentran plenamente relacionados con un criterio mixto en el cual intervienen las relaciones entre la tenacidad y la resistencia de los materiales que componen al medio y las interfaces presentes en los modelos y esto se puede ver evidenciado en trabajos pasados donde se estudia ampliamente el problema de una grieta incidiendo en una interfaz implementando diferentes enfoques tanto analíticos como numéricos. Un mecanismo que resulta ser remarcable para aumentar la tenacidad se refiere al desvío de las fisuras, siguiendo las interfaces de las placas cerámicas, evitando que la fisura penetre las mismas. Una serie de estudios se han desarrollado para la mejor comprensión de este mecanismo, He y Hutchinson (1989a)

utilizaron métodos de ecuaciones integrales, suponiendo materiales isotrópicos elásticos lineales a ambos lados de la interfaz, estimaron el rango de tenacidad de la interfaz “Gi”, relativo a la tenacidad media del material en el lado no agrietado del sustrato “Gs”, que probablemente provoca la desviación de las grietas hacia la interfaz, en lugar de penetrar en ella. El análisis de [He y Hutchinson \(1989a\)](#) se basa en un criterio puramente energético e incluye casos de materiales frágiles disímiles a ambos lados de la interfaz, así como diferentes ángulos de incidencia entre la grieta que se propaga y la interfaz. [Martínez y Gupta \(1994\)](#) utilizaron una técnica analítica semejante para investigar el problema de la desviación de la grieta en una interfaz que une dos materiales elásticos ortotrópicos y observaron que, a diferencia de los criterios basados en la resistencia, el criterio de la tasa de liberación de energía adoptado para predecir las interacciones es muy sensible a los valores de los parámetros del material, dicha observación es importante para las soluciones obtenidas en este trabajo.

Por otra parte, pueden utilizarse varias técnicas numéricas para evaluar los mecanismos de interacción entre grietas que propagan e inciden en una interfaz [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#) estudiaron este problema implementando modelos de zonas cohesiva para representar tanto la propagación de grietas en el medio, como para simular la degradación de la interfaz hasta su decohesión final. Concluyeron que el mecanismo de interacción resultante depende típicamente de un criterio mixto de resistencia-tenacidad; véase también [Strom y Parmigiani \(2014\)](#). Este hecho es sumamente relevante y se analiza con más detalle en este trabajo concluyendo la presencia de un criterio mixto similar al presentado por [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#) obtenido de la implementación numérica de un modelo de campo de fase acoplado con un modelo de superficie cohesiva. [Zambrano et al. \(2022\)](#) analizaron el fenómeno de interacción entre una grieta que propaga en un medio y que incide en una interfaz implementado un modelo de campo de fase acoplado con un modelo de superficie cohesiva, donde a través del modelo de campo de fase se simuló la propagación de la grieta en el medio y por medio del modelo de superficie cohesiva se simuló el proceso de degradación de la interface adhesiva, llegando a reproducir de manera satisfactoria la presencia de un criterio mixto de resistencia-tenacidad similar al presentado por [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#). Esta temática es sumamente relevante porque dicho criterio mixto se puede ver evidenciado en los diferentes diseños bioinspirados basados en la estructura tipo nácar, como será detallado en este estudio. Por lo tanto, en este trabajo se realiza la aplicación de una implementación numérica acoplada que comprende a los modelos de campo de fase y de superficie cohesiva con el objetivo de evidenciar el aumento de tenacidad en diferentes diseños bioinspirados utilizando la configuración de la estructura tipo nácar, llegando al modelo el cual disipa mayor cantidad de energía y consecuentemente lograr reproducir de manera satisfactoria el cumplimiento de un criterio mixto de resistencia-tenacidad como los obtenidos en los trabajos de [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#) y [Zambrano et al. \(2022\)](#).

2. METODOLOGIA Y RESULTADOS

Este trabajo está basado en los estudios realizados en [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#) y [Zambrano et al. \(2022\)](#), donde se realiza la implementación de una herramienta numérica, en este caso compuesta por los modelos acoplados de campo de fase y de superficie cohesiva, la cual es aplicada en el análisis de diferentes geometrías correspondientes a los diseños bioinspirados, los mismos están compuestos de una fase rígida (componente mineral) y una fase blanda (componente de proteína), donde con el modelo de campo de fase se estudia el comportamiento de la fase rígida del material y con el modelo de superficie cohesiva se analiza el comportamiento de la fase blanda que se compone de interfaces tanto horizontales como verticales. Esquemáticamente el modelado mecánico aplicado en la herramienta numérica se representa en la Fig. 1.

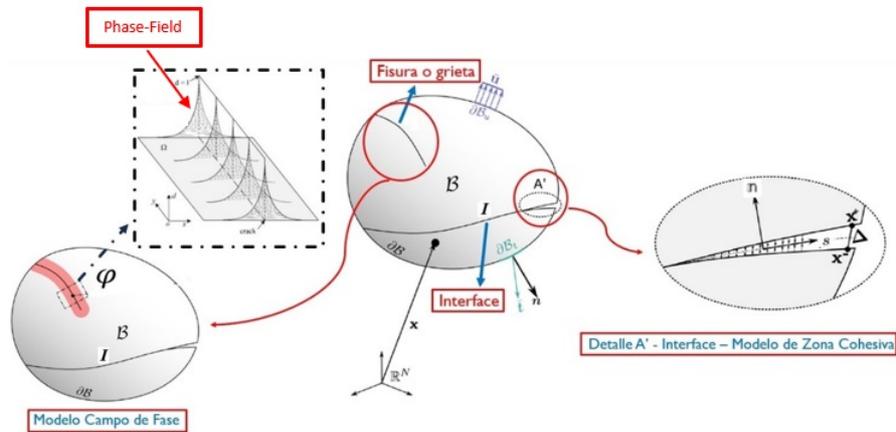


Figura 1: Esquema de modelado mecánico aplicado en la implementación numérica.

Por ende, la herramienta numérica fue trabajada bajo un enfoque de tipo staggered (por etapas), donde primero es resuelto el problema mecánico para posteriormente resolver el problema de campo de fase, teniendo en cuenta la resolución de cada una de las ecuaciones gobernantes que constituyen a cada problema y que se muestran en la Fig. 2. Donde (1) es la ecuación convencional de Cauchy en forma local, (2) es la ecuación de equilibrio de tracciones en el borde del cuerpo, (3) y (4) representan las condiciones de tracción y salto de desplazamiento en la interface del cuerpo, (5) es el balance de fuerzas microscópicas local, (6) representa el equilibrio de micro-tracciones generalizadas en el contorno del cuerpo, finalmente (7) y (8) son las condiciones de micro-tracciones y salto de desplazamiento en la interface del cuerpo.

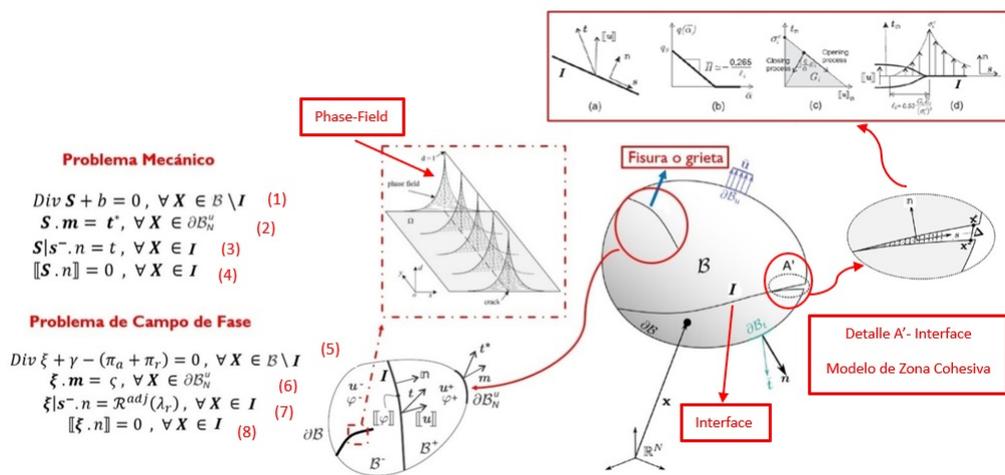


Figura 2: Ecuaciones gobernantes para los problemas mecánico y de campo de fase aplicadas en la fase rígida del material de los diseños bioinspirados y descripción esquemática del modelo de interface de superficie cohesiva aplicado a la fase blanda del material.

Por consiguiente, también en la Fig. 2 se visualiza el modelo de superficie cohesiva con el cual se simuló el proceso de degradación de las interfaces tanto horizontales como verticales

pertenecientes a la fase blanda que componen a los modelos geométricos de los diseños bioinspirados. El estudio se focaliza en la evaluación de la estructura tipo 'brick-and-mortar' del nácar, tomando en cuenta diferentes parámetros geométricos como lo son: la fracción de volumen de la fase rígida, la relación de aspecto de la tableta y el ángulo de ondulación de la tableta, el cual define el efecto de entrelazamiento en las celdas unitarias que conforman los modelos geométricos. Por lo tanto, en este trabajo utilizamos tres tipos de configuraciones de la estructura tipo nácar, denominadas como: 'Flat Table', 'Interlocking' y 'Non-Interlocking'. A continuación, en la Fig. 3 se muestran los modelos geométricos que fueron analizados, con sus correspondientes dimensiones y condiciones de borde impuestas. En cuanto a los parámetros geométricos que fueron utilizados para definir la construcción de las celdas unitarias que conforman cada una de las configuraciones mostradas en la Fig. 3, tomando en cuenta el ángulo de ondulación que forman las interfaces pertenecientes a la fase blanda, que en este trabajo se definieron con el valor numérico de 10° y -10° , en la Fig. 4, se representa a detalle la construcción de las celdas unitarias.

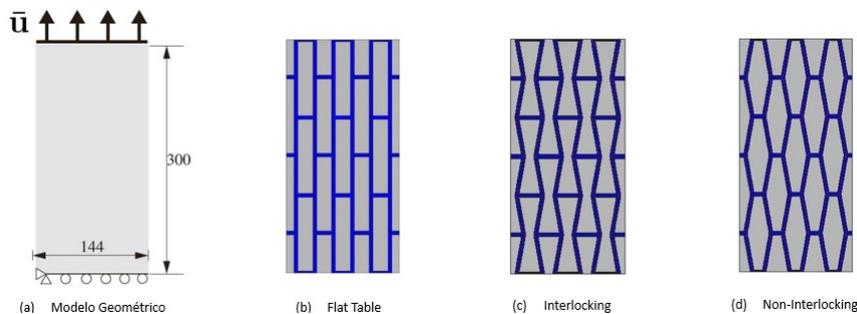


Figura 3: Estructuras compuestas tipo nácar: (a) Dimensiones de la geometría y condiciones de borde aplicadas, (b) Configuración Flat Table, (c) Configuración Interlocking, (d) Configuración Non-Interlocking.

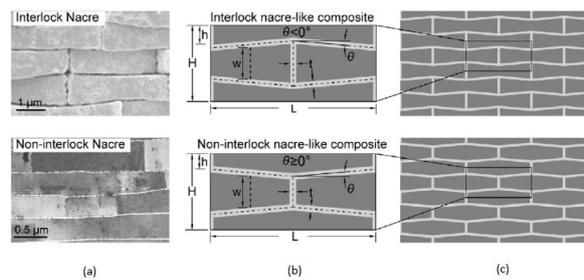


Figura 4: (a) Imagen de *Hyriopsis cumingii* con configuración entrelazada (Interlocking), (b) Parámetros geométricos (H, h, L, w, t en mm y θ en grados) de celdas unitarias, (c) Configuraciones Interlocking y Non-Interlocking para estructura tipo nácar.

Para llevar a cabo las respectivas simulaciones se elaboraron mallas que estaban compuestas de elementos cuadriláteros lineales asumiendo deformación plana donde, en la fase rígida se implementó un tipo de mallado no estructurado y por su parte en la fase blanda (Interfaces horizontales y verticales) se utilizó un mallado de tipo estructurado acompañado de una capa de elementos elásticos mallado de la misma forma. El número de elementos totales utilizados en la malla de la configuración tipo Flat Table fue de 15067 elementos, en la configuración tipo Interlocking se utilizaron 17564 elementos y finalmente en la configuración Non-Interlocking

se utilizaron 14789 elementos. Detallando las condiciones de borde impuestas se tiene que se fijaron los grados de libertad verticales del borde inferior de todas las configuraciones analizadas, así como también se restringió en todas las direcciones el nodo inferior izquierdo para evitar movimientos de cuerpo rígido y se aplicó una carga tipo desplazamiento (Δu) en el borde superior de todas las estructuras que fueron estudiadas. En cuanto a las propiedades mecánicas utilizadas en el modelado mecánico, las mismas para el caso del modelo de campo de fase se utilizó una longitud característica (L_c) de $1.06E-1$ mm, con una energía de fractura (G_f) de 0.8 N/mm, el Módulo de Young (E) de la fase rígida fue 1930 Mpa y un coeficiente de poisson de 0.33. La capa elástica estuvo configurada con un Módulo de Young (E) de 30 Mpa y un coeficiente de poisson de 0.4. Finalmente, el modelo de interface de superficie cohesiva estuvo configurado para las interfaces verticales con un Módulo de Young (E) de 30 Mpa, un coeficiente de poisson de 0 y una tensión última de 2.5 Mpa, por su parte para las interfaces horizontales el Módulo de Young (E) fue de 120 Mpa, con un coeficiente de poisson de 0 y una tensión última de 4 Mpa. En la Fig. 5 se muestran las mallas que fueron utilizadas por tipo de configuración en las diferentes simulaciones.

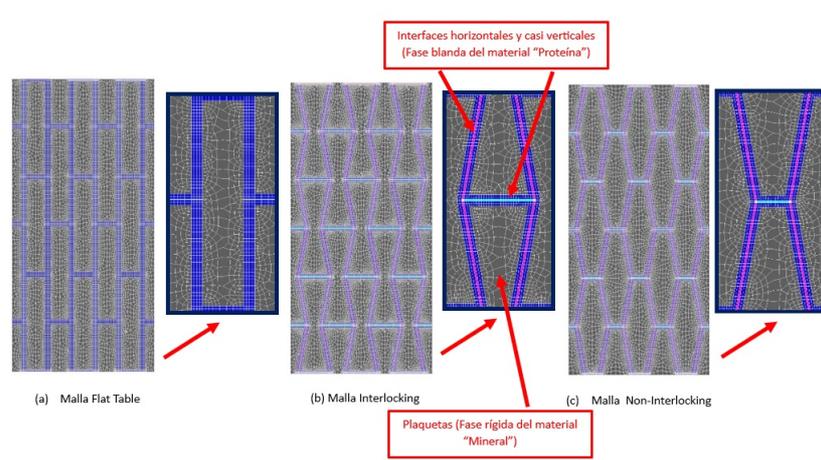


Figura 5: (a) Malla y celda unitaria para la configuración Flat Table, (b) Malla y celda unitaria para la configuración Interlocking y (c) Malla y celda unitaria para la configuración Non-Interlocking.

Las soluciones obtenidas en cuanto a la deformación de las distintas configuraciones que fueron estudiadas, poseen como protagonista principal a las interfaces tanto horizontales como verticales compuestas de material blando, ya que dicha deformada cumple con un proceso, el cual está dividido en dos etapas, que corresponden al momento de la activación de las interfaces presentes en los respectivos modelos geométricos, estas etapas de deformación se pueden observar en la Fig. 6. Por consiguiente, se evidencia el proceso completo de la deformación a nivel global en todos los tipos de configuraciones geométricas (Flat Table, Interlocking, Non-Interlocking) que fueron simuladas, donde se puede visualizar que en la ETAPA I del proceso se activan las interfaces horizontales y esto correspondería con el punto A, el cual es el primer pico de la curva tensión-deformación mostrada en la Fig. 6, y representaría el inicio de la evolución del daño en las interfaces horizontales, posteriormente se alcanza un segundo pico en la curva tensión-deformación denominado el punto B que corresponde a la ETAPA II, en el cual se activan las interfaces verticales y casi verticales, evidenciándose un modo de apertura de fractura de tipo deslizamiento para finalmente llegar al final de la curva tensión-deformación representada por el punto C en el cual las muestras fallan completamente. Se observó que este

mecanismo de falla es igual para todas las configuraciones geométricas que fueron analizadas y consecuentemente lo que genera la división de la curva tensión-deformación en dos etapas donde el σ_I perteneciente al primer pico de la curva representaría la resistencia de las interfaces horizontales y a su vez el valor de tensión dominante de la estructura del material compuesto, que define la resistencia global del mismo, y el σ_{II} ubicado en el segundo pico de la curva representaría la resistencia de las interfaces verticales y casi verticales.

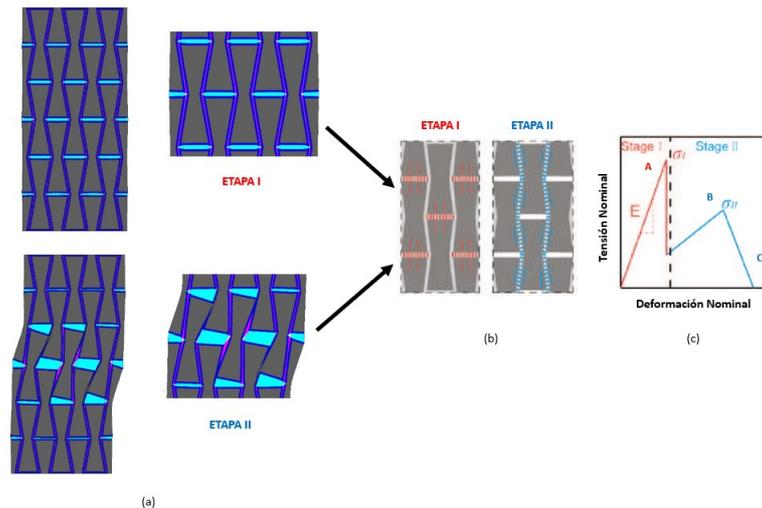


Figura 6: Proceso de deformación para la configuración Interlocking: (a) Mecanismo de falla de las interfaces obtenida de la simulación numérica, (b) Deformación teórica por etapas de las interfaces, (c) Curva teórica de tensión-deformación clasificada por etapas de deformación.

En cuanto a los resultados relacionados con el comportamiento de las curvas estructurales (Fuerza vs Desplazamiento) para cada tipo de configuración geométrica, las mismas se muestran en la Fig 7. En dichas curvas se puede verificar la respuesta a la tracción dividida en dos etapas, como se describió anteriormente. Por ende, se puede observar que la configuración Interlocking (curva verde) presenta tanto mayor rigidez como mayor resistencia global en comparación con las configuraciones Non-Interlocking y Flat Table, ya que su primer pico en su curva estructural que correspondería al punto A de la curva teórica tensión-deformación de la Fig. 6c y a su vez correspondería al valor σ_I , supera grandemente a las otras dos curvas estructurales pertenecientes a la configuración Flat Table y Non-Interlocking, la razón de esta situación se puede atribuir al aumento de la longitud de las interfaces casi verticales en su interconexión en forma de punta con las interfaces horizontales, respetando el efecto de entrelazamiento cuando el ángulo de ondulación en la tableta es menor que 0° , ya que el entrelazamiento suprime la propagación de la grieta alrededor de la interconexión en punta entre las interfaces horizontales y verticales cuando las tabletas se deslizan una con respecto a la otra, consecuentemente esta configuración Interlocking es la estructura que presenta mayor energía disipada, ya que el área bajo su curva estructural es mayor en comparación al área de las curvas de las demás configuraciones. Por otro lado, en la segunda etapa de las curvas estructurales hay un dominio perteneciente a la configuración Non-Interlocking (curva azul) sobre las demás configuraciones, ya que presenta el mayor valor de tensión σ_{II} , correspondiente al punto B de la curva teórica tensión-deformación de la Fig. 6c. y en este caso la configuración Interlocking posee el valor de tensión σ_{II} , más bajo de las tres curvas estructurales.

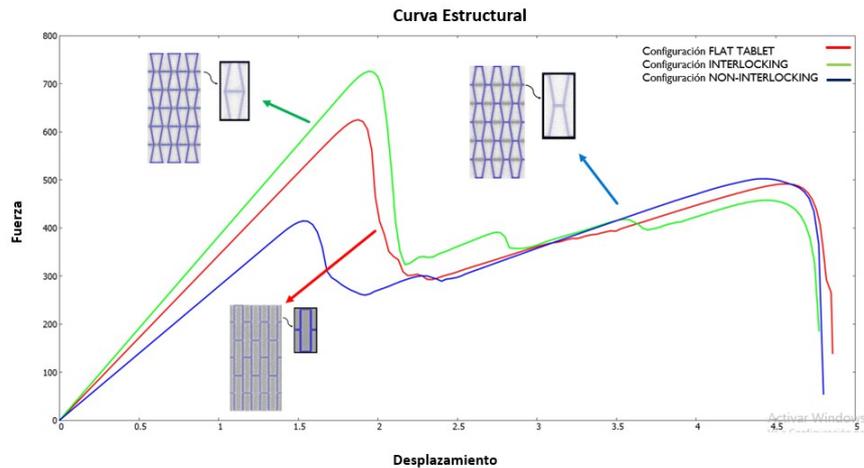


Figura 7: Curvas estructurales para las configuraciones: Flat Table, Interlocking y Non-Interlocking.

Por consiguiente, las distribuciones de tensiones σ_{yy} y la evolución del daño (Phase-Field) presentes en la fase rígida del material, se pueden observar en la Fig. 8. Donde se visualiza que en la configuración Interlocking existe un mayor valor de tensión cuya distribución es más amplia alrededor de todas las zonas de entrelazado entre las interfaces, lo que contribuye a aumentar la resistencia general de la estructura Interlocking en comparación con las demás configuraciones (Flat Table, Non-Interlocking), donde se evidencia un menor valor de tensión, pero la distribución de la misma se ubica de igual forma que la configuración Interlocking en la interconexión entre las interfaces.

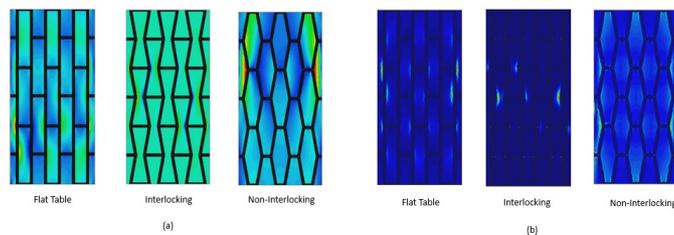


Figura 8: (a) Distribución de tensiones σ_{yy} en las configuraciones Flat Table, Interlocking, Non-Interlocking, (b) Evolución del daño (Phase-Field) en las configuraciones Flat Table, Interlocking, Non-Interlocking

Un análisis con respecto a los mecanismos de deflexión y penetración en términos de las propiedades de resistencia y tenacidad del material que fue utilizado se describe a continuación en la Fig. 9, la cual fue obtenida trabajando con la configuración geométrica Flat Table. Se visualiza en dicha gráfica un espacio que se define por las siguientes variables en sus ejes: en el eje vertical se tiene la relación entre la energía de fractura de la fase rígida del material (G_{fr}) y la energía de fractura de la fase blanda del material (G_{fb}), con respecto al eje horizontal se tiene la relación entre la tensión crítica de la fase rígida del material (σ_{fr}^c) y la tensión crítica de la fase blanda del material (σ_{fb}^c). Se observa el comportamiento del mecanismo de deflexión perteneciente a los puntos en forma de cuadrado que se sitúan sobre la curva roja, cada uno de estos puntos es el resultado de una simulación que muestra físicamente como una grieta se desvía por las interfaces verticales de la estructura Flat Table y el mecanismo de penetración

que comprende los puntos circulares sobre la curva azul, en la cual cada punto es el resultado de una simulación donde físicamente una grieta propaga a través de las tabletas cerámicas del material. Por otro lado, se puede observar que existe una zona disjunta entre ambas curvas lo cual significa que ambos mecanismos compiten para ver cual de los dos prevalece y a esto se le denomina zona de transición. Se tiene que la parte superior derecha del gráfico representa el caso en que es muy probable que la grieta se desvíe hacia las interfaces verticales de la estructura produciéndose la deflexión, mientras que la parte inferior izquierda del mismo representa el caso en que es muy probable que la grieta penetre hacia la tableta cerámica del material dando lugar a la penetración. Se puede inferir que a bajos valores de las relaciones G_{fr}/G_{fb} y $\sigma_{fr}^c/\sigma_{fb}^c$ se favorece la presencia del mecanismo de penetración, por el contrario, valores elevados de estas relaciones favorecen al mecanismo de deflexión, finalmente se nota que a medida que disminuye la relación de resistencia $\sigma_{fr}^c/\sigma_{fb}^c$ se origina un comportamiento asintótico vertical aproximadamente situado en un valor para $\sigma_{fr}^c/\sigma_{fb}^c = 3,8$ donde por debajo de este valor siempre predominara el mecanismo de penetración. Por lo tanto, se puede afirmar que se captura de manera satisfactoria el mismo comportamiento de las curvas de deflexión y penetración que se encuentran en los trabajos de [Parmigiani y Thouless \(2006\)](#) y [Zambrano et al. \(2022\)](#).

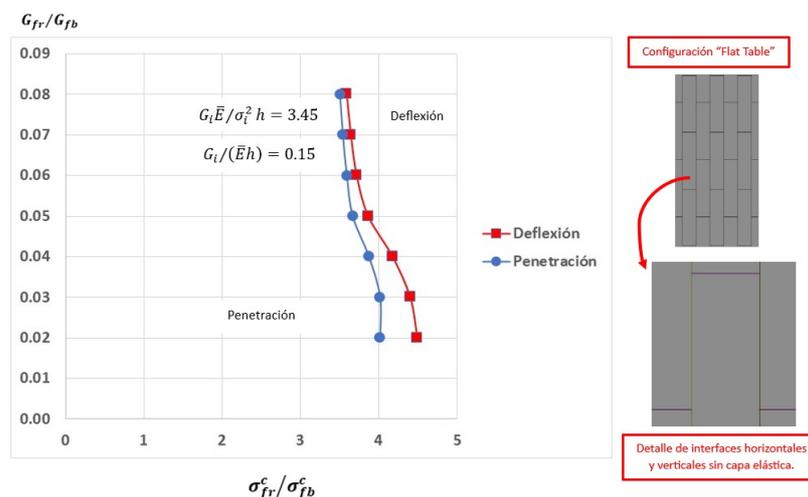


Figura 9: Curvas de mecanismos de deflexión y penetración para configuración Flat Table.

3. CONCLUSIONES

En este estudio, se evalúa el diseño de estructuras compuestas resistentes a la fractura mediante la implementación acoplada del modelo de campo de fase y el modelo de superficie cohesiva. Estas estructuras que conllevan a los diseños bioinspirados se componen de materiales que poseen una fase rígida (mineral) y una fase blanda (proteína) y que presentan una respuesta a la fractura muy interesante. Por ende, se puede inferir lo siguiente:

-La implementación numérica utilizada en el estudio el cual comprende el acoplamiento del modelo de campo de fase y el modelo de superficie cohesiva captura de manera satisfactoria las respuestas complejas en cuanto a los mecanismos que producen un aumento de tenacidad en los diseños bioinspirados.

-Se demostró que la estructura Interlocking de tipo nácar mejora tanto la tenacidad como la resistencia en comparación con las configuraciones Flat Table y Non-Interlocking, por consiguiente, en la estructura Interlocking el campo de tensión es mucho mayor en comparación a

las demás estructuras debido al efecto de entrelazado de la fase blanda.

-Se demuestra que el parámetro geométrico relacionado con el ángulo de ondulación de la tableta juega un rol fundamental en el aumento de la tenacidad de las estructuras entrelazadas, pero sin descartar que los otros dos parámetros geométricos como lo son la relación de aspecto de la tableta y la fracción de volumen de la fase rígida también pueden contribuir a dicho aumento de tenacidad manejando la combinación de los tres parámetros.

-Se valida que en los diseños bioinspirados de tipo nácar la presencia de los mecanismos de deflexión y penetración se produce como consecuencia de un criterio mixto en el que juegan un papel fundamental tanto la resistencia como la tenacidad de las fases materiales (rígida y blanda) que intervienen en las estructuras geométricas.

REFERENCIAS

- Barthelat F., Tang H., Zavattieri P., Li C.M., y Espinosa H. On the mechanics of mother-of-pearl: a key feature in the material hierarchical structure. *Mech. Phys. Solids*, 55 (2):306–337., 2007.
- Dimas L. y Buehler M. Modeling and additive manufacturing of bioinspired composites with tunable fracture mechanical properties. *SoftMatter*, 10 (25):4436–4442, 2014.
- He M. y Hutchinson J. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials. *Int. J. Solids Struct*, 25 (9):1053–1067, 1989a.
- Huang Z. y Li X. Origin of flaw-tolerance in nacre. *Sci. Rep*, 3:1693, 2013.
- Ji B. y Gao H. Mechanical properties of nanostructure of biological materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 52:1963–1990, 2004.
- Kamat S., Su X., Ballarini R., y Heuer A. Structural basis for the fracture toughness of the shell of the conch strombus gigas. *Nature*, 405:1036–1040, 2000.
- Katti K., Katti D., Pradhan S., y Bhosle A. Platelet interlocks are the key to toughness and strength in nacre. *J. Mater. Res*, 20 (5):1097–1100, 2005.
- Li H., Yue Y., Han X., y Li X. Plastic deformation enabled energy dissipation in a bionano wire structured armor. *Nano Lett*, 14 (5):2578–2583, 2014.
- Martinez D. y Gupta V. Energy criterion for crack deflection at an interface between two orthotropic media. *Mech. Phys. Solids*, 42 (8):1247–1271, 1994.
- Menig R., Meyers M., Meyers M., y Vecchio K. Quasi-static and dynamic mechanical response of haliotis rufescens (abalone) shells. *Acta mater*, 48:2383–2398, 2000.
- Okumura K. y de Gennes P.G. Why is nacre strong? elastic theory and fracture mechanics for biocomposites with stratified structures. *Eur.Phys.J.E*, 4:121–127., 2001.
- Parmigiani J. y Thouless M. The roles of toughness and cohesive strength on crack deflection at interfaces. *J. Mech. Phys. Solids*, 54 (2):266–287, 2006.
- Smith B., Schaer T., Viani M., Thompson J., Frederick N., Kindt J., Belcher A., Stucky G., Morse D., y Hansma P. Molecular mechanistic origin of the toughness of natural adhesives and composites. *Nature*, 399:761–763, 1999.
- Song F., Zhang X., y Bai Y. Microstructure and characteristics in the organic matrix layers of nacre. *J. Mater*, 17 (7):1567–1570., 2002.
- Strom J. y Parmigiani J. Transition of crack path at bi-material interfaces. *Eng. Fract. Mech*, 115:13–21, 2014.
- Wang R., Suo Z., Evans A., Yao N., y Aksay I. Deformation mechanisms in nacre. *J. Mater. Res*, 16:2485–2493, 2001.
- Zambrano J., Toro S., Sánchez P., Duda F., Méndez C., y Huespe A. Interaction analysis between a propagating crack and an interface: Phase field and cohesive surface models. *International Journal of Plasticity*, 156:103341, 2022.