

EFFECTO DE LA INTERFASE SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO LOCAL Y LA RESPUESTA ELÁSTICA DE MATERIALES COMPUESTOS

EFFECT OF INTERFASE ON LOCAL STRESS DISTRIBUTION AND THE ELASTIC RESPONSE OF COMPOSITE MATERIALS

RIVERA SALINAS, Jorge Enrique

MORALES AMAYA, Corazón
Giovanna

RESUMEN

Los materiales compuestos exhiben propiedades mecánicas controladas por el nivel de adhesión interfacial que une a sus fases constitutivas. Este trabajo demuestra el rol crítico de la interfase en la distribución del esfuerzo local y, por ende, en la rigidez global de los materiales compuestos. Se llevó a cabo análisis por elementos finitos basado en micromecánica mediante una celda unitaria bidimensional (2D), con una matriz flexible y partículas rígidas embebidas considerando dos escenarios interfaciales: una unión ideal (coherente) y una unión débil. Las simulaciones se validaron con modelos analíticos clásicos de micromecánica, como el de Shioya y de teoría de campo medio como el de Mori-Tanaka, obteniendo una diferencia menor al 6 % de desviación. Los resultados mostraron que una interfase débil genera mayor concentración de esfuerzo local en la región ecuatorial de las partículas— duplicando los valores respecto a una interfase ideal— lo que incrementa la probabilidad de falla. En contraste, una interfase coherente favorece la transferencia efectiva de carga, incrementando el módulo elástico del compuesto respecto a la matriz pura. Ya que el índice crítico para determinar el rendimiento de un material es el módulo elástico —el cual influye directamente en el diseño de las estructuras— los resultados obtenidos aportan criterios de diseño aplicables a sistemas poliméricos, cerámicos y metálicos donde la sinergia entre fases define su funcionalidad.

Palabras clave: materiales compuestos; interfase; micromecánica; análisis de elementos finitos; rigidez efectiva.

Centro de Investigación en
Química Aplicada, Saltillo,
Coahuila, México

Correspondencia
enrique.rivera@ciqa.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-5968-1782>
Fecha de recepción
4 de julio de 2025.
Fecha de aceptación
16 de enero de 2026.

ABSTRACT

Composite materials exhibit mechanical properties governed by the level of interfacial adhesion that binds their constituent phases. This work demonstrates the critical role of the interface in the distribution of local stress and, consequently, in the overall stiffness of composite materials. Micromechanics based finite element analysis was carried out using a two-dimensional (2D) unit cell, with a compliant matrix and embedded rigid particles, considering two interfacial scenarios: an ideal (coherent) bond and a weak bond.

The simulations were validated with classical analytical micromechanical models, such as Shioya's model and mean-field theory approaches like the Mori-Tanaka model, showing less than 6% deviation. The results revealed that a weak interface produces a higher local stress concentration in the equatorial region of the particles—doubling the values compared to an ideal interface—which increases the probability of failure. In contrast, a coherent interface promotes effective load transfer, enhancing the composite's elastic modulus relative to the pure matrix.

Since the critical parameter for determining a material's performance is the elastic modulus—which directly influences structural design—the results obtained provide design criteria applicable to polymeric, ceramic, and metallic systems where the synergy between phases defines their functionality.

Keywords: composite materials; interface; micromechanics; finite element analysis; effective stiffness

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos se diseñan a partir de dos o más materiales, con el objetivo de lograr un desempeño superior al que los constituyentes pueden ofrecer individualmente. En términos generales, estos materiales se conforman por dos o más entidades con una interfase reconocible entre ellas. La sinergia positiva de los materiales compuestos depende en gran medida de factores como la fracción volumétrica, la habilidad de interacción entre las fases (interfase) y su arreglo geométrico o distribución. Típicamente, la fase continua se denomina matriz y tiene la función de sostener y cohesionar los



constituyentes, mientras que el reforzante o inhomogeneidad aporta la rigidez necesaria para soportar la carga externa aplicada (Nemat y col., 1998).

El parámetro crítico para el diseño estructural es el módulo elástico o rigidez del material, directamente establecido por la distribución de esfuerzos y deformaciones a nivel microestructural. En ese sentido, es necesario estudiar la relación entre el estado de esfuerzo local y la respuesta efectiva del compuesto para comprender su comportamiento mecánico efectivo.

La modelación matemática basada en micromecánica ofrece un marco riguroso y sistemático para analizar el comportamiento de materiales multicomponentes, ya que describe explícitamente la distribución de esfuerzo y tensión a nivel microestructural permitiendo la transición de información de la micro a la macroescala mediante el uso de una celda unitaria (CU) o un elemento de volumen representativo (EVR) (Nemat y col., 1998). Estas metodologías han sido ampliamente utilizadas para estimar las propiedades mecánicas efectivas y analizar las deformaciones en sistemas heterogéneos, tanto mediante modelos analíticos como numéricos.

A partir de los principios variacionales de la energía, se han desarrollado teorías micromecánicas para predecir los límites superiores e inferiores del módulo elástico como las estimaciones de Hashin-Strikman (Hashin y col., 1963). Sin embargo, la respuesta efectiva de los materiales compuestos depende en gran medida de las condiciones interfaciales, las cuales pueden verse afectadas por defectos de unión, desprendimiento o fractura (Qu, 1993). Por esta razón, se han propuesto modelos micromecánicos en teoría de campo medio, o auto consistente (considera la interacción entre los constituyentes), como el método de Mori-Tanaka (M-T). El método de M-T permite incorporar el efecto de la adhesión interfacial para predecir el módulo efectivo de los materiales compuestos en presencia de daño interfacial, asumiendo una capa delgada de la interfase, en la cual, ocurren tracciones interfaciales continuas, mientras que los desplazamientos en ambos lados de la interfase son discontinuos en el límite donde desaparece el espesor de dicha interfase (Kim y col., 2019).

Por otra parte, el análisis de elemento finito (FEA) basado en micromecánica constituye una herramienta numérica robusta que, permite abordar características microestructurales complejas (Arreola y col., 2018), tiene la posibilidad de implementar un amplio rango de modelos constitutivos no lineales y elementos especializados en las fronteras que representan

efectivamente la interacción matriz-reforzante. Dichos elementos permiten analizar el estado de unión en sistemas multicomponentes, como el caso de los materiales compuestos, conectando a la matriz y refuerzo mediante una fuerza que es proporcional a los desplazamientos discontinuos correspondientes (Bolson y col., 2022, Wu-Gui y col., 2014, Inoue y col., 2019, Rivera y col., 2024).

Estudios numéricos previos demuestran que el FEA basado en micromecánica ha mejorado la capacidad de adaptar las propiedades de materiales multicomponentes, como mezclas poliméricas (dos fases) y materiales compuestos (matriz con inclusiones embebidas), entre otros. Por ejemplo, Rivera y col., (Rivera-Salinas y col., 2020) realizaron un estudio numérico para analizar el efecto que tiene la porosidad y geometría del reforzante, en los compuestos de aluminio (Al) y carburo de silicio (SiC) asumiendo que la interfase Al/SiC es coherente o está perfectamente unida. Los resultados mostraron que el módulo efectivo es sensible a la porosidad en la matriz de Al, y los defectos en la interfase actúan como concentradores de esfuerzo. Además, los compuestos con partículas de SiC porosas exhiben un comportamiento elástico efectivo similar al de los compuestos con porosidad en la interfase, cuando las partículas son angulares. Los resultados numéricos se validaron comparando las predicciones contra datos experimentales del módulo elástico de compuestos Al/SiC, y evidenciaron situaciones que pueden llevar a la interpretación errónea de los resultados experimentales.

Rivera y col. (2024) realizaron un estudio numérico de micromecánica para comprender el efecto que tiene el grado de adhesión interfacial sobre la distribución del esfuerzo local, y la respuesta efectiva en una mezcla de ácido poliláctico (PLA) y almidón termoplástico (TS). Considerando una geometría esférica de la fase dispersa predijeron y analizaron sistemáticamente datos experimentales en tensión del módulo elástico, reportados en la literatura a distintas fracciones volumétricas en el rango de 10 a 20%. Encontraron que el esfuerzo se distribuye uniformemente en la fase dispersa (TS), con un valor mucho menor que el esfuerzo portado por la fase continua (PLA), y que la mayor concentración de esfuerzo se ubica en la interfase PLA/TS, en el ecuador de la partícula independientemente del grado de adhesión. En ese sentido, el PLA es el componente de la mezcla que soporta la mayor porción de la carga externa, independientemente del grado de adhesión interfacial, esto debido a que es el constituyente más rígido, evidenciando que, favorecer la adhesión interfacial en ese tipo de mezclas no favorece su rigidez efectiva.

Ghouse y col., (Ghouse y col., 2011) utilizaron la simulación numérica para analizar explícitamente el comportamiento microscópico y la respuesta efectiva de compuestos de mortero reforzados con agregados gruesos, adoptando una interfase ideal o coherente y un comportamiento frágil de la interfase. Observaron que la presencia de una interfase débil reduce la capacidad de que el material soporte carga externa ya que promueve la formación de poros en la propia interfase.

Gupta y col. (2015) a través del análisis de elementos finitos, cuantificaron los efectos del tamaño y forma de las inclusiones suaves y duras, en la formación de huecos y su evolución a través de la interfase matriz-inclusión. Observaron que la forma de la inclusión impacta en la magnitud de la concentración de esfuerzo. Las inclusiones duras inducen la formación de huecos en la interfase cuando la ésta es débil, y el tamaño de los huecos incrementa conforme al tamaño de partícula. Por otro lado, para interfases coherentes, los esfuerzos se concentran en las partículas cuando la inclusión es dura, y en la matriz cuando la inclusión es suave.

Los estudios previamente mencionados sobre el comportamiento mecánico de los materiales compuestos destacan la importancia de correlacionar sistemáticamente los campos de esfuerzo y tensión local a nivel microestructural, con la respuesta efectiva del material. En particular, para el diseño de los materiales compuestos, analizar aspectos críticos de manera sistemática, como el tipo de interfase, permite comprender su efecto sinérgico y mejorar su diseño.

Considerando que la interfase juega un papel fundamental en la respuesta macroscópica de los materiales compuestos, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el efecto del tipo de interfase (coherente o débil) sobre la distribución del esfuerzo local y la respuesta elástica de un material compuesto mediante un enfoque análisis de elementos finitos basado en micromecánica.

Se plantea como hipótesis que la optimización de la interfase de los materiales compuestos constituye una estrategia efectiva para extraer el potencial de los reforzantes y controlar las propiedades mecánicas efectivas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El desarrollo del modelo se basó en un enfoque micromecánico que adopta el concepto de celda unitaria (CU) de tipo cuadrada y bidimensional (2 D),

representativa del volumen del material compuesto. Este enfoque permite analizar sistemáticamente la influencia de la interfase sobre la distribución de esfuerzos locales y la rigidez efectiva del compuesto (Rivera-Salinas y col., 2024).

Las propiedades elásticas de la matriz y la partícula reforzante (inhomogeneidad) se designaron como $E_m = 1 Pa$, $v_m = 0.25$ y $E_i = 10 Pa$, $v_i = 0.25$, respectivamente, donde E_α es el módulo elástico y v_α el coeficiente de Poisson ($\alpha = m, i$, donde m corresponde a la matriz e i a la partícula o inhomogeneidad). La fracción volumétrica de la partícula se consideró en el rango de 10 a 30 %.

Los campos de esfuerzo y deformación del compuesto, sometido a deformación extensional, se calcularon utilizando la ecuación de equilibrio (Ecuación 1).

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (1)$$

Donde σ es el tensor de esfuerzo. Se adoptó un modelo elástico lineal isotrópico para describir la relación esfuerzo-deformación, como se demuestra en la ecuación 2.

$$\sigma = D\varepsilon \quad (2)$$

Donde D , ε son la matriz de rigidez y la tensión, respectivamente. El efecto de la interfase se incorporó mediante una fuerza que conecta la matriz con la partícula reforzante, proporcional a los desplazamientos discontinuos en la frontera común, según en la ecuación 3.

$$f^m = -f^f = K_s (u^m - u^f) \quad (3)$$

Donde, f^m, f^f, K_s, u^m, u^f son la fuerza/unidad de área en la matriz, la fuerza/unidad de área en la partícula, la matriz de rigidez, y los desplazamientos en la matriz y la partícula, respectivamente. Los esfuerzos y tensiones macroscópicas se obtuvieron como el promedio del área superficial (Ω) de los esfuerzos y deformaciones microscópicas con las ecuaciones 4 y 5.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \sigma(x, y) d\Omega \quad (4)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \varepsilon(x, y) d\Omega - \frac{1}{2\Gamma} \int_{\Gamma} (u \otimes n + n \otimes u) d\Gamma \quad (5)$$

Donde Γ representa la longitud de la interfase. El último término de la ecuación 5 es la tensión efectiva que resulta por los desplazamientos discontinuos en la interfase (Achenbach y Zhu, 1989).

El módulo elástico efectivo del compuesto se obtuvo aplicando la Ley de Hook generalizada, sustituyendo los resultados de las ecuaciones 5 y 6. Las ecuaciones se resolvieron en el software COMSOL Multiphysics, utilizando un enfoque totalmente acoplado donde el campo de desplazamientos se aproximó con elementos triangulares cuadráticos. Soluciones independientes del mallado convergieron con ~ 800 elementos. La celda unitaria está sujeta a condiciones de borde que imitan la deformación extensional como se muestra en la Figura 1, donde f_x es la fuerza aplicada. El sistema de ecuaciones lineales que resultan en cada iteración se resolvieron utilizando el solucionador directo del tipo MUMPS (Rivera y col., 2023).

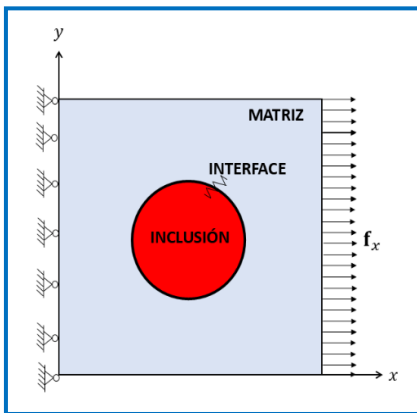


Figura 1. Celda unitaria y sus correspondientes condiciones de borde.

VERIFICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MODELADO

Para validar la estrategia de modelado y su solución numérica, los resultados obtenidos se compararon con soluciones analíticas ampliamente aceptadas en la literatura de micromecánica, como el modelo de Shioya (Shioya, 1967), que predice el esfuerzo máximo (σ^{max}) en la frontera matriz-inhomogeneidad, y el método de Mori-Tanaka (M-T), que permite estimar el módulo elástico efectivo de materiales

compuestos (L^{eff}) considerando el efecto interfacial (Kim y col., 2019).

El modelo de Shioya (Shioya 1967) considera la deformación elástica de una inhomogeneidad circular en una placa semi-infinita sometida a una carga de tracción uniforme de acuerdo con la ecuación 6.

$$\sigma^{max} = \sigma^0 \left[\frac{1}{(1 + \nu_m) + (1 + \nu_i)\beta} + \frac{2}{(3 - \nu_m) + (1 + \nu_i)\beta} \right], \beta = \frac{E_m}{E_i} \quad (6)$$

Donde, σ^0 es la tracción aplicada, y β representa la relación de módulos de elasticidad (E_α $\alpha = m, i$, donde m corresponde a la matriz e i a la partícula o inhomogeneidad).

Por otro lado, el método de Mori-Tanaka está descrito por las siguientes ecuaciones (Kim y col., 2019).

$$\mathbf{T}^M = \left[\mathbf{I} + \mathbf{S} : \mathbf{L}^{m-1} : (\mathbf{L}^i - \mathbf{L}^m) + \frac{\gamma_s}{R} (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{L}^i : \mathbf{L}^{m-1} : \mathbf{L}^i \right]^{-1} \quad (7)$$

Donde, \mathbf{T}^M , \mathbf{I} , \mathbf{S} , \mathbf{L}^m , γ_s , R , y \mathbf{L}^i son el tensor de tensión modificado, la matriz identidad, el tensor de Eshelby para inclusiones esféricas, el tensor de rigidez elástico de la matriz, el efecto interfacial, el radio de la inhomogeneidad, y el tensor de rigidez elástica de la inhomogeneidad, respectivamente.

$$\mathbf{L}^{eff} = \left[\phi_m \mathbf{L}^m + \phi_i \mathbf{L}^i : \mathbf{T}^M \right] : \left[\phi_m \mathbf{I} + \phi_i \mathbf{T}^M + \phi_i \frac{\gamma_s}{R} \mathbf{L}^i : \mathbf{T}^M \right]^{-1} \quad (8)$$

Donde, ϕ_m , ϕ_i son la fracción volumétrica de la matriz y la inhomogeneidad, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 2 y 3 muestran la distribución de esfuerzos en la matriz e inhomogeneidad bajo deformación extensional para dos tipos de interfase estudiados.

En el caso de una interfase ideal o coherente (Figura 2), el esfuerzo máximo se concentra en la frontera matriz-partícula, particularmente en los polos de la inhomogeneidad, alcanzando una magnitud de 0.14 Pa. Este esfuerzo se distribuye de manera uniforme en el interior de la partícula o inhomogeneidad y disminuye progresivamente hacia la matriz, donde el valor mínimo es de aproximadamente 0.09 Pa. En la región ecuatorial de la inhomogeneidad se observa un descenso súbito del esfuerzo en la región de la matriz con un valor de 0.03 Pa, seguido de un incremento gradual hasta 0.09 Pa. Estos resultados concuerdan con los reportados por Xie y col., (Xie y col., 2011), y Ghouse y col., (Ghouse y col., 2011), quienes demostraron que en sistemas con inclusiones rígidas y óptima adhesión interfacial, el esfuerzo se transfiere eficientemente a través de la frontera coherente desde la matriz hacia el reforzante.

Por otra parte, utilizando el modelo propuesto por Shioya (Shioya, 1967), Ecuación (6), para predecir el valor del esfuerzo máximo en la frontera de la

matriz y la inhomogeneidad, guía a un valor analítico de 0.145 Pa. Midiendo la diferencia entre el valor numérico y el analítico del esfuerzo máximo con

$$\left| \frac{(\sigma_{\text{analítico}}^{\text{max}} - \sigma_{\text{numérico}}^{\text{max}})}{\sigma_{\text{analítico}}^{\text{max}}} \right|, \text{ se obtiene una diferencia de } \sim 3.5\%, \text{ indicando}$$

que la predicción numérica concuerda satisfactoriamente con el resultado analítico.

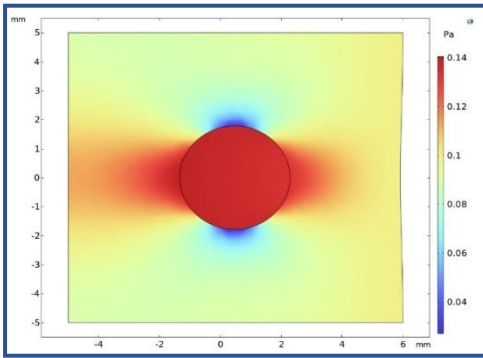


Figura 1. Distribución de esfuerzo local en un compuesto con interfase ideal o coherente.

En el caso de la interfase débilmente unida (Figura 3), el esfuerzo máximo alcanza 0.27 Pa, y se concentra principalmente en la matriz en una zona adyacente al ecuador de la partícula. En este escenario, el esfuerzo portado por la inhomogeneidad es virtualmente nulo indicando que el constituyente del compuesto que soporta la carga externa aplicada es la matriz. Se observan cavidades

alargadas en los polos de la partícula que evidencian la separación de la interfase matriz-partícula. El esfuerzo que se desarrolla en la matriz adyacente a tales cavidades tiene un valor prácticamente nulo.

Comparando ambos casos, se puede observar que, una interfase débil genera mayores concentraciones de esfuerzo local, duplicando los valores obtenidos para una unión ideal. Esto implica una mayor probabilidad de alcanzar esfuerzos críticos de falla e iniciación de grietas, especialmente en la región de la matriz cercana al ecuador de la partícula. Esto revela el rol crucial que tiene la interfase para que la matriz logre transferir el esfuerzo hacia el reforzante, y permitir que los constituyentes creen sinergia mecánica e incrementen la rigidez del compuesto.

Los resultados de este trabajo demuestran que el tipo de adhesión interfacial—ideal (coherente) o débil— no solo determina cuál de las fases presentes en un material compuesto —matriz o reforzante— cargará la mayor porción de la fuerza externa aplicada, sino que también influye significativamente en la región de concentración de esfuerzos y en su magnitud. Ejemplos de implicación práctica que tiene una buena adhesión interfacial a parte de incrementar la rigidez de los compuestos como resultado de una transferencia eficiente de esfuerzo entre la matriz y el reforzante, es que también mejora la

tenacidad y resistencia al impacto ya que evita la formación y propagación de grietas al reducir la concentración de esfuerzo en la matriz (Rivera y col., 2024), y reduce la posibilidad de delaminación en los compuestos, entre otras.

Por otra parte, cabe destacar que las predicciones numéricas sobre la magnitud y ubicación del máximo esfuerzo concentrado en función del tipo de interfase, concuerdan favorablemente con los reportado por Thornton (Thornton, 1971).

Respecto a la respuesta efectiva en la rigidez o módulo elástico del compuesto, la Figura 4 muestra el efecto que tienen el tipo de interfase (ideal o débil) y la fracción volumétrica (ϕ), la cual varía en 10, 20 y 30 %. Las predicciones numéricas se presentan con una línea azul y verde, para la interfase ideal y débil, respectivamente. En la Figura 4 también se presentan las predicciones del módulo efectivo predicho con el método de Mori-

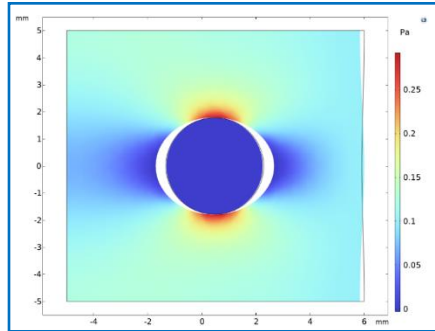


Figura 3. Distribución de esfuerzo local en un compuesto con interfase débil.

Tanaka (M-T) con efecto interfacial (Ecuaciones (7) y (8)). Las estimaciones analíticas se presentan con un círculo rojo y un rombo negro, para la interfase ideal y débil, respectivamente. En el escenario de la interfase ideal o coherente, se observa que el módulo de elasticidad del compuesto incrementa debido a que existe una transferencia de esfuerzo óptima desde la matriz hacia el refuerzo, cerca de duplicar el valor de la matriz pura cuando el contenido de partículas es de 30 %. Sin embargo, en el caso opuesto donde la interfase es débil, se observa que para una cantidad relativamente baja de reforzante (10 %) aumenta la rigidez del compuesto respecto al valor de matriz pura un 20 %, y a partir de esa concentración de reforzante (10 %) la rigidez disminuye ligeramente conforme incrementa la cantidad de reforzante, debido a que independientemente la cantidad de reforzante, la mayor parte de la carga externa la soporta la matriz del compuesto. Por otro lado, una comparación entre los resultados predichos numéricamente y de

forma analítica con el método de M-T utilizando $\left| \frac{(E_{M-T} - E_{numérico})}{E_{M-T}} \right|$

indica una desviación máxima del 6 %, la cual corresponde al escenario de una interfase débil con fracción volumétrica del 30 %, ($E_{numérico} = 1.186$ Pa y

$E_{M-T} = 1.116 \text{ Pa}$), indicando que la predicción numérica está en buena concordancia con el resultado analítico. Es importante mencionar que el método de M-T es particularmente apropiado cuando el contenido de reforzante es relativamente bajo debido a que el modelo se concibió bajo el enfoque de concentración diluida (Nemat y col., 1998).

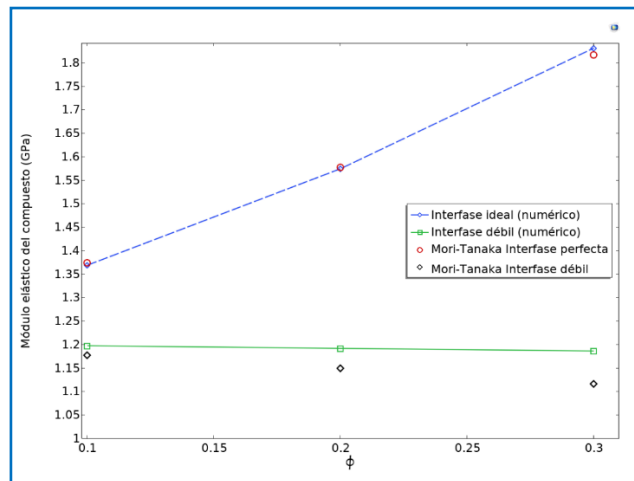


Figura 4. Efecto del tipo de interfase (ideal o débil) y fracción volumétrica en el módulo elástico efectivo de un compuesto.

Este tipo de análisis puede extrapolarse a sistemas poliméricos, metálicos y cerámicos utilizados en aplicaciones estructurales, donde la sinergia entre fases determina su rendimiento. Finalmente, se reconoce que el modelo está simplificado por la geometría bidimensional. Sin embargo, estos supuestos establecen una base sólida para futuras extensiones tridimensionales, las cuales pueden incorporar comportamiento plástico, daño progresivo o condiciones de carga más complejas.

CONCLUSIONES

El análisis por elementos finitos basado en micromecánica permitió comprender de forma sistemática el papel que desempeña la interfase en la distribución del esfuerzo local y en la rigidez efectiva de los materiales compuestos.

Se verificó que el tipo de interfases influye de manera decisiva en la magnitud y la ubicación del esfuerzo máximo concentrado. En los sistemas con interfase ideal o coherente, el esfuerzo máximo se localiza principalmente en el refuerzo, debido a la transferencia eficiente de carga lo que implica un incremento notable en la rigidez global. Por el contrario, en los compuestos con interfase débil, el esfuerzo se concentra principalmente en la matriz y duplica su magnitud respecto al caso ideal repercutiendo en la posible formación de grietas prematuras.

El modelo numérico desarrollado mostró buena concordancia con las soluciones analíticas de Shioya y Mori-Tanaka, validando la estrategia de modelado adoptada y confirmando su aplicabilidad para predecir el comportamiento mecánico en la escala micro y macro en materiales compuestos.

En conjunto, los resultados evidencian que el control de la adhesión interfacial es un parámetro crítico para optimizar la respuesta mecánica de los compuestos. Fomentar una unión coherente entre matriz y refuerzo permite diseñar materiales con mayor rigidez y confiables lo cual es particularmente relevante en aplicaciones estructurales.

Finalmente, este estudio proporciona una base sólida para la extensión del modelo a sistemas tridimensionales y a condiciones de carga complejas, con el fin de evaluar el efecto combinado de la adhesión interfacial y deformaciones no lineales en el comportamiento global del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo a la SECIHTI (Proyecto 809), al Centro de Investigación en Química Aplicada, y al LANIAUTO (Proyecto 321156).

REFERENCIAS

- Achenbach, J. D., & Zhu, H. (1989). Effect of interfacial zone on mechanical behavior and failure of fiber-reinforced composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 37(3): 381-393. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(89)90005-7)
- Arreola-Herrera, R., Cruz-Ramírez, A., Rivera-Salinas, J. E., Romero-Serrano, J. A., & Sánchez-Alvarado, R. G. (2018). The effect of non-metallic inclusions on the mechanical properties of 32 CDV 13 steel and their mechanical stress analysis by numerical simulation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94: 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.01.013>
- Ghouse, M. D., RAO, C. L., & Rao, B. N. (2011). Numerical modelling of failure of cement concrete using a unit cell approach. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 36(1): 35–51. <https://doi.org/10.1007/s12046-011-0008-6>
- Gupta, A., Goyal, S., Padmanabhan, K. A., & Singh, A. K. (2015). Inclusions in steel: micro–macro modelling approach to analyse the effects of inclusions on the properties of steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1–4): 565–572. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6464-5>
- Hashin, Z., & Shtrikman, S. (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2): 127-140. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
- Inoue, Y., Ikawa, T., & Okabe, T. (2019). Validation of micromechanics models including imperfect interfaces for short fiber thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials*, 28(6): 625-638. <https://doi.org/10.1080/09243046.2019.1630049>
- Jiang, W. G., Zhong, R. Z., Qin, Q. H., & Tong, Y. G. (2014). Homogenized finite element analysis on effective elastoplastic mechanical behaviors of composite with imperfect interfaces. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(12): 23389-23407. <https://doi.org/10.3390/ijms151223389>
- Lee, S., Kim, Y., Lee, J., & Ryu, S. (2019). Applicability of the interface spring model for micromechanical analyses with interfacial imperfections to predict the modified exterior Eshelby tensor and effective modulus. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 24(9): 2944-2960. <https://doi.org/10.1177/1081286519826343>
- Nemat-Nasser, S., Lori, M., & Datta, S. K. (1996). Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials. *Journal of Applied Mechanics*, 63(2): 56.1 <https://doi.org/10.1115/1.2788912>
- Qu, J. (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4): 269-281. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(93\)90082-3](https://doi.org/10.1016/0167-6636(93)90082-3)



- Rivera-Salinas, J. E., Gregorio-Jáuregui, K. M., Romero-Serrano, J. A., Cruz-Ramírez, A., Hernández-Hernández, E., Miranda-Pérez, A., & Gutiérrez-Pérez, V. H. (2020). Simulation on the effect of porosity in the elastic modulus of SiC particle reinforced Al matrix composites. *Metals*, 10(3): 2-19. <https://doi.org/10.3390/met10030391>
- Rivera-Salinas, J. E., Gregorio-Jáuregui, K. M., Sánchez-Valdés, S., Gutiérrez-Pérez, V. H., Lara-Sánchez, J., Cruz-Ramírez, A., Rodríguez-González, F. J., & Ramírez-Vargas, E. (2024). Effect of interface on elastic and toughening behavior in poly lactic acid/thermoplastic starch blends: Micromechanical finite element analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(4): 2-11. <https://doi.org/10.1002/app.54864>
- Shioya, S. (1966). On a Semi-Infinite Thin Plate with a Circular Inclusion under Uniform Tension. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 32(236): 593-600. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.32.593>
- Thornton, P. A. (1971). The influence of nonmetallic inclusions on the mechanical properties of steel: A review. *Journal of Materials Science*, 6 (4): 347-356. <https://doi.org/10.1007/PL00020378>
- Xie, J., Wang, A., Wang, W., Li, J., Yang, D., Zhang, K., & Ma, D. (2011). Stress field numerical simulation of the inclusions in large rudder arm steel casting. *Advanced Materials Research*, 311-313: 906-909. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.906>.