

COMPORTAMIENTO MICROMECHANICO DE COMPUESTOS CON MICRO DAÑO

Luis A. Godoy ^a, Ma. Victoria Mondragón ^b, Miguel A. Pando ^b, Felipe J. Acosta ^b

^a CONICET y FCEFN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina,
lgodoy@com.uncor.edu

^b Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez 00681-9041, Puerto Rico, vicky8204@hotmail.com

Palabras Clave: Degradación, Elementos Finitos, Materiales compuestos, Micromecánica, Vacíos.

Resumen. La evidencia experimental con que se cuenta al presente indica que en compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio, los mecanismos de daño por agentes higo-térmicos toman la forma de micro fisuras en la resina, en la fibra o en la interfase. Como consecuencia de este daño se introducen nuevas heterogeneidades en la celda unitaria del material. Tradicionalmente, las formas de modelar este daño son suponiendo la degradación localmente isotrópica de las propiedades constituyentes o mediante la inclusión de un conjunto de defectos en los constituyentes o en la interfase. En este trabajo se modela el daño en un estado plano de deformaciones perpendicular al plano de las fibras, suponiendo un conjunto de vacíos, cuyo número y forma son parámetros del estudio. Una celda unitaria incluyendo una fibra completa se modela usando plasticidad de von Mises en la resina, bajo esfuerzos cortantes o normales. Los resultados son más críticos bajo cortante y muestran escaso impacto sobre las propiedades elásticas del material (como módulos elásticos), pero tienen una fuerte influencia sobre las propiedades resistentes del material a nivel micro.

1 INTRODUCCION

La degradación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos debido a la acción de la humedad y la temperatura constituyen una preocupación crítica desde el punto de vista del diseño y la predicción de la vida útil. Estas degradaciones suelen designarse como envejecimientos, dado que el tiempo hace que se extiendan los procesos de difusión de humedad, abarcando zonas más extensas de la estructura y saturando el material, y que se profundice el daño en el nivel micro. En particular, este trabajo se refiere a materiales compuestos formados por una matriz de epoxi y fibras de vidrio, que han comenzado a usarse durante la última década para aplicaciones en infraestructura civil.

Los estudios experimentales llevados a cabo durante la última década no permiten obtener conclusiones definitivas sobre las consecuencias del envejecimiento, pero guían el camino de cualquier investigación computacional. El daño producido por humedad (a temperatura ambiente o elevada) depende fuertemente del líquido actuante y para comprender la naturaleza de la degradación es necesario considerar el comportamiento en el nivel micromecánico, que es el nivel del cual se derivan las propiedades macro de estos materiales. En general, el daño puede afectar la matriz, las fibras o la interfase entre ambos (sobre la zona ocupada por la matriz). El daño en la interfase ha sido observado por Cervenka (2004) en muestras sumergidas en vapor de agua. Los mecanismos de daño han sido considerados por Foulc et al. (2005), quienes identificaron etapas de plastificación, de degradación química, de evolución morfológica y de daño en la interfase, con posible separación entre materiales constituyentes (“debonding”). La evidencia muestra que aparecen grietas y vacíos que se acoplan a la humedad para conducir a un agrietamiento en el nivel macro. Se observaron caídas en módulos de elasticidad del orden de 40% bajo temperaturas de 120°C y 200 horas en el tanque. Kajorncheappunngam et al. (2002) estudiaron muestras a temperatura ambiente y a 60°C, con cuatro líquidos diferentes. La Figura 1 muestra una síntesis de algunos resultados relevantes para nuestro estudio. Se nota que la resistencia a tracción del compuesto se redujo en un 70%, pero los módulos elásticos permanecieron relativamente inalterados.

Considerando la evidencia experimental, se observa que se han obtenido resultados de ensayos a nivel macro sobre rigidez y resistencia, complementados con observaciones post-test del estado de la microestructura dañada. Resulta muy importante poder modelar la microestructura, con el fin de apreciar qué mecanismos son los que podrían (o no) modificar las propiedades del material. En base a esas premisas, este trabajo se concentra en el comportamiento micromecánico, suponiendo que ya haya ocurrido la degradación por algún mecanismo de envejecimiento y que el material se somete a esfuerzos debido a cargas exteriores. Al presente se carece de la evidencia empírica que permita correlacionar las características del agente agresivo (tipo de líquido, concentración y temperatura) con el daño en la microestructura, de manera que solamente se establecen escenarios de daño y estimaciones de sus consecuencias.

2 METODOLOGIA

Los modelos micromecánicos de compuestos se llevan a cabo considerando elementos de volumen representativos (EVR) o celda unitaria (CU). Por cierto que una CU es anisótropa, pero tanto la matriz como la fibra se suponen homogéneas e isótropas, de modo que el daño se localiza en la forma de vacíos o burbujas, o bien se distribuye mediante degradación de módulos.

Existen diversos estudios de daño en CU, como los reportados por Bonora y Rugerío (2005), Caporale et al. (2005) y Kwon (1997), pero el referente más importante para este

trabajo ha sido Kaminski (2005), quien propuso modelar el daño mediante defectos en la interfase en forma de vacíos, de modo que el número, tamaño y forma de los vacíos sean considerados como parámetros que definen una configuración de daño. La forma considerada en la interfase, con burbujas semicirculares sobre la matriz, ha sido inicialmente investigada en este trabajo.

Siguiendo el trabajo de Kaminski, una CU se supuso en estado plano de deformaciones, como se ilustra en la Figura 2. Esta celda contiene una fibra y su entorno, con dos tipos de vacíos: semicirculares y semielípticos. Un problema del modelado de CU es el establecimiento de condiciones de contorno de la celda (Godoy, 2003). Para representar la acción del tensor de tensiones que se consigue a nivel macro, las fuerzas de contorno en la celda son componentes de fuerza (normal o cortante) que actúan con distribución uniforme sobre el contorno. No se colocan restricciones cinemáticas en el contorno, dado que se pretende encontrar la respuesta en términos de deformaciones promedio de la CU. Siguiendo la teoría de homogenización, la deformación de la celda se obtiene integrando la deformación de los elementos. No se han considerado simetrías dentro de la celda para poder aplicar los esfuerzos cortantes en forma similar a la que aparecen en el tensor de esfuerzos, y así preparar el modelo para ser acoplado con el nivel macro. Nótese que en los trabajos de Kaminski (2005) y de Bonora y Ruggiero (2005) se supuso $\frac{1}{4}$ de la CU, lo que limita la aplicabilidad de sus resultados cuando las acciones locales son las componentes del tensor de tensiones.

Para seguir la evolución del material de la matriz se usó un modelo de plasticidad de von Mises sin endurecimiento por deformación. El dominio de la celda se discretizó con elementos triangulares de tres nodos (en base a estudios de convergencia se usaron mallas de más de 250,000 elementos para una celda con daños). El problema se resolvió usando el código ABAQUS (2003), con análisis incremental siguiendo el algoritmo de Newton-Raphson.

3 RESULTADOS PARA VACIOS SEMI-CIRCULARES EN CU

Las propiedades consideradas se reseñan en la Tabla 1. Como límite de fluencia de la matriz se usó 48.26 MPa (Sullivan et al., 2007).

Tabla 1 Propiedades de los materiales constituyentes (Barbero, 1998).

	Módulo de Elasticidad [MPa]	Módulo de Poisson	Esfuerzo de plasticidad [MPa]
Fibra de vidrio tipo E	84000	0.22	-
Matriz epoxi	4000	0.38	48.26

Las configuraciones para daño en la forma de vacíos semicirculares se adoptaron luego de investigar la redistribución de esfuerzos en la CU (Mondragón et al., 2008). Se consideraron tres fracciones de volumen (30%, 50%, 70%) y para cada una de ellas se supusieron escenarios de daño con 4, 8 y 16 vacíos, cuyos diámetros podían alcanzar 10%, 15%, 20% y 25% del diámetro de la fibra. Aunque no es posible correlacionar con certeza a qué niveles de ataque higrotérmico corresponde cada configuración, se entiende que el conjunto abarca un espectro amplio de posibilidades.

Los resultados se presentan en la forma de curvas de esfuerzos aplicado versus deformación de la CU, considerando esfuerzos cortantes sobre el borde de la celda. También se llevaron a cabo estudios con esfuerzos normales, pero los resultados no se presentan cambios tan pronunciados como bajo esfuerzos cortantes. Las Figuras 3-5 ilustran las

respuestas: de manera simplificada se puede suponer que cada curva sigue una parte inicial aproximadamente lineal hasta que se alcanza un *plateau*. Cambios en la pendiente están asociados a modificaciones de los módulos elásticos, mientras que cambios en el nivel del *plateau* corresponden a modificaciones en la resistencia. Se observa que todos los casos inician con igual pendiente (que es la misma del caso sin daño), hasta que se alcanza una deformación de aproximadamente 0.2%. Superado este estado, las curvas tienen algún aumento posterior, pero con pendiente fuertemente decreciente indicando que el daño se traduce allí en una pérdida de resistencia de material. El grupo dominante en cada caso marca una franja similar a la de plasticidad ideal, a partir de la cual ocurren deformaciones sin incrementarse la capacidad de la CU de tomar esfuerzos adicionales.

Para resumir la información anterior, la Figura 6 muestra la caída de resistencia con el aumento del nivel de daño expresado como volumen de vacíos sobre volumen de fibra. Cada curva en la figura fija el número de vacíos y la fracción de volumen de la fibra. Entre 4 y 8 vacíos, la interacción entre ellos es limitada y la caída es casi lineal.

Los cambios en módulos elásticos transversales G y longitudinales E no se muestran, pero fueron pequeños: para $V_f = 0.3$ con 4/8/16 vacíos, G se modificó en 4%, 8% y 11%. Para $V_f = 0.5$, los cambios en G fueron de 15%, 16% y 25%. Las caídas en E fueron: Para $V_f = 0.30$, 5%, 8% y 9%. Para $V_f = 0.50$, la pérdida del módulo E fue de 6%, 10% y 9%.

4 RESULTADOS PARA VACIOS SEMI-ELIPTICOS EN CU

Observaciones experimentales llevadas a cabo en el contexto de esta investigación (Mondragón, 2008) indican que la forma de daño debido a envejecimiento higrotérmico puede asimilarse mejor a vacíos de forma semi-elíptica, dado que un único vacío abarca sectores amplios del perímetro de la fibra con pequeña amplitud. La Figura 2 muestra una configuración estudiada, en la que el perímetro de la fisura es del 75% del diámetro de la fibra y también se estudiaron configuraciones con relaciones de perímetro de 25%, 50% y 100%.

Los valores cambian significativamente con respecto al caso de burbujas circulares, pero las tendencias son similares, como se muestra en las Figuras 7 y 8. La sensibilidad de la capacidad resistente de la CU se resume en la Figura 9. La pérdida de resistencia en este caso depende fuertemente de la fracción de volumen de la fibra en el compuesto, y es claramente mayor que para vacíos en forma semi-circular. De modo que la forma misma del daño micro parece ser crucial para lograr una efectiva representación del daño por envejecimiento.

5 RESULTADOS PARA VACIOS SEMI-ELIPTICOS EN EVR

La configuración estudiada anteriormente se refiere a una CU, pero no ilustra la respuesta cuando se considera un microdominio que involucre un número mayor de fibras en un EVR. Interesa saber cual es la desviación esperada entre CU y EVR. La Figura 11 muestra un sector con varias fibras, en donde una sola de ellas contiene desprendimiento entre fibra y matriz. La Figura 11.a muestra las zonas en las que se alcanza plasticidad de la matriz, ilustrando la extensión del daño esperable. Es interesante observar que para ese nivel de $V_f = 0.35$, las zonas dañadas se extienden también a fibras vecinas a la inicialmente dañada.

En la Figura 11.b se graficaron las respuestas esfuerzo-deformación para el EVR supuesto. Si se comparan los resultados de esta figura con los de la 7, se encuentra que hay un cambio en la pendiente (una caída en el EVR con respecto a la CU), pero el nivel de resistencia se mantiene prácticamente el mismo. Las comparaciones no son sencillas en este caso porque el

EVR se adoptó con fibras dispuestas de manera más o menos irregular, pero son indicativos en forma cualitativa que los efectos detectados a nivel CU también se observan en un EVR.

6 CONCLUSIONES

Davies et al. (1996) realizaron experimentos para observar la influencia de la absorción sobre las propiedades transversales de un compuesto de matriz polipropileno y fibra de vidrio, encontrando que no hubo cambios significativos en las propiedades transversales E_2 después de someter a inmersión en agua destilada. Algo similar obtuvieron Kajorncheappunngam et al. (2002) para diferentes líquidos. Los resultados computacionales presentados en este trabajo son consistentes con estas observaciones experimentales, de manera que es de esperar que un daño de origen higrotérmico no conducirá a cambios en los valores de los módulos elásticos. El motivo por el cual no aparecen cambios significativos es que los modelos de daño representan concentraciones de esfuerzos alrededor de un vacío, con redistribuciones localizadas, pero en promedio no cambian los valores de tensión y deformación medidos sobre la CU. Este efecto es propio de todos los problemas de concentraciones de tensión. El hecho que la evidencia empírica apunte en la misma dirección indica que los modelos están representando cualitativamente el fenómeno.

Por el contrario, nuestros resultados indican que el impacto fuerte de ese daño se traduce en cambios en la capacidad resistente del material en el nivel micro. Para daño modelado como vacíos semicirculares distribuidos simétricamente alrededor de la fibra, las pérdidas máximas fueron de 20-30% con respecto a la capacidad del material sin daño. Para daño modelado como vacío semielíptico, la reducción fue del 60-80%, dependiendo de las características del daño.

El trabajo en su estado actual tiene una serie de limitaciones: Primero, sería necesario contar con evidencia empírica específica a fin de correlacionar ataque higrotérmico con el daño micromecánico. Los resultados limitados con que se cuenta hasta el presente (Mondragón 2008, McBagonluri et al. 1999) para envejecimiento acelerado por temperatura indican claramente un daño similar a la forma semielíptica. Para envejecimiento de 18 días a 65°C se obtuvieron daños de 16-20% de perímetro de vacío con respecto a perímetro de fibra. Segundo, el objetivo final de este esfuerzo es acoplar el comportamiento micro con el macro, siguiendo los lineamientos de la teoría de homogenización. Un trabajo en esta dirección es el de Zalamea (2000), que puede servir de guía al presente. Tercero, se ha supuesto que el material se comporta plásticamente a nivel micro, tal como lo hace en el nivel macro. Hutchinson (2000) ha postulado que para metales es necesario introducir un factor de escala en la teoría de plasticidad micro, pero al presente no hay estudios equivalentes para materiales compuestos. Finalmente, los estudios se llevaron a cabo en dos dimensiones, pero para representar adecuadamente el daño deberían extenderse a tres.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a subsidios del Ministerio de Ciencias de la Provincia de Córdoba, de la Universidad Nacional de Córdoba y de la Universidad Tecnológica Nacional. En Estados Unidos, el trabajo fue financiado por un subsidio de ARO-DoD 51936-EV-H. Los resultados son por exclusiva responsabilidad de los autores.

REFERENCIAS

- ABAQUS (2003), “*User’s Manuals, Version 6.4*”. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Rhode Island.
- Bonora, N., Ruggiero, A. (2005a). “Micromechanical modeling of composites with mechanical interface – Part I: Unit Cell model development and manufacturing process effects”. *Composites Science and Technology*. Vol. 66 (2), pp. 314-323.
- Bonora, N., Ruggiero, A. (2005b). “Micromechanical modeling of composites with mechanical interface – Part II: Damage mechanics assessment”. *Composites Science and Technology*. Vol. 66 (2), pp. 324-332.
- Caporale, A., Luciano, R., Sacco, E. (2006). “Micromechanical analysis of Interfacial debonding in unidirectional Fiber-reinforced composites”. *Computers & Structures*. Vol. 84 (31), pp. 2201-2210.
- Cervenka, A., Young, R., Kueseng, K. (2004) “Micromechanical phenomena during hygrothermal ageing composites investigated by Raman spectroscopy”. *Composites: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 36 (7), pp. 1011-1019.
- Davies P., Pomies F., Carlsson L.A. (1996). “Influence of water Absorption on Transverse Tensile Properties and Shear Fracture Toughness of Glass/Polypropylene”. *Journal of Composite Materials*. Vol. 30 (9), pp. 1004-1019.
- Foulc, M.P., Bergeret, A., Ferry, L., Lenny, P., Crespy, A. (2005) “Study of hygrothermal ageing of glass Fiber reinforced PET Composites”. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 89 (3), pp. 462-469.
- Godoy, L.A. (2003), “Modelos y enfoques para problemas con acoplamiento de micro y macro estructuras”, *Mecánica Computacional*, vol. 22, pp. 1964-1984.
- Hutchinson, J. (2000), “Plasticity at the micron scale”. *Int. Journal of Solids and Structures*. Vol. 37 (1-2), pp. 225-238.
- Kaminski, M. (2005). “*Computational Mechanics of Composites Materials*”. Springer-Verlag, London.
- Kajorncheappunngam, S., Rakesh. K.G., GangaRao H.V. (2002). “Effect of Ageing Environment on Degradation of Glass-Reinforced Epoxy”. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 6 (1), pp. 61-69.
- Kwon, Y. (1997). “Study of damage evolution in composites using damage mechanics and micro-mechanics”. *Composites Structures*. Vol. 38 (1-4), pp. 133-139.
- McBagonluri F., Hayes M.D., Garcia K., Verghese K.E., Lesko J.J. (1999) “Environmental Mechanical Durability of E-glass/ Vinyl Ester Composites”. *International Journal of Fatigue*.
- Mondragón, M.V. (2008), “*Modelado de la Micromecánica de Materiales Compuestos Considerando Degradación Higrotérmica*”, Tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR.
- Mondragón, M.V., Godoy, L.A., Acosta, F.J., Pando, M.A. (2008), “Stress redistributions in unit cells of fiber-reinforced composites with interface degradation”, Proc. *SAMPE Fall Technical Conference*, Memphis, Tenn., Sept. 8-11.

Zalamea F. (2000), “*Tratamiento numérico de Materiales Compuestos mediante la Teoría de la Homogenización*”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

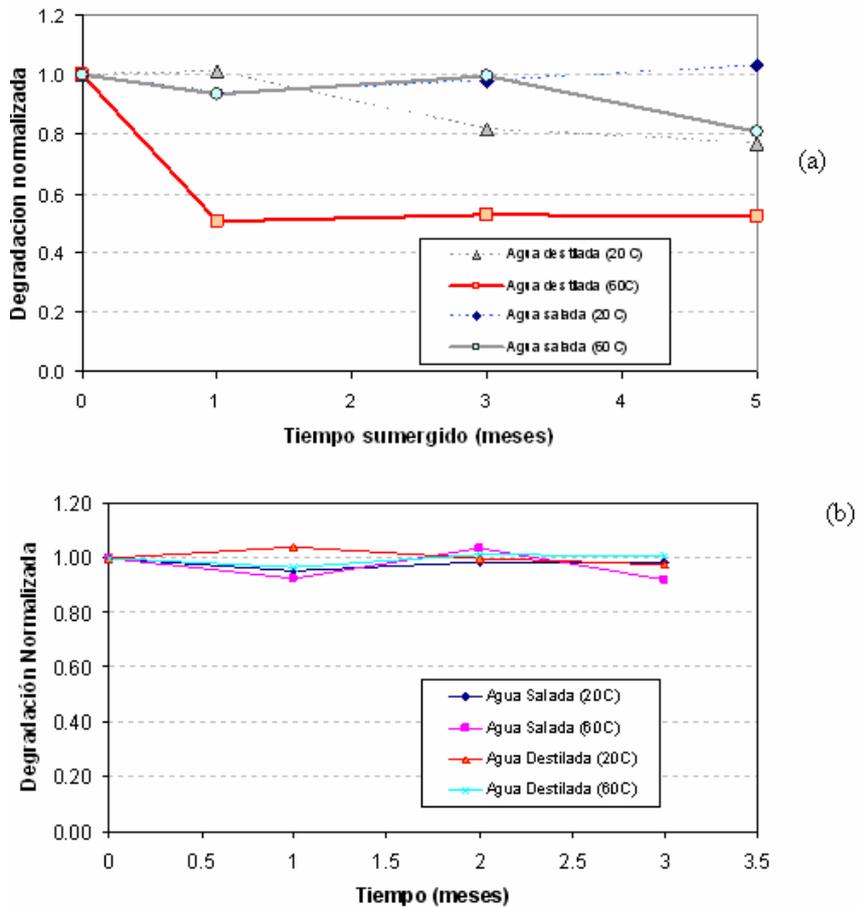


Figura 1. Degradación por efectos higrotérmicos. (a) degradación de la resistencia, (b) degradación del módulo de elasticidad. (Información tomada de Kajorncheappunngam et al. 2002)

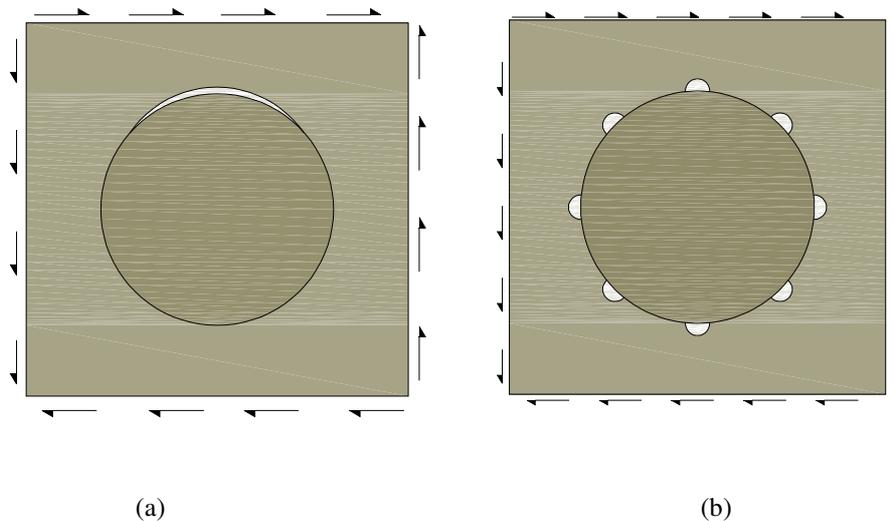


Figura 2 Estado de deformación plana bajo corte uniforme sobre el contorno (a) con daño en forma de vacío semi-elíptico (b) con daño en forma de vacíos semi-circulares.

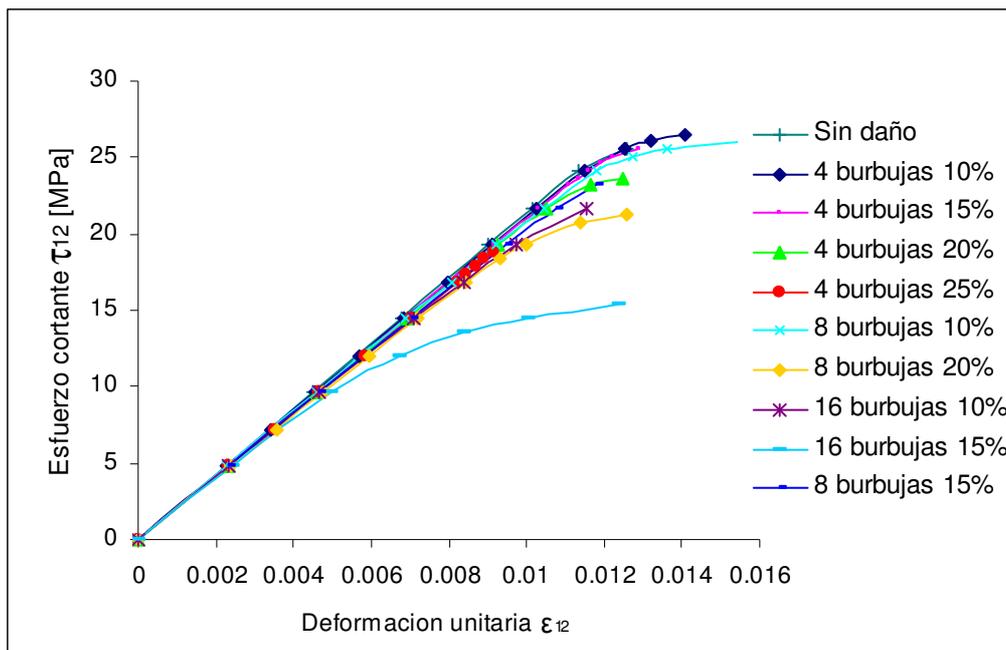


Figura 3 Curvas esfuerzo-deformación para un compuesto con fracción de volumen $v_f = 30\%$ bajo incrementos de cargas cortantes, para diferentes configuraciones supuestas de daño.

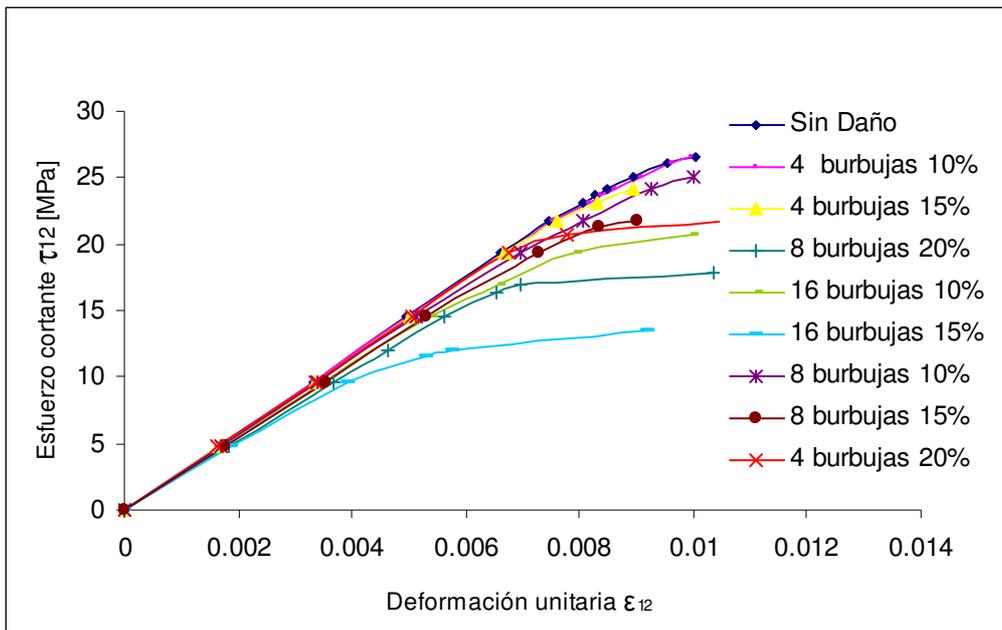


Figura 4 Curvas esfuerzo-deformación para un compuesto con fracción de volumen de 50% bajo incrementos de cargas cortantes, para diferentes configuraciones supuestas de daño.

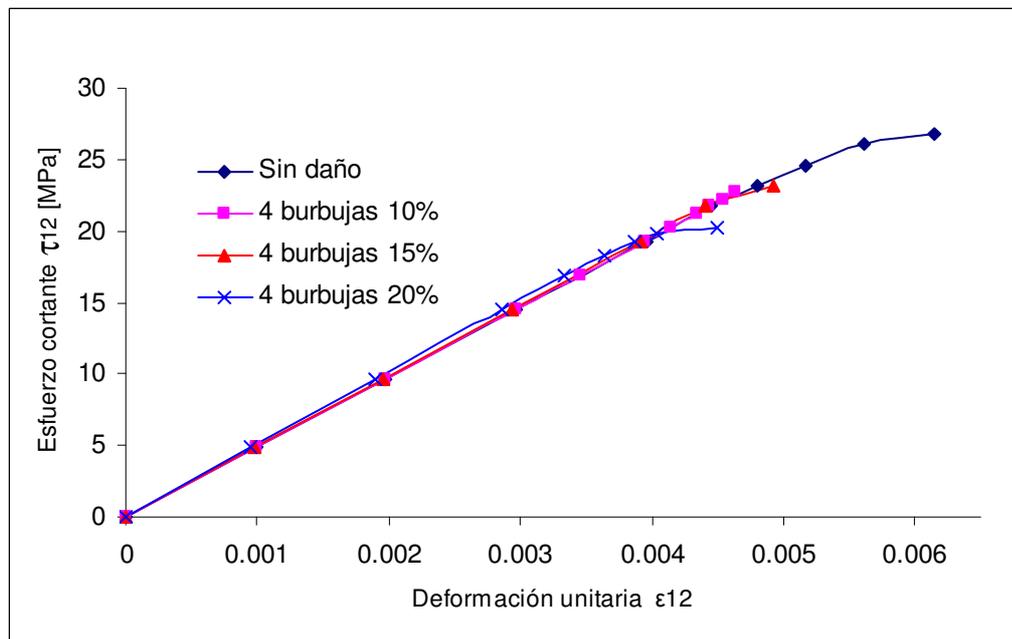


Figura 5 Curvas esfuerzo-deformación para un compuesto con fracción de volumen $v_f = 70\%$ bajo incrementos de cargas cortantes, para diferentes configuraciones supuestas de daño.

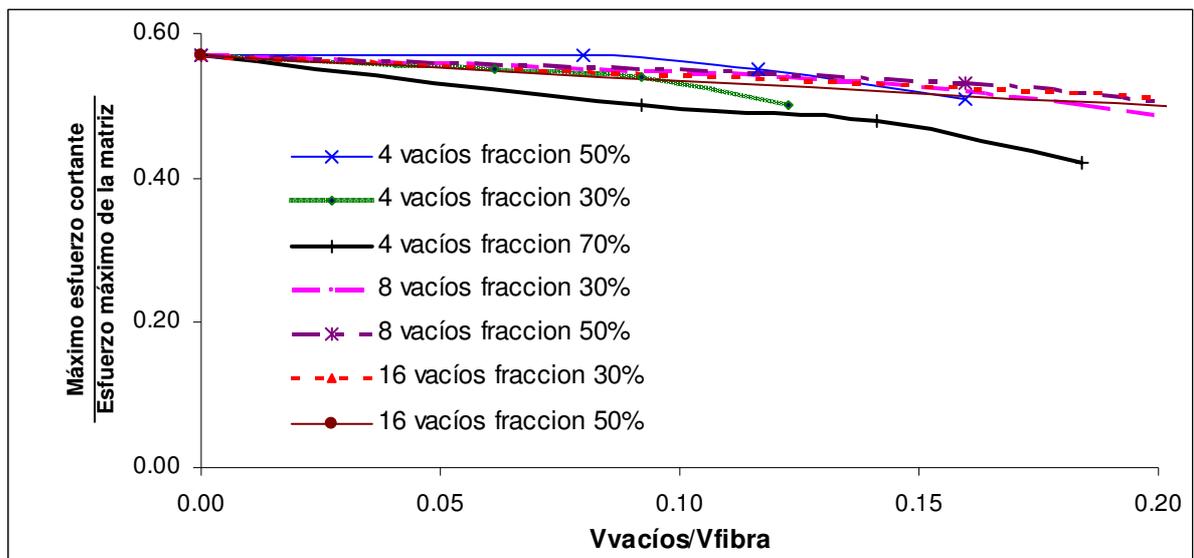


Figura 6 Curva de sensibilidad del esfuerzo cortante en la matriz versus volumen de vacíos con daño semicircular.

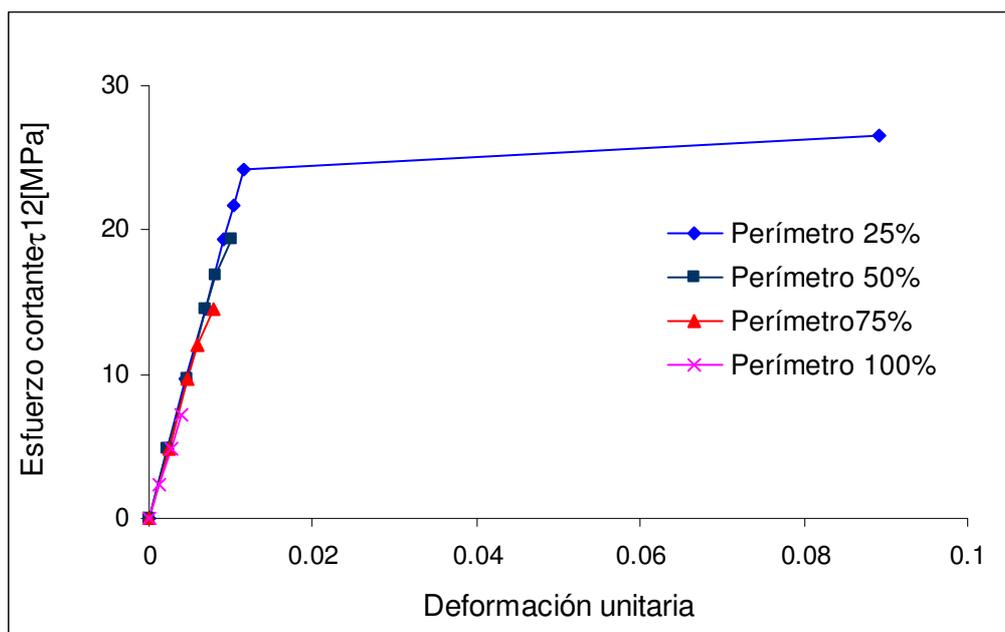


Figura 7 Curvas esfuerzo-deformación para un compuesto con fracción de volumen de $v_f = 30\%$ bajo incrementos de cargas cortantes con daño en forma de vacío semi-elíptico.

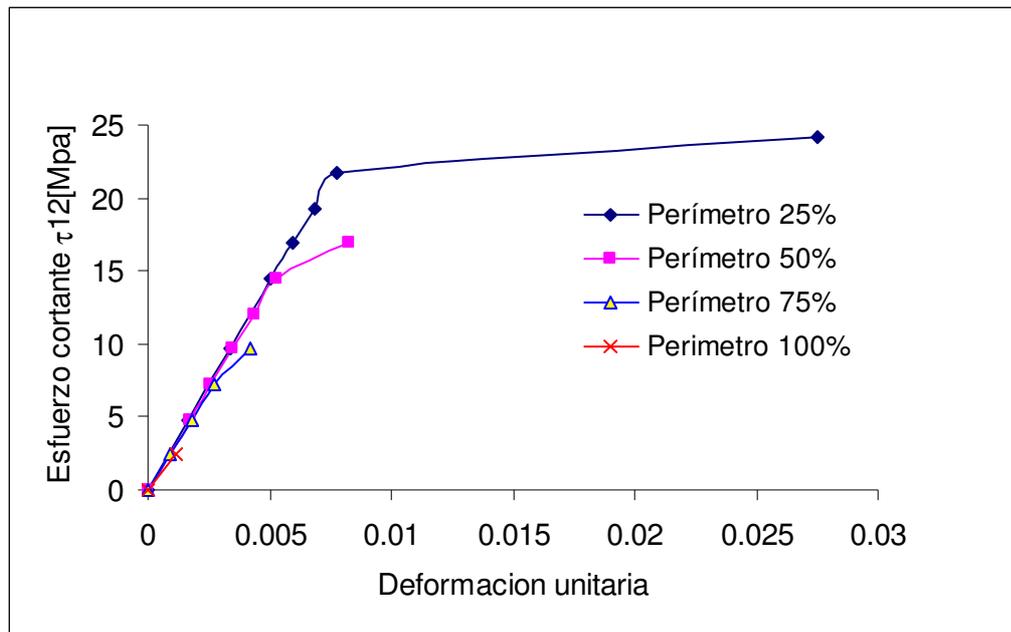


Figura 8 Curvas esfuerzo-deformación para un compuesto con fracción de volumen de $v_f = 50\%$ bajo incrementos de cargas cortantes con daño en forma de vacío semi-elíptico.

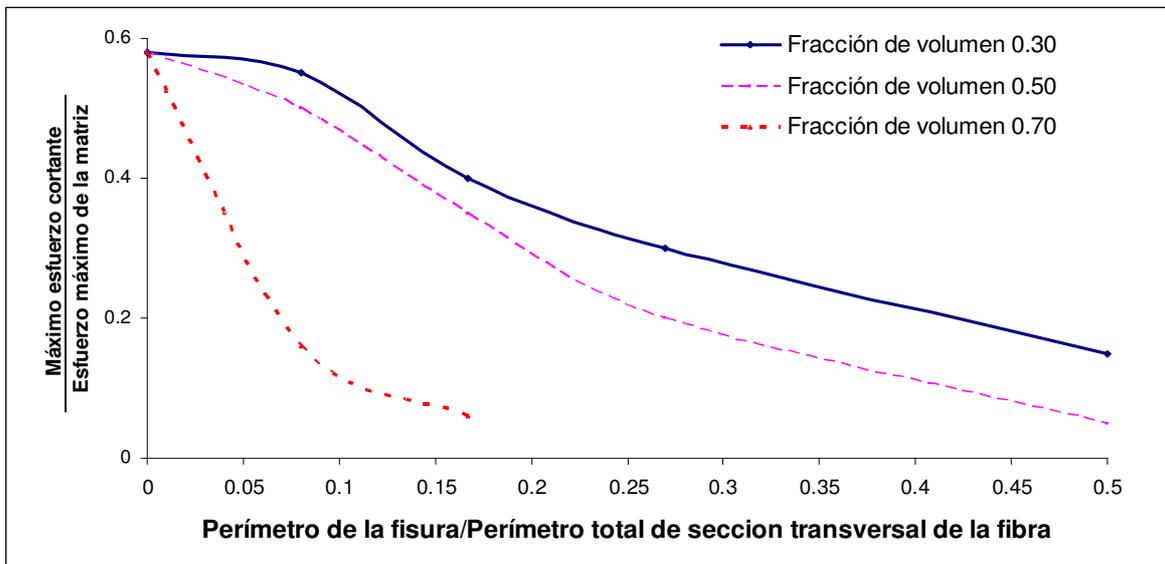


Figura 9 Curva de sensibilidad del esfuerzo cortante máximo de la matriz versus el perímetro del vacío de forma semi-elíptica.

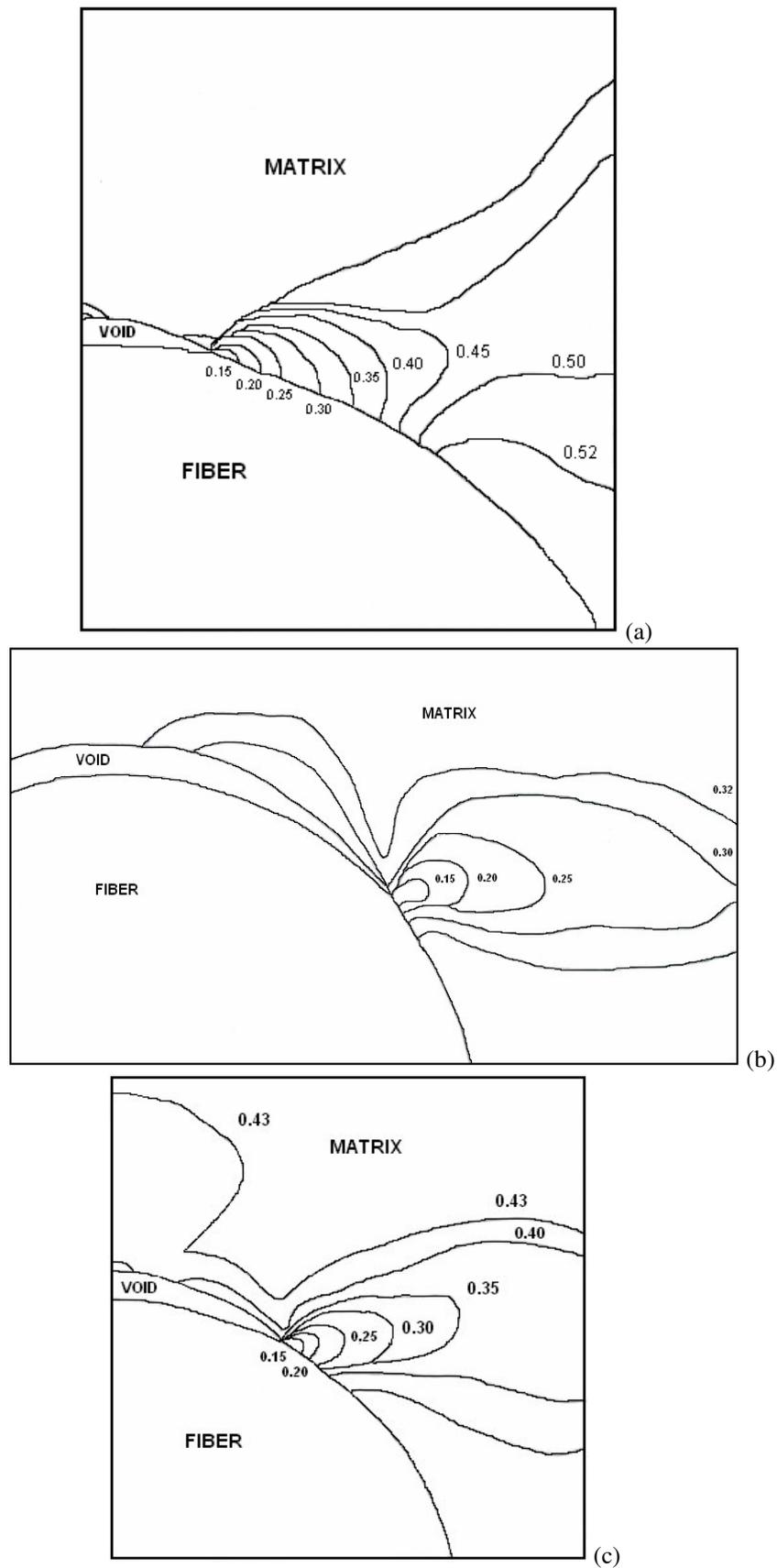


Figura 10 Avance de la zona plasticada en una CU para vacío semi-elíptico abarcando una longitud igual a (a) 25%, (b) 50% y (c) 75% del perímetro de la fibra.

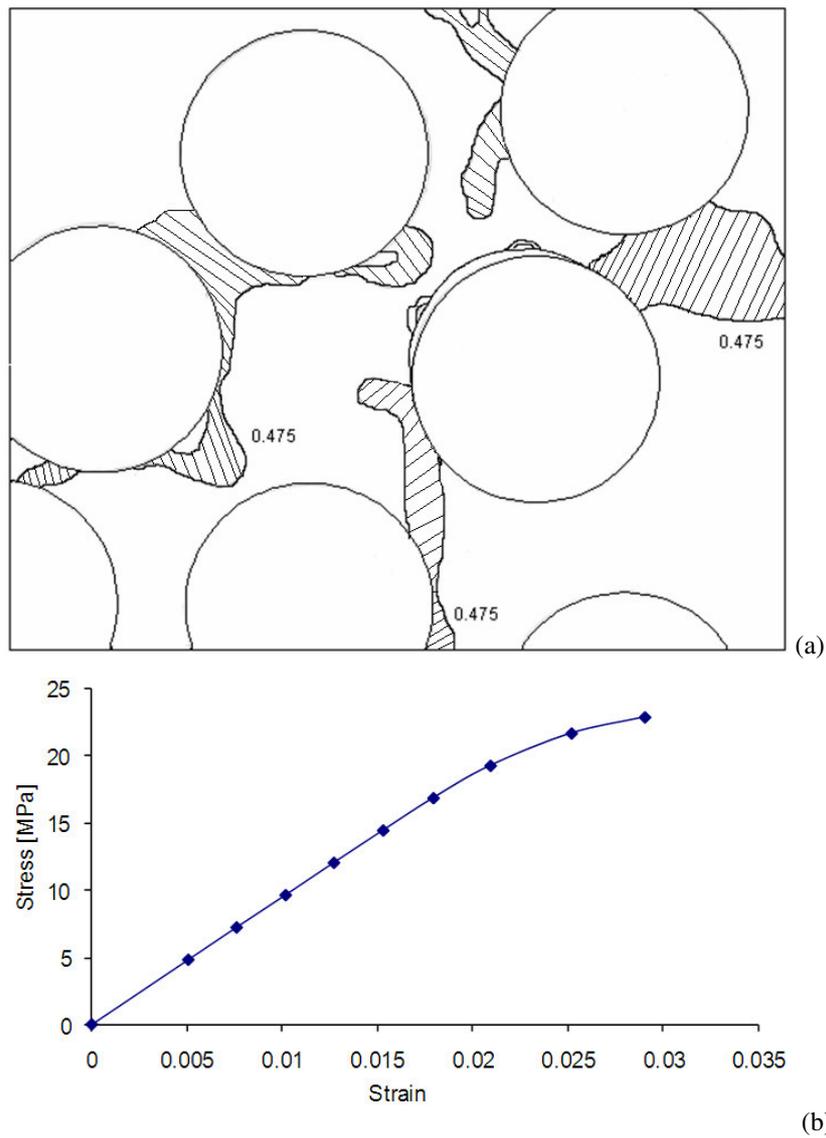


Figura 11. EVR (tomado de una micrografía) para vacío semi-elíptico abarcando una longitud igual a 50% del perímetro de la fibra. (a) Zona plastificada, (b) Relación tensión deformación para el EVR.