

## MODELO DE DAÑO HIGROTÉRMICO EN MATERIALES COMPUESTOS: PROPIEDADES ELÁSTICAS HOMOGENEIZADAS

Nestor D. Barulich<sup>a,b</sup>, Luis A. Godoy<sup>a</sup>, Patricia M. Dardati<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,  
Departamento de Estructuras, Avenida Vélez Sarsfield 1611, Córdoba 5000, Argentina.  
dariobarulich@hotmail.com, lgodoy@com.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu>*

<sup>b</sup> *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja  
Argentina, Córdoba 5000, Argentina, pdardati@industrial.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>*

**Palabras clave:** Material compuesto, Degradación higrotérmica, Homogeneización asintótica, Elementos finitos.

**Resumen.** En aplicaciones estructurales en ambientes agresivos los materiales compuestos, formados por epoxi y fibra de vidrio tipo E, están expuestos a condiciones ambientales severas que producen degradación de sus propiedades y eventualmente pueden conducir a falla estructural. Los mecanismos específicos por los cuales se produce daño en el material debido a factores ambientales son complejos y deben ser evaluados inicialmente mediante estudios experimentales pero este es un proceso lento y costoso, de modo que es altamente deseable contar con métodos computacionales que permitan llevar a cabo una modelación bajo condiciones representativas. En algunos estudios se ha caracterizado la degradación a nivel macro, pero el daño producido tiene origen en la micro-estructura del material. La comprensión del comportamiento del material degradado necesita de estudios en el nivel micro o meso, que es donde se inicia la falla y se propaga hacia el nivel macro. En este trabajo se estudian las propiedades elásticas del material compuesto con degradación higrotérmica, obtenidas mediante homogeneización asintótica. Como dominio de análisis se utilizan celdas unitarias bidimensionales de dos tipos: con ordenamiento regular cuadrado y hexagonal. Los modelos se implementaron utilizando el código comercial ABAQUS. Se supone un estado tensional elástico de deformación plana. Se incluye el daño higrotérmico como parte del modelo computacional de material compuesto mediante la representación de la evolución de su micro-estructura. Se supone daño inicial debido a la acción higrotérmica en la interfase fibra matriz como una fisura que separa ambos materiales constituyentes en la micro-mecánica. Se analiza la influencia del tamaño de daño mediante estudios paramétricos. Los resultados revelan la necesidad de investigar con mayor profundidad el problema de daño higrotérmico en la escala microscópica.

## 1 INTRODUCCION

En aplicaciones en ambientes agresivos, los materiales compuestos pueden sufrir degradación que pueden dar lugar a la falla. El mecanismo específico mediante el cual se producen daños debido al factor ambiental es complejo y debe ser inicialmente evaluado por métodos experimentales. Una evaluación experimental para estimar el daño potencial en diversas condiciones ambientales es un proceso lento y costoso, por lo que es muy deseable emplear métodos computacionales para realizar el modelado en condiciones representativas. Algunos investigadores caracterizaron las degradaciones de las propiedades de los materiales a nivel macro, pero el daño se origina a nivel micro-estructural y es por eso que existe un gran interés en la comprensión del comportamiento a ese nivel. Una comprensión completa del comportamiento de un material compuesto con daño requiere una investigación a nivel micro, que es donde el daño se inicia y se propaga a niveles macro (Godoy, 2003).

En este trabajo se estudian las propiedades elásticas del material compuesto con degradación higrotérmica, obtenidas mediante homogeneización asintótica. Como dominio de análisis se utilizan celdas unitarias bidimensionales de dos tipos: con ordenamiento regular cuadrado y hexagonal. Los modelos se implementaron utilizando el programa comercial de cálculo por elementos finitos ABAQUS. Se incluye el daño higrotérmico como parte del modelo computacional de material compuesto mediante la representación de la evolución de su micro-estructura. Se analiza la influencia del tamaño de daño y la fracción de volumen de fibra en las constantes elásticas homogeneizadas mediante estudios paramétricos.

## 2 ANTECEDENTES

En la actualidad se acepta que, en compuestos producidos mediante fibra de vidrio y matriz epoxi, las formas de daño pueden afectar (i) la matriz, (ii) las fibras, o (iii) la interfaz entre ellas. La ocurrencia de cada una depende de los elementos constitutivos y del tipo de adhesión que se puede alcanzar en la interfase.

Con respecto a los mecanismos de degradación, Kajorncheappunngam et al. (2002) sumergieron muestras de compuestos en cuatro líquidos diferentes y midieron las propiedades a temperatura ambiente y a 60 ° C. En todos los resultados analizados se produjo degradación de las propiedades mecánicas de la resina, especialmente a altas temperaturas. Para muestras sumergidas en una solución de ácido a temperatura ambiente (y también para soluciones alcalinas a temperaturas elevadas), la resistencia a la tracción del material compuesto se redujo en más de un 70%. Ray (2005) investigó los efectos de la temperatura durante el envejecimiento de humedad en la interfase, en agua a temperatura constante.

En su investigación sobre higo-envejecimiento térmico de los materiales compuestos, Foulc et al. (2005) identificaron cuatro etapas de degradación en el material: (i) plasticidad, (ii) degradación química, (iii) evolución morfológica, (iv) daño en la interfase (pérdida de adherencia). Este estudio identificó que los daños de la interfase se producen, principalmente, debido a la formación de vacíos y fisuras; dichos daños inducen la absorción de agua lo cual conduce a la fractura en el material. La identificación experimental de daño higrotérmico también ha sido reportado por Obando et al. (2009).

En cuanto a los modelos computacionales, es importante distinguir entre los modelos fenomenológicos y las simulaciones de comportamiento del material. El daño introducido en la teoría clásica de laminados (Jones, 1999) pertenece al primer grupo, en el que se representan las propiedades promedio y los efectos y daños locales no se tienen en cuenta. Reifsnider (1994) llevó a cabo simulaciones con modelos detallados de la interfase y consideró varias clases de resistencia y durabilidad. Bonora y Rugiero (2005) consideraron un

modelo micro-mecánico con interfaz mecánica, suponiendo distintas configuraciones de la celda unidad para compuestos de matriz metálica. El daño fue inducido por medio de deformaciones, y tenía varias formas, incluyendo la rotura de las fibras, daño en la matriz y la separación de la interfaz. Se identificaron tres partes distintas en las curvas tensión-deformación: en la primera, una respuesta lineal elástica en la cual la fibra y la matriz tienen una adherencia perfecta; en la segunda, hay un cambio en la pendiente con una separación inicial entre los materiales constituyentes; en la tercera, se produce un rápido aumento de la deformación con un pequeño incremento en la tensión. Las micro-grietas se inician en esta tercera etapa, y se identifican como la causa de la falla del compuesto. Otro modelo micro-mecánico fue publicado por [Caporale et al. \(2006\)](#), en el que las fibras y la matriz se asumen homogéneas, isotrópicas y elásticas, y la falla en la conexión fibra-matriz es posible mediante la introducción de resortes con comportamiento elasto-frágil. Para introducir las tensiones en el material los autores utilizaron cargas o desplazamientos externos. [Sevostianov et al. \(2003\)](#) estudiaron la degradación de las propiedades del material y la evolución de la micro-estructura de un compuesto termo-plástico reforzado con fibra debido a este efecto, concluyendo que la acumulación de daño produce cambios tanto en las propiedades mecánicas como en las térmicas del material.

Una investigación computacional y experimental de una partícula de material compuesto reforzado con daños mecánicos también se llevó a cabo por [Kwon \(1997\)](#). El modelo analítico se basa en un cuarto de la celda unitaria con un vacío en el centro de la partícula.

Por último, el estudio más relevante para nuestro propósito fue presentado por [Kaminski \(2005\)](#), que representó daños usando huecos semi-circulares a nivel de la celda unitaria (modelando una cuarta parte de la célula). Tanto el número de huecos como su tamaño se tomaron como parámetros. Esto fue seguido de trabajos de [Godoy et al. \(2008\)](#) en celdas unitarias completas.

### 3 METODOLOGÍA

El material analizado es una matriz de epoxi con refuerzo unidireccional de fibras largas de vidrio tipo E. Las fibras se suponen distribuidas en forma periódica. Se considera que tanto el material de la matriz como el de las fibras son homogéneos, lineales e isotrópos.

Para el cálculo de las propiedades elásticas homogeneizadas del material compuesto degradado se utilizaron dos tipos de celdas unitarias (CU): una correspondiente a un ordenamiento de fibras cuadrado (CUAD) y otra a uno hexagonal (HX). Como las fibras del material son largas se utilizaron modelos bidimensionales (2D) bajo un estado tensional de deformación plana. El análisis se realiza sobre un plano perpendicular a la dirección de las fibras.

En los modelos se incluye el daño higrotérmico en forma de despegue de la interfase entre fibra y matriz. Se debe destacar que el daño no es generado por aplicación de cargas sino por acción higrotérmica. Se toma como parámetro de daño el porcentaje del perímetro de sección de la fibra dañado respecto del perímetro total. Los modelos fueron implementados en el programa de cálculo por elementos finitos de propósito general [ABAQUS \(2009\)](#) incluyendo el pre- y postproceso. Mediante la aplicación del método de homogeneización que suele denominarse asintótico ([Sanchez-Palencia, 1986](#)) se calculan las constantes elásticas de ingeniería:  $E_2$ ,  $E_3$  (módulos longitudinales transversales a la dirección de las fibras) y  $G_{23}$ . Se analiza la variación de las constantes elásticas por medio de estudios paramétricos modificando la fracción de volumen de fibra y el tamaño de daño. También se comparan los resultados obtenidos para los dos tipos de celdas unitarias CUAD y HX.

## 4 MODELOS DE CELDA UNITARIA

### 4.1 Geometría de CU

Se utilizaron dos tipos de CU de común uso en micromecánica. Una que representa un material reforzado en una dirección con distribución de fibras en una grilla cuadrada (CUAD) y otra con ordenamiento hexagonal (HX), ver Figura 1.

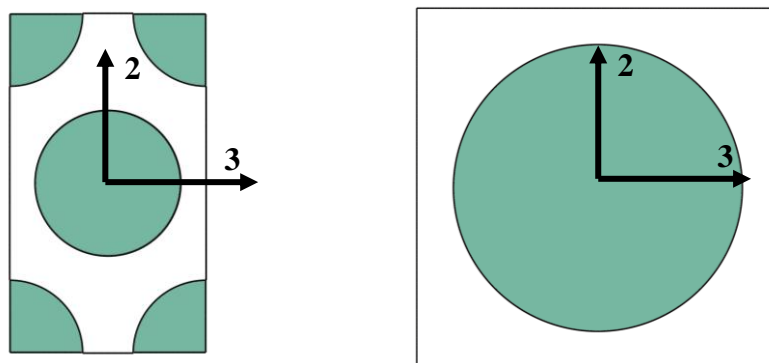


Figura 1: Celdas unitarias utilizadas. Izquierda: HX. Derecha: CUAD

En la Figura 1 se ven los sistemas de referencia utilizados. Nótese que el eje 1 está ubicado en dirección paralela al eje longitudinal de las fibras. El radio de las fibras es  $3.5 \mu\text{m}$ . Las dimensiones de las celdas se obtuvieron en función de la fracción de volumen de fibra requerida,  $V_f$ . Para una CU CUAD la expresión es,

$$V_{f_{CUAD}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot l^2} \quad (1)$$

donde  $l$  es la medida del lado de la CU y  $d$  el diámetro de fibra; para una celda tipo HX se emplea la fórmula

$$V_{f_{HX}} = \frac{V_{fibra}}{V_{total}} = \frac{2\pi R_f^2}{2a \cdot 2b} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_f}{a}\right)^2 \quad (2)$$

donde  $R_f$  es el radio de fibra,  $2b$  y  $2a$  son las dimensiones externas de la celda. Ambos modelos tienen la capacidad de representar un valor de fracción de volumen de fibra máximo (debido al contacto de las fibras entre sí) de:  $V_{f_{CUAD}} = 0.785$  y de  $V_{f_{HX}} = 0.906$  aproximadamente. Sin embargo, se modelaron CU con valores máximos de  $V_f$  de 0.75 para CUAD y de 0.80 para HX.

### 4.2 Materiales

El material compuesto se modela mediante dos materiales isotrópicos elásticos y homogéneos: la matriz epoxi y las fibras de vidrio tipo E (*E glass*). Las propiedades elásticas utilizadas se muestran en la Tabla 1. Los valores se tomaron de [Godoy et al. \(2008\)](#).

	E [MPa]	$\nu$
Epoxi	4000	0.38
e-glass	84000	0.22

Tabla 1: Propiedades elásticas de matriz y fibras.

### 4.3 Modelo de daño

Se introduce daño higrotérmico en las CU mediante el despegue de la interfase entre la matriz y las fibras. Esta representación se basa en las observaciones de micrografía realizados en [Mondragón \(2008\)](#). Se utilizó en [Kaminski \(2005\)](#) para daño de origen mecánico. Se debe resaltar que en este trabajo el daño no es generado por causas mecánicas sino por causa del envejecimiento higrotérmico. No se incluye ninguna ley de cohesión entre las superficies de la fisura.

Como medida del tamaño de daño se tomó el porcentaje de perímetro afectado respecto al perímetro total de fibra. De esta forma un tamaño de daño del 10% corresponde a una fisura de 10% del perímetro total de la fibra dañada. En la figura 2 se muestran las posiciones de las fisuras representadas en esta figura como una línea curva negra sobre la interfase de ambos materiales. Para modificar el tamaño de daño se mantiene el punto medio de la fisura en la misma posición y se desplazan los extremos de la fisura.

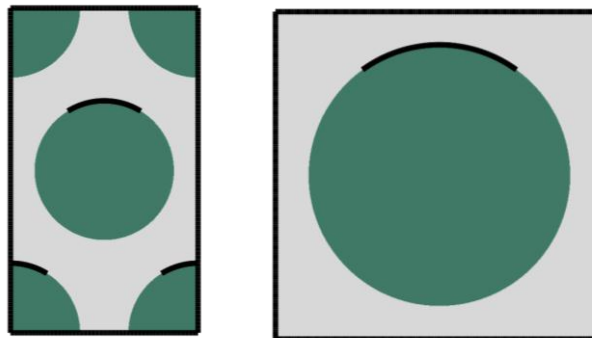


Figura 2: Ubicación de daños en interfase de CU para CUAD y HX.

### 4.4 Discretización

Para los modelos de elementos finitos se utilizaron elementos cuadriláteros de 4 nodos con integración completa (denominado CPE4 en ABAQUS). Se utilizó un número de elementos del orden de  $8 \times 10^4$ .

Para aplicar las condiciones de borde periódicas ([Barbero, 2007](#)) se requiere que la malla tenga, sobre los bordes correspondientes, los nodos en posiciones adecuadas. Debido a que ABAQUS no asegura este requerimiento, se implementó un script una edición de malla. Se efectuó con la herramienta de scripts en Python para ABAQUS.

### 4.5 Condiciones de contorno periódicas

Siguiendo el procedimiento de [Barbero \(2007\)](#) para la implementación numérica de las condiciones de borde periódicas mediante elementos finitos, las ecuaciones a utilizar en un

modelo 2D de celda unitaria de ancho  $2a$  y de alto  $2b$ , para sus lados (excluyendo los vértices) son:

$$u_i(a; x_2) - u_i(-a; x_2) = 2a \varepsilon_{i3}^0 \quad (3)$$

$$u_i(x_3; b) - u_i(x_3; -b) = 2b \varepsilon_{i2}^0 \quad (4)$$

donde  $u_i$  son las dos componentes de desplazamiento en el plano de análisis y  $\varepsilon_{ij}^0$  es la deformación macroscópica impuesta al modelo. Como se ve la ecuación (3) relaciona los lados verticales (izquierdo y derecho) y la (4) relaciona los lados horizontales (superior e inferior). Nótese que el origen sistema de coordenadas está ubicado en el centroide de la CU.

En la implementación numérica de las condiciones de periodicidad no se puede utilizar un mismo grado de libertad en dos ecuaciones (Barbero, 2007). A continuación se obtienen las ecuaciones para los vértices. Evaluando (3) para  $x_2 = b$  se obtiene

$$u_i(a; b) - u_i(-a; b) = 2a \varepsilon_{i3}^0 \quad (5)$$

Evaluando la ecuación (4) para  $x_3 = -a$  se tiene

$$u_i(-a; b) - u_i(-a; -b) = 2b \varepsilon_{i2}^0 \quad (6)$$

sumando las ecuaciones (5) y (6) se obtiene

$$u_i(a; b) - u_i(-a; -b) = 2a \varepsilon_{i3}^0 + 2b \varepsilon_{i2}^0 \quad (7)$$

ecuación que relaciona los vértices superior derecho e inferior izquierdo. De forma similar para los vértices restantes se obtiene

$$u_i(a; -b) - u_i(-a; b) = 2a \varepsilon_{i3}^0 - 2b \varepsilon_{i2}^0 \quad (8)$$

Las ecuaciones a implementar son las (3) y (4) para los lados y la (7) y (8) para los vértices. Se implementaron utilizando scripts en Python con el comando \*EQUATION. Se agregaron tres grados de libertad adicionales a los que se les asignó el valor de  $\varepsilon_{ij}^0$ . Además se restringe el movimiento de cuerpo rígido de la CU anulando el desplazamiento de un punto cualquiera (Caporale, 2006).

#### 4.6 Postproceso

Para el cálculo de las propiedades elásticas se calculan en primer lugar las tensiones y deformaciones promedio  $\bar{\sigma}_{ij}; \bar{\varepsilon}_{ij}$  como:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(x, y) dV \\ \bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(x, y) dV \end{aligned} \quad (9)$$

donde la componente de tensión y la de deformación dentro del integrando es la tensión microscópica y  $V$  es el volumen total de la CU. Esta integración se realiza en forma numérica según una cuadratura de Gauss con regla de 2x2 (heredado del tipo de elemento utilizado, CPE4)

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{t}{V} \sum_N \sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^2 w_n w_k \left| \sigma_{ij}(x, y) \det(J) \right|_{kn} \quad (10)$$

donde  $t$  es el espesor (unitario),  $N$  es el número de elementos finitos,  $w_i$  son los pesos y  $\det(J)$  es el determinante del Jacobiano evaluado en los puntos de Gauss. El tensor de tensiones estará dado en los puntos de integración. De manera similar, para las deformaciones se emplea

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{t}{V} \sum_N \sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^2 w_n w_k \left| \varepsilon_{ij}(x, y) \det(J) \right|_{kn} \quad (11)$$

Se debe destacar que la únicas componentes con las que se trabaja son:  $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{22}$  y  $\sigma_{23}$  y las correspondientes componentes de deformación.

El postproceso se implementó en el lenguaje FORTRAN con las herramientas “abaqus make” que provee ABAQUS.

Considerando la relación

$$\begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_{22} \\ \bar{\varepsilon}_{33} \\ \bar{\varepsilon}_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 \\ -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_{22} \\ \bar{\sigma}_{33} \\ \bar{\sigma}_{23} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

se pueden obtener las propiedades elásticas resolviendo tres problemas en cada uno de los cuales se aplica una deformación con dos componentes nulas y la otra unitaria.

## 5 RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados para las constantes elásticas en análisis. Se calcularon los valores para diferentes tamaños de daño y fracciones de volumen de fibra en los dos tipos de CU.

### 5.1 Constante $E_2$

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados de la constante  $E_2$  para distintas fracciones de volumen de fibra y diferentes tamaños de daño en los dos tipos de celdas unitarias. En las figuras 3 y 4 se muestran las gráficas para los mismos valores.

E <sub>2</sub> [MPa] HX	vf					
Tamaño de daño [%]	0 (como 30)	30	50	65	75	80
Sin daño	7487.925	11130.77	15717.64	22090.37	29637.12	35516.92
10	7487.780	11107.40	15721.49	22257.94	30177.29	36456.17
15	7487.037	11074.07	15713.77	22393.24	30597.30	37159.34
20	7484.918	11024.24	15678.19	22456.30	30820.30	37548.03
25	7479.981	10953.55	15593.70	22361.91	30676.25	37398.50
30	7471.901	10867.20	15439.19	22053.13	30082.99	36616.66
35	7460.394	10753.79	15198.15	21510.98	29059.63	35190.17
40	7442.766	10619.44	14860.54	20746.51	27675.53	33207.35

Tabla 2: E<sub>2</sub> para HX.

E <sub>2</sub> [MPa] CUAD	vf				
Tamaño de daño [%]	0 (como 30)	30	50	65	75
Sin daño	7487.919	11471.75	17059.96	25708.82	38509.22
10	7487.735	11384.54	16571.66	23574.39	33102.09
15	7486.905	11278.24	16071.60	22107.72	29602.58
20	7484.619	11138.96	15510.80	20704.79	26505.21
25	7480.170	10973.75	14941.76	19422.93	23978.62
30	7472.499	10789.15	14381.24	18269.70	21942.73
35	7459.378	10589.93	13836.78	17236.24	20284.42
40	7441.071	10377.54	13299.28	16297.31	18881.43

Tabla 3: E<sub>2</sub> para CUAD.

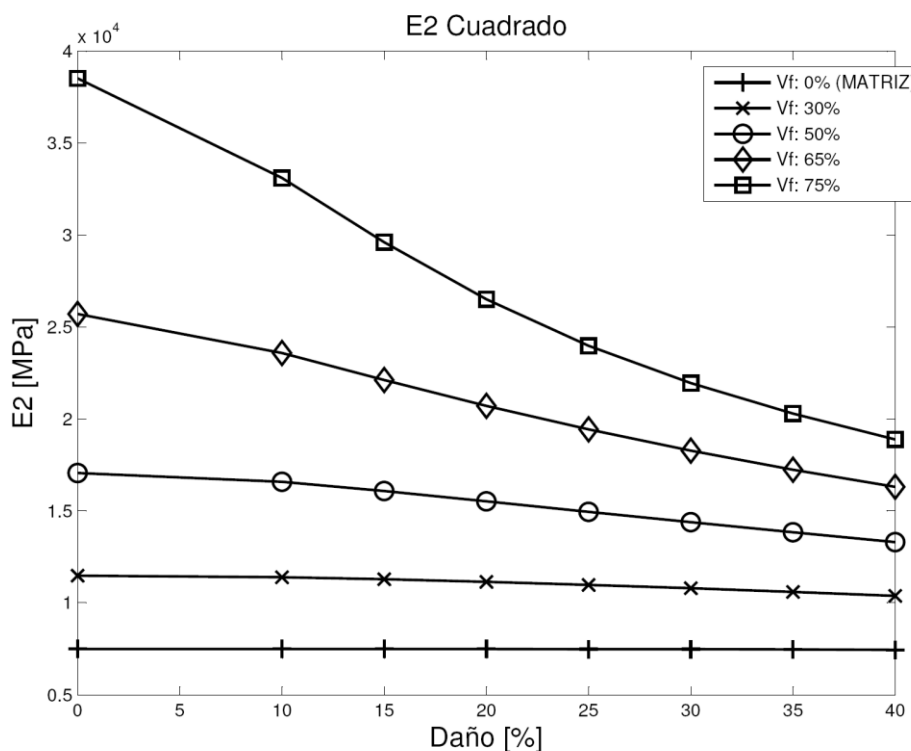


Figura 3: E<sub>2</sub> para CUAD.



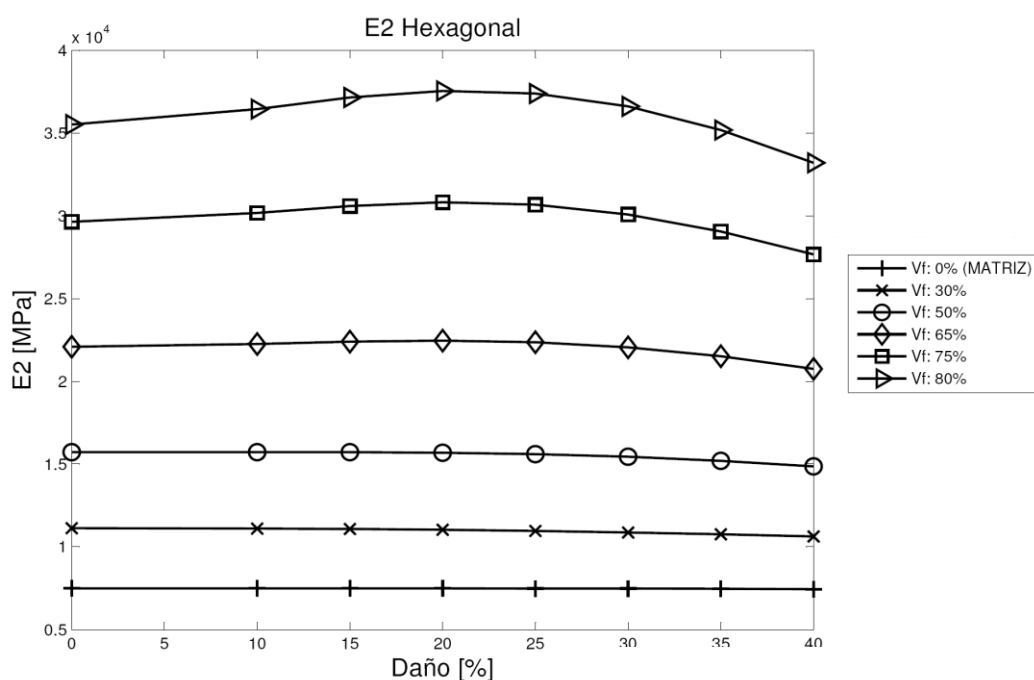


Figura 4: E<sub>2</sub> para HX.

### 5.2 Constante E<sub>3</sub>

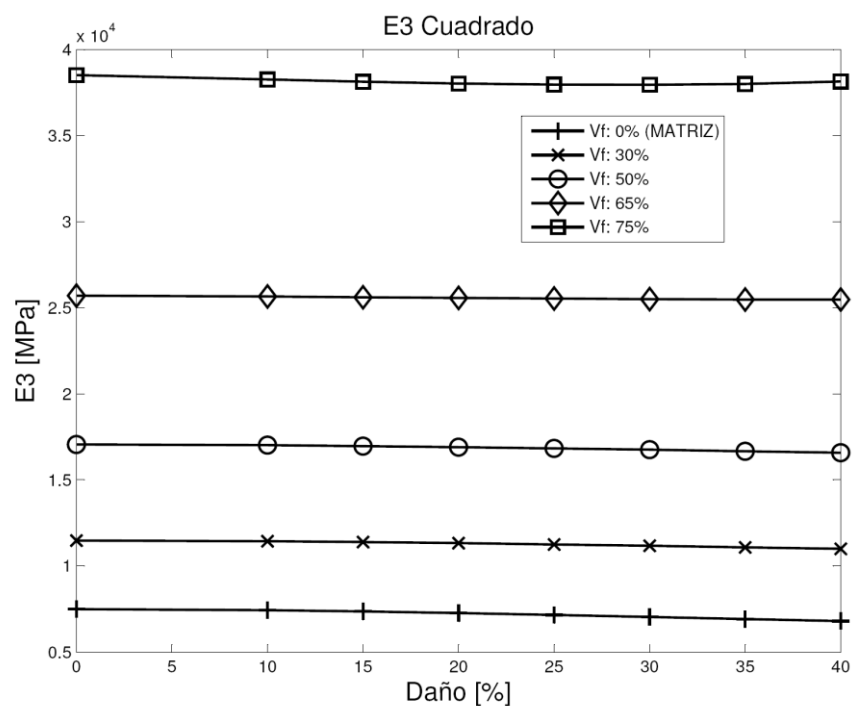
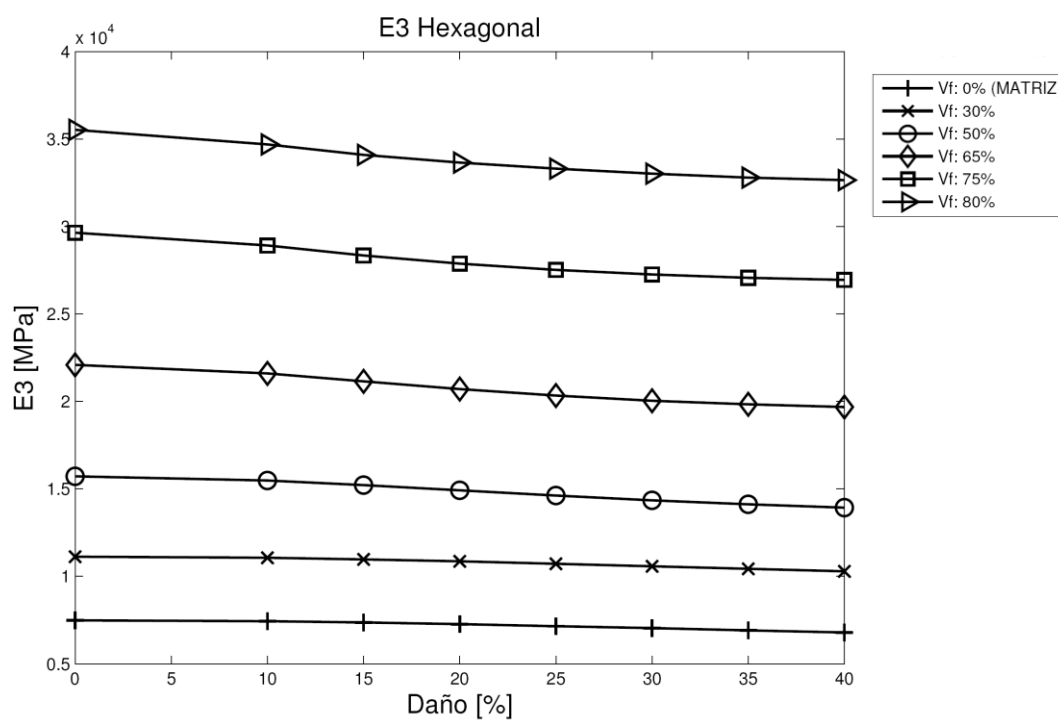
En forma similar, en las tablas 4 y 5 se presentan los resultados de la constante E<sub>3</sub> para distintas fracciones de volumen de fibra y diferentes tamaños de daño. En las figuras 5 y 6 se graficaron los mismos valores.

E33 Hx Tamaño de daño [%]	vf					
	0 (como 30)	30	50	65	75	80
Sin daño	7487.925	11130.28	15717.51	22090.17	29636.87	35516.80
10	7435.391	11063.00	15479.18	21604.08	28912.64	34680.77
15	7364.28	10973.83	15217.73	21148.59	28343.06	34094.72
20	7270.884	10858.21	14920.30	20703.56	27869.23	33642.97
25	7158.644	10721.01	14622.62	20330.17	27512.39	33301.77
30	7041.167	10581.53	14351.86	20041.60	27252.29	33020.16
35	6915.653	10430.70	14117.80	19830.20	27066.64	32790.96
40	6795.117	10292.33	13925.73	19681.69	26948.36	32641.14

Tabla 4: E<sub>3</sub> para HX.

E33 Cuad Tamaño de daño [%]	vf				
	0 (como 30)	30	50	65	75
Sin daño	7487.919	11471.75	17059.92	25708.87	38509.51
10	7427.316	11431.98	17012.68	25652.00	38269.81
15	7353.560	11384.19	16962.86	25612.40	38135.95
20	7258.535	11322.46	16902.29	25572.29	38030.26
25	7148.579	11250.01	16832.59	25534.30	37963.71
30	7030.549	11169.67	16753.38	25501.00	37949.74
35	6909.940	11083.24	16665.34	25478.29	38006.19
40	6789.806	10991.90	16571.29	25473.39	38150.95

Tabla 5: E<sub>3</sub> para CUAD.

Figura 5: E<sub>3</sub> para CUAD.Figura 6: E<sub>3</sub> para HX.

### 5.3 Constante $G_{23}$

Los resultados de la constante  $G_{23}$  se muestran en las tablas 6 y 7; en las figuras 7 y 8 se muestran las gráficas de la misma constante elástica.

$G_{23}$ Hx	$V_f$					
Tamaño de daño [%]	0 (como 30)	30	50	65	75	80
Sin daño	1449.276	2408.034	3781.040	5967.809	8718.210	10862.51
10	1449.276	2401.281	3745.730	5907.400	8681.749	10879.96
15	1449.274	2390.500	3696.410	5815.381	8597.624	10840.73
20	1449.276	2374.290	3625.255	5666.750	8427.235	10700.82
25	1449.275	2351.323	3531.902	5459.070	8144.167	10414.30
30	1449.277	2326.137	3419.582	5192.472	7734.292	9946.365
35	1449.275	2295.045	3294.495	4880.448	7204.325	9281.605
40	1449.275	2261.260	3159.966	4541.373	6582.203	8436.575

Tabla 6:  $G_{23}$  para HX.

$G_{23}$ Cuad	$V_f$				
Tamaño de daño [%]	0 (como 30)	30	50	65	75
Sin daño	1449.277	2193.981	3023.031	4427.306	7523.663
10	1449.275	2192.021	3015.949	4370.690	6951.274
15	1449.278	2189.385	3007.146	4311.894	6553.085
20	1449.275	2185.514	2995.167	4242.462	6190.171
25	1449.275	2170.354	2979.753	4167.438	5874.879
30	1449.275	2173.745	2961.313	4089.264	5597.081
35	1449.274	2165.585	2939.692	4008.442	5347.568
40	1449.276	2155.472	2912.799	3924.869	5115.734

Tabla 7:  $G_{23}$  para CUAD.

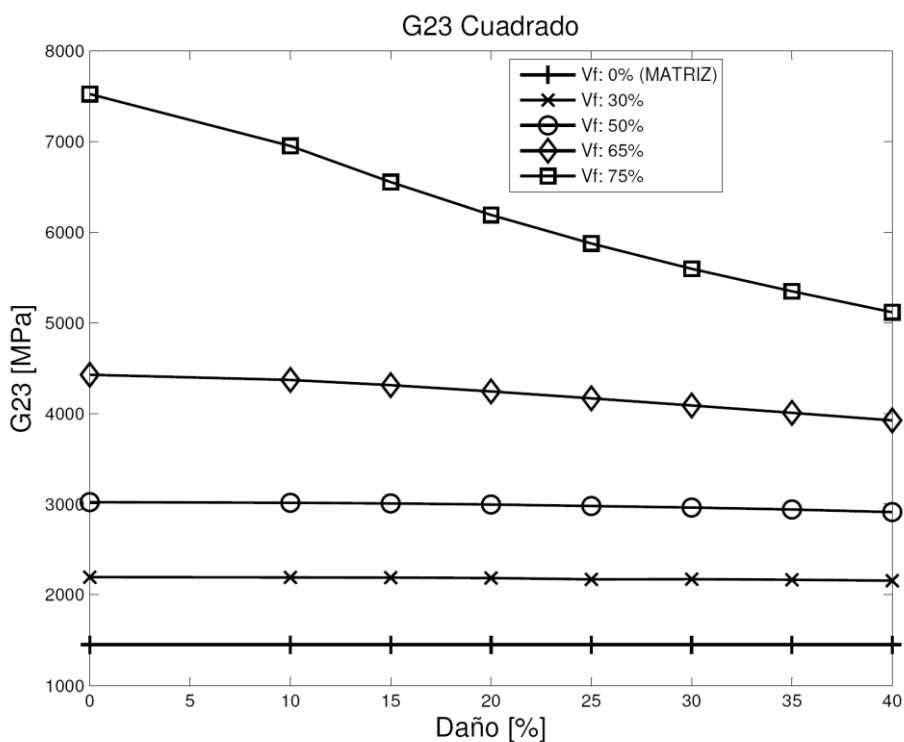
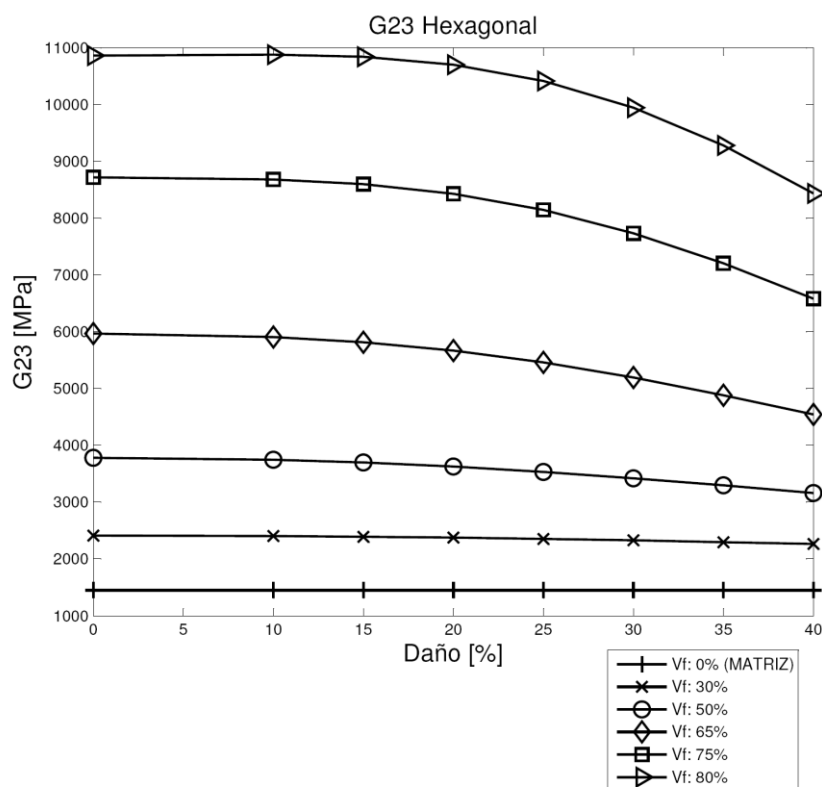


Figura 7:  $G_{23}$  para CUAD.

Figura 8:  $G_{23}$  para HX.

## 5.4 Discusión

Los resultados muestran que todas las constantes elásticas analizadas no se ven afectadas en gran medida para HX y CUAD para bajos valores de fracción de volumen de fibra (desde 0% hasta 50%).

El módulo  $E_3$  no se ve afectado ante la presencia de daño higrotérmico para cualquier fracción de volumen de fibra. La constante  $G_{23}$  se reduce solo para los mayores valores de  $V_f$ . La constante  $E_2$  y en CUAD presenta un comportamiento similar a  $G_{23}$ . Pero en el caso de  $E_2$  en HX y para valores altos de  $V_f$ , (75% y 80%) los resultados muestran un aumento en los valores de  $E_2$  para tamaño de daño intermedios (10% a 30%), y luego una reducción cuando el tamaño de daño se hace mayor.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se modeló un material compuesto de epoxi y fibras de vidrio unidireccional aplicando homogeneización asintótica. Se estudiaron las propiedades elásticas en el plano transversal a la fibra incluyendo un modelo de daño higrotérmico.

Los resultados muestran que las propiedades elásticas no se ven afectadas para pequeñas fracciones de volumen de fibra. En general las celdas CUAD y HX presentan los mismos comportamientos a excepción del módulo  $E_2$ . Este presenta un aumento en HX para valores de tamaño de daño pequeños y luego para mayores daños se reduce.

Estos resultados revelan la necesidad de investigar con mayor profundidad el problema de daño higrotérmico en la escala microscópica, ya sea aplicando otras técnicas numéricas y métodos de homogeneización, como así también, nuevos ensayos experimentales.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con la ayuda del CONICET. N. D. Barulich agradece el financiamiento de CONICET a través de su beca de postgrado.

## REFERENCIAS

- ABAQUS v. 6.7, Dassault Systèmes, Providence, RI, US. 2009.
- Barbero, E., J., *Finite element analysis of composite materials*. USA, CRC Press Taylor and Francis Group, 2007.
- Bonora, N., Ruggiero, A., Micromechanical modeling of composites with mechanical interface – Part II: Damage mechanics assessment, *Composites Science and Technology*, 66 (2):324-332, 2005.
- Caporale, A., Luciano, R., Sacco, E., Micromechanical analysis of Interfacial debonding in unidirectional fiber-reinforced composites, *Computers & Structures*, 84 (31-31):2201-2210, 2006.
- Foucl, M.P., Bergeret, A., Ferry, L., Lenny, P., and Crespy, A., Study of hygro-thermal ageing of glass fiber reinforced PET composites. *Polymer Degradation and Stability*, 89 (3):462-469, 2005.
- Godoy, L. A., Modelos y Enfoques para problemas con acoplamiento de Micro y Macro Estructuras, *Mecánica Computacional*, 22:1964-1984, 2003.
- Godoy, L. A., Mondragón, V., Pando, M.A., Acosta, F.J., Comportamiento micro-mecánico de compuestos con micro-daño, *Mecánica Computacional*, 27:1253-1265, 2008.
- Jones, R., *Mechanics of composite materials*. Taylor and Francis, PA, 1999.
- Kajorncheappunngam, S., Rakesh. KG., GangaRao H.V. Effect of Ageing environment on degradation of glass-reinforced epoxy, *Journal Composites of Construction*, 6 (1):61-69, 2002.
- Kaminski, M., *Computational Mechanics of Composites Materials*, London: Springer-Verlag, 2005.
- Kwon, Y., Study of damage evolution in composites using damage mechanics and micro-mechanics, *Composites structures*, 38 (1-4):133-139, 1997.
- Mondragon, M. V. *Modelo de la micromecánica de materiales compuestos considerando degradación higrotérmica*. Tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico, Mayaguez, 2008.
- Obando, J.C., Pando, M.A., Acosta, F.J., Godoy, L.A., Assessment at the micro level of the hygrothermal degradation of fiber reinforced polymer materials. *ASME International Mechanical Engineering*, Congress and Exposition, Lake Buena Vista, Florida, November 13-19, 2009.
- Ray, B.C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Colloid and Interface Science*, 298 (1):111-117, 2005.
- Reifsnider, K.L., Modelling of the interphase in polymer-matrix composite material systems. *Constructions Industrielles*, 25 (7):462-469, 1994.
- Sanchez-Palencia E. Homogenization in mechanics. A survey of solved and open problems. Seminario de matemática, Universidad Politécnica de Torino, 1986.
- Sevostianov, I., Verijenko, V., Verijenko, B., Evaluation of microstructure and properties deterioration in short fiber reinforced thermoplastics subjected to hydrothermal aging, *Composites Structures*, 62 (3-4):409-415, 2003.