

EFFECTO DE TAMAÑO EN LAMINADOS CRUZADOS: ESTUDIO DE LA TRANSICIÓN ENTRE ESCALAS DE LA INICIACIÓN DE GRIETAS USANDO UN ENFOQUE VARIACIONAL DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

T. Guillén Hernández^a, A. Quintana-Corominas^b, I.G. García^{*c}, J. Reinoso^c, M. Paggi^a, A. Turón^d

^aIMT School for Advanced Studies Lucca, Piazza San Francesco 19, 55100, Lucca, Italia

^bBarcelona Supercomputing Center (BSC-CNS), Edificio NEXUS I, Campus Nord UPC, Gran Capitán 2-4, 08034, Barcelona, España

^cGrupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, E.T.S. de Ingeniería, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España

*Persona de contacto: israelgarcia@us.es

^dAMADE, Polytechnic School, Universitat de Girona, Campus Montilivi s/n, 17071 Girona, España

RESUMEN

Este trabajo estudia el fenómeno de agrietamiento transversal en laminados cruzados a partir de la progresión del daño entre escalas. Con este propósito se generaron modelos mesomecánicos de la capa transversal con un nivel de detalle total a la escala micromecánica. Con estos modelos se puede seguir el crecimiento del daño, desde los primeros despegues en la interfaz fibra-matriz, hasta grietas totalmente formadas que abarcan la totalidad del espesor de la capa. Los modelos se basan en la implementación de una zona cohesiva en la interfaz fibra-matriz y de un enfoque variacional de la fractura (conocido en la literatura como *phase field*) para la progresión de las grietas en la matriz. Estos enfoques son especialmente idóneos a escala micromecánica. Entre los resultados más interesantes cabe destacar que la estabilidad del daño en su transición entre escalas se ve muy afectado por el espesor de la capa transversal.

PALABRAS CLAVE: phase field, efecto in-situ, micromecánica, laminados cruzados

ABSTRACT

This work studies the problem of transverse cracking in cross-ply laminates through the progression of the damage across scales. A set of computational models of the transverse ply were generated at the meso scale, including full detail of the geometry at the microscale, with the aim of observing the phenomenon at the two scales. Thanks to these models, it was possible to capture the progression of damage, from small debonds at the fiber-matrix interface to full-thickness cracks at the mesoscale. The models are based on prescribing a cohesive zone model at the fiber-matrix interface and a phase-field approach of fracture at the matrix bulk. This approach is especially suitable at the microscale. Among other interesting results, it was found that the stability of the progression across scales depends strongly on the transverse-ply thickness.

KEYWORDS: phase field, in-situ effect, micromechanics, cross-ply laminates

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos se encuentran actualmente entre los materiales estructurales con mayor importancia en algunas industrias de alta tecnología. Esa importancia ha motivado desde hace unas décadas un gran esfuerzo investigador en comprender varias de las características especiales de estos materiales, en especial en lo que respecta a aquellas que tienen una particular importancia en las aplicaciones prácticas, como la predicción del fallo de estos materiales. La combinación entre su relevancia práctica y la complejidad de sus mecanismos de fallo ha servido de plataforma para la generación de una serie de propuestas que han permitido avanzar enormemente en el

desarrollo de la mecánica de la fractura no convencional.

Entre los problemas clásicos de fallo en materiales compuestos, cabe destacar el fenómeno de agrietamiento transversal en materiales compuestos, ver [1] para una revisión del problema. Dentro de este problema, el efecto de tamaño observado experimentalmente por muchos autores, ver p.e. [2, 3], ha servido para inspirar propuestas y metodologías con las que explicar ese efecto. Según estos experimentos, el nivel de deformación para el que aparece la primera grieta transversal depende del espesor de la capa transversal, de forma especialmente acusada para pequeños espesores. Este resultado contradice a los criterios de fallo clásicos para estos materiales, que están

basados en valores límites para las tensiones o las deformaciones. Estas observaciones experimentales inspiraron la propuesta de varios criterios para su explicación, interpretación y predicción, con enfoques muy diversos a nivel conceptual [4–9], ver [3] para una revisión crítica de los principales criterios.

En el presente trabajo se propone abordar este problema desde el punto de vista micromecánico, siguiendo la idea de trabajos recientes [10–12]. En contraste con estos trabajos, aquí se propone la utilización de un enfoque variacional de la fractura (típicamente denominado *phase field*) para modelar la iniciación y propagación de grietas en una matriz que se considera cuasifrágil. El objetivo es evaluar cómo una grieta, de acuerdo a este modelo, progresa entre escalas, desde una serie de despegues en la interfaz fibra-matriz, que a una escala meso se puede considerar daño difuso, hasta una grieta que abarque todo el espesor de la capa transversal. Esta transición entre escalas se puede considerar la iniciación de una grieta a escala meso y por lo tanto identificarse con el fenómeno medido en los experimentos. El criterio más aceptado actualmente para explicar este efecto de tamaño, el criterio de Dvorak [4, 5], basa sus fundamentos en asumir una progresión estable de un defecto hasta alcanzar una longitud crítica. La explicación para ese crecimiento estable (que contradice el criterio de Griffith) podría estar en las diferentes barreras micromecánicas para su crecimiento.

El artículo se organiza como sigue: En primer lugar, se describe el modelo computacional desarrollado, para posteriormente presentar los principales resultados obtenidos a partir de este modelo. Finalmente, se discuten las implicaciones preliminares que se pueden extraer sobre el efecto de tamaño observado en los experimentos.

2. MODELO COMPUTACIONAL

Los modelos computacionales se basaron en el método de los elementos finitos y se desarrollaron en Abaqus. En la figura 2 se esquematizan las características de estos modelos. Se asumió un estado de deformación plana y la geometría de los modelos se extrajeron a partir del análisis de las micrografías presentadas en los experimentos de Saito [13]. En estos experimentos se ensayaron tres laminados cruzados ([0/90]s), usando para la capa transversal láminas ultradelgadas y para las capas longitudinales láminas convencionales. La geometría del modelo está compuesta por las siguientes partes:

- La capa trasnversal se modela completamente a escala micromecánica, conteniendo todas las fibras observables en las micrografías en [13]. A las fibras se les asocia un comportamiento elástico, lineal e isótropo. Para la matriz se utilizó un enfoque variacional de la mecánica de la fractura basado en asumir una grieta difusa [14], como extensión del

criterio de Griffith, ver figura 1 para un esquema del enfoque y [15] para más detalles sobre la implementación. En las interfases entre las fibras y las matrices se sitúan elementos cohesivos con una ley bilineal.

- Las capas longitudinales se modelan a escala mesomecánica como sólidos homogéneos, asumiendo un comportamiento lineal, elástico y ortótropo. Estas capas se encuentran solidariamente unidas a las capas transversales a través de sus fronteras comunes.
- Los modelos se someten en sus extremos en la longitud a un desplazamiento uniforme de valor δ_x , como se indica en la figura 2. Este desplazamiento se incrementa monótonamente hasta el final de la simulación. Para evitar movimientos como sólido rígido se fija el desplazamiento vertical del punto inferior izquierda.

Material	E [GPa]	ν	\mathcal{G}_C [N/mm]	σ_c [MPa]
Fibra	13	0.2	-	-
Matriz	2.79	0.33	0.02	80

Material	E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	E_{33} [GPa]
Capa long.	113.5	8.31	8.31
	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
	0.3	0.3	0.45

Interfaz	σ_c [MPa]	\mathcal{G}_C [N/mm]
Modo I	75	0.002
Modo II	100	0.04

	[0 ₂ /90/0 ₂]	[0 ₂ /90 ₂ /0 ₂]	[0 ₂ /90 ₄ /0 ₂]
L [mm]	0.4	0.8	1.6
$2t_{90}$ [mm]	0.04	0.08	0.16
t_0 [mm]	0.48	0.48	0.48

Tabla 1: Propiedades y parámetros geométricos utilizados en el modelo [13, 16, 17] para los laminados [0₂/90_n/0₂] ($n = 1, 2$ y 4).

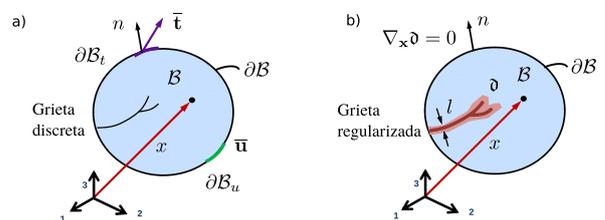


Figura 1: Esquema de la idealización de una grieta difusa en el enfoque variacional.

Tanto los modelos de zona cohesiva como el enfoque de *phase field* se consideran especialmente adecuados para estos modelos micromecánicos. La principal causa es que, estando físicamente bien fundamentados, permiten recoger el comportamiento asociado a la existencia de una zona de proceso delante de la grieta comparable con

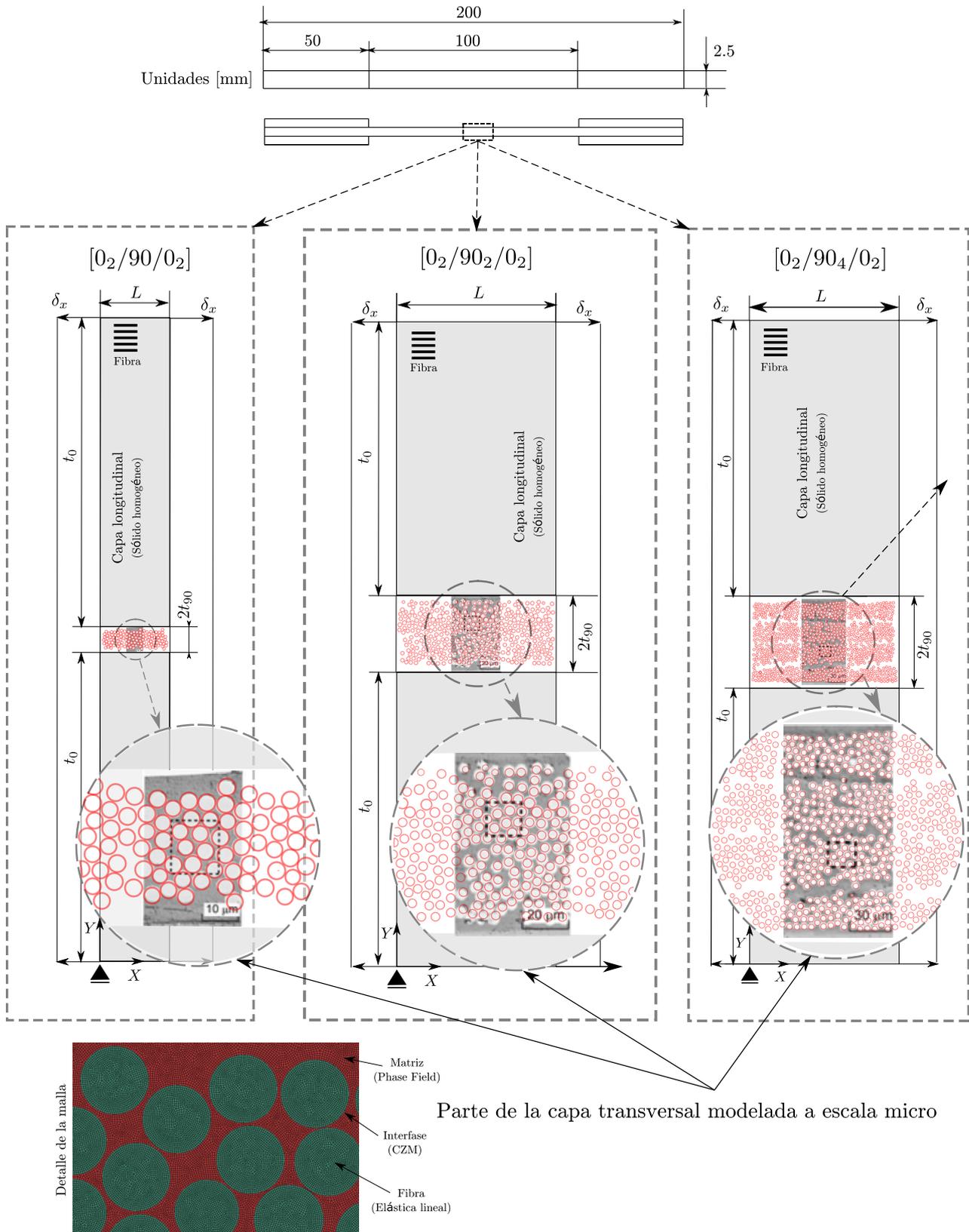


Figura 2: Esquema de los modelos computacionales desarrollados.

el tamaño de la grieta. Este hecho, casi inherente a la escala de estudio excepto para materiales extremadamente frágiles, desaconseja el empleo de la mecánica de la fractura elástico lineal.

Los valores de las propiedades utilizadas en el modelo se representan en la tabla 1.

Como se puede observar en la figura 2, los tres mode-

los se diferencian principalmente en el espesor de la capa transversal y corresponden a los tres tipos de laminados ensayados en [13]. Esto permitirá observar la influencia del espesor de la capa transversal sobre las diferentes etapas de la progresión del daño entre escalas.

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan, a efecto ilustrativo, los resultados obtenidos para el modelo correspondiente al laminado con mayor espesor de la capa transversal. Un análisis más detallado y completo de todos los espesores puede encontrarse en [15]. Así, en la figura 3 se describen las diferentes etapas observadas en el proceso de transición del daño/grieta entre la escala micro y meso:

1. El primer evento de daño (paso 1) se corresponde con la aparición de despegues aislados entre la fibra y la matriz. La situación del primero de estos despegues viene determinado por la distribución aleatoria de las fibras, lo cuál genera que algunas interfaces estén ligeramente más cargadas por el entorno local de la propia fibra, ver [18] para una discusión en este sentido. A este efecto, que sí se recoge en el modelo, habría que añadir el efecto de la variación de las propiedades de resistencia y tenacidad de la interfaz, que no se recoge aquí, pero que tendría influencia en la situación de este primer despegue.
2. Puesto que es de esperar que haya otras fibras en una situación de carga muy similar a las del primer despegue, nuevos despegues aislados se suceden para un nivel de deformación muy cercano (pasos 2 y 3).
3. De forma paralela a la aparición de los sucesivos despegues aislados, se observa la aparición de daño y despegues en fibras cercanas a las fibras ya despegadas (pasos 3-5). A diferencia del paso anterior, este paso se puede considerar ya una suerte de propagación de daño. A escala micro estos despegues se pueden considerar grietas de interfase no conectas, pero a escala meso es un daño difuso. Este daño progresa de forma ligeramente estable en diferentes zonas del modelo.
4. Para un cierto nivel de deformaciones, empieza a aparecer una zona de proceso importante en la matriz cercana a los vértices de algunas grietas de interfases (paso 6).
5. Estas zonas de proceso finalmente dan lugar a la migración de la grieta de interfaz hacia la matriz (paso 7).
6. Estas grietas en la matriz conectan los diferentes despegues (paso 8) hasta llegar a formar una grieta transversal que abarca completamente el espesor de la capa transversal (paso 9).

Las etapas predichas por los modelos son coherentes con las observaciones experimentales que se pueden encontrar en la literatura, ver p.e. [13]. Los resultados además

muestran como, a una escala mesomecánica, se puede identificar un daño que crece de forma estable, como fue postulado por [4] como hipótesis de partida de su criterio.

4. EFECTO DE TAMAÑO

En esta sección se presentan las principales implicaciones del modelo presentado sobre el efecto de tamaño observado experimentalmente por [2], ver [15] para un análisis más detallado.

En la figura 4 se representa a qué nivel de deformación se dan las etapas claves del proceso descrito anteriormente, para los tres espesores ensayados en [13]. En primer lugar, se puede observar que el primer despegue aparece para un nivel de deformación muy similar para todos los espesores. Como se ha discutido anteriormente, esta etapa depende del entorno local de cada fibra, por lo que es esperable que sea así. Sin embargo, el siguiente paso, la primera migración de una grieta hacia la matriz sí presenta un gran contraste entre espesores. Finalmente, el último paso, la primera grieta transversal completa aparece para un nivel de deformación mayor cuánto menor es el espesor de la capa transversal.

En los resultados experimentales, ver p.e. [2, 3], el efecto de tamaño se observa cuando se compara la deformación crítica a la que aparece la primera grieta transversal para diferentes espesores. En ese sentido, es necesario identificar cuál de las etapas anteriores se asocia con la iniciación de una grieta. La gran mayoría de los experimentos presentes en la literatura se basan o bien en la detección de la iniciación mediante emisión acústica o en la observación directa. En base a esto, se identifica la iniciación de la grieta con la última etapa en la que la sucesiva conexión entre los despegues genera una grieta transversal, que además es esperable que provoque una emisión acústica detectable. La tendencia observada en la figura 4 coincide con la tendencia observada en los experimentos.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la versatilidad de la combinación de un enfoque varacional de la fractura (típicamente conocido como *phase field*) y los modelos cohesivos para modelar el comportamiento micromecánico de materiales compuestos.

Los resultados muestran la progresión del daño entre escalas, desde pequeños despegues en la interfaz fibra-matriz hasta una grieta transversal completa a una escala mayor. Si se fija el foco en la escala meso, este progreso se puede entender como la transición entre daño y fractura. Cabe destacar que se observa una gran diversidad en la estabilidad en las diferentes etapas de esta progresión entre escalas, lo cuál es muestra de la complejidad del proceso de transición entre daño y fractura.

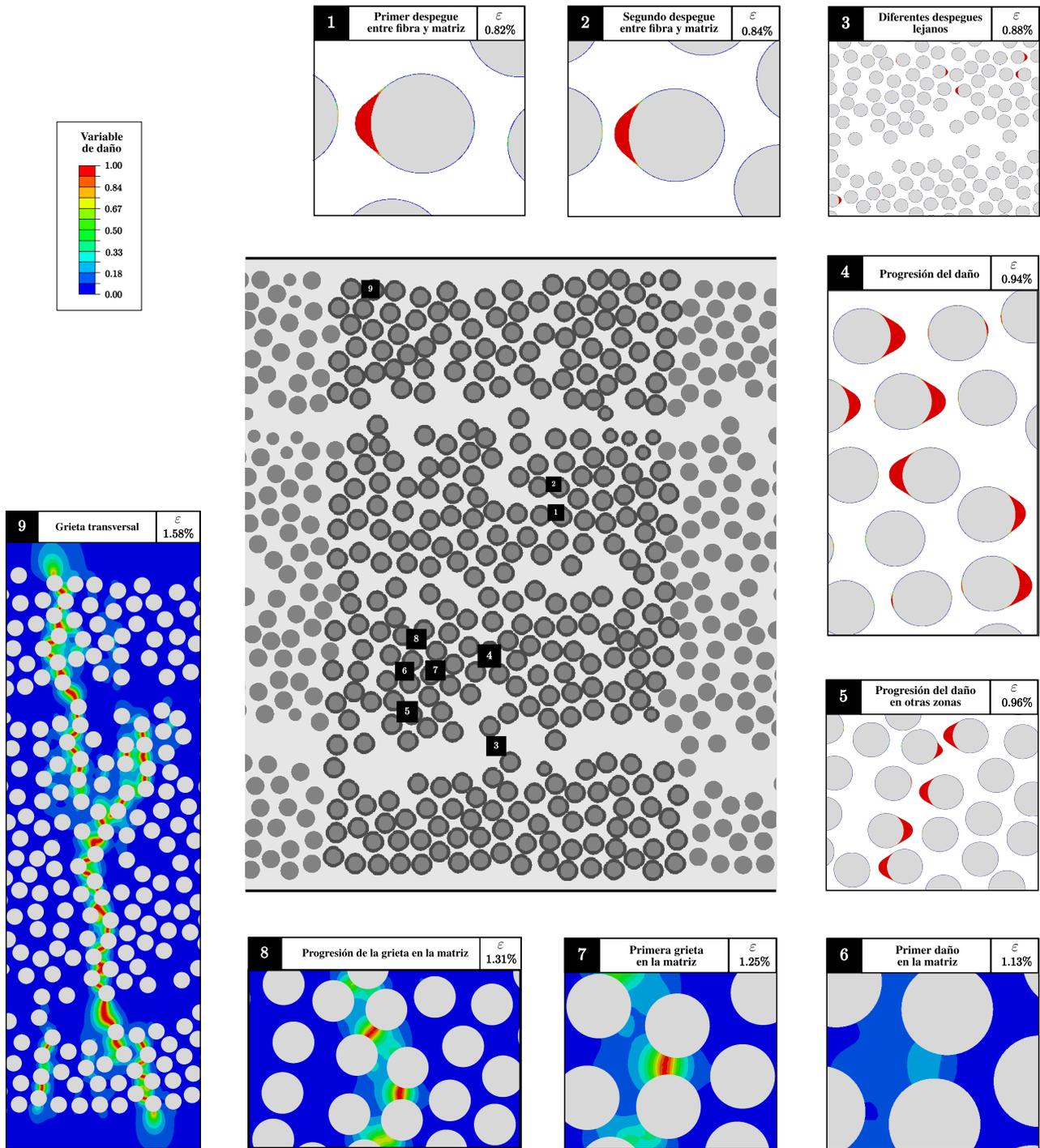


Figura 3: Resultados: Progresión del daño desde las primeras grietas en la interfaz fibra-matriz hasta que el daño abarca la totalidad del espesor de la capa transversal del laminado. El espesor corresponde al mayor de los espesores de los experimentos descritos en [13]

Finalmente, en cuanto al efecto de tamaño en laminados cruzados, se destaca que con un modelo micromecánico se detecta una tendencia en la que la deformación crítica a la que aparece la grieta transversal aumenta cuando se disminuye el espesor de la capa transversal, resultado que es compatible con lo observado en los experimentos.

AGRADECIMIENTOS

JR and IGG agradecen a la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía por su apoyo a través del Proyecto US-1265577 del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020. MP agradece el soporte financiero del Ministerio de Educación, Universidad e Investigación de Italia a través del Project of Re-

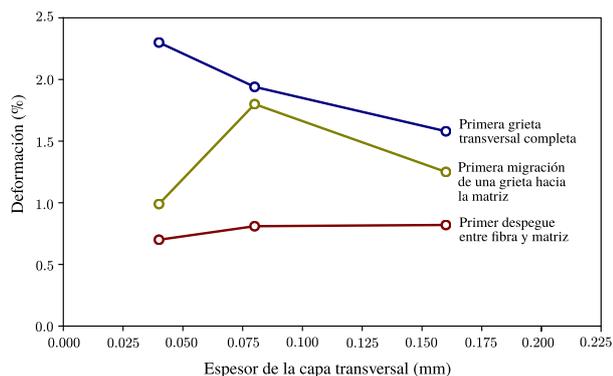


Figura 4: Resultados para los niveles de deformación a los que se ha observado cada uno de los pasos claves de la progresión del daño entre escalas.

levant National Interest 2017 «XFAST-SIMS: Extra fast and accurate simulation of complex structural systems» (Prot. 20173C478N). En algunas de estas simulaciones se emplearon las capacidades computacionales de CINECA, gracias al proyecto IsC77MIC090.

REFERENCIAS

- [1] J.M. Berthelot. Transverse cracking and delamination in cross-ply glass-fiber and carbon-fiber reinforced plastic laminates: Static and fatigue loading. *Applied Mechanics Reviews*, 56(1):111–147, 2003.
- [2] A Parvizi, KW Garrett, and JE Bailey. Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates. *Journal of Materials Science*, 13(1):195–201, 1978.
- [3] I.G. García, J. Justo, A. Simon, and V. Mantič. Experimental study of the size effect on transverse cracking in cross-ply laminates and comparison with the main theoretical models. *Mechanics of Materials*, 128:24–37, 2019.
- [4] G. J. Dvorak and N. Laws. Mechanics of first ply failure in composite laminates. *American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division*, 74:59–69, 1985.
- [5] G. J. Dvorak and N. Laws. Analysis of first ply failure in composite laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5-6):763–770, 1986.
- [6] Zvi Hashin. Finite thermoelastic fracture criterion with application to laminate cracking analysis. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(7):1129–1145, 1996.
- [7] Dong Sheng Li and Michael R Wisnom. Evaluating weibull parameters for transverse cracking in cross-ply laminates. *Journal of composite materials*, 31(9):935–951, 1997.
- [8] D. Leguillon. Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch. *European Journal of Mechanics and Solids*, 21(1):61–72, 2002.
- [9] IG García, V Mantič, A Blázquez, and F París. Transverse crack onset and growth in cross-ply [0/90] s laminates under tension. application of a coupled stress and energy criterion. *International journal of Solids and Structures*, 51(23-24):3844–3856, 2014.
- [10] A Arteiro, G Catalanotti, AR Melro, P Linde, and PP Camanho. Micro-mechanical analysis of the effect of ply thickness on the transverse compressive strength of polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 79:127–137, 2015.
- [11] Miguel Herráez, Diego Mora, Fernando Naya, Claudio S Lopes, Carlos González, and Javier LLorca. Transverse cracking of cross-ply laminates: A computational micromechanics perspective. *Composites Science and Technology*, 110:196–204, 2015.
- [12] F. París, M. L. Velasco, and E. Correa. Micromechanical study on the influence of scale effect in the first stage of damage in composites. *Composites Science and Technology*, 160:1–8, 2018.
- [13] Hiroshi Saito, Hiroki Takeuchi, and Isao Kimpara. Experimental evaluation of the damage growth restraining in 90 layer of thin-ply cfrp cross-ply laminates. *Advanced Composite Materials*, 21(1):57–66, 2012.
- [14] B Bourdin, G A Francfort, and J-J Marigo. Numerical experiments in revisited brittle fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(4):797–826, 2000.
- [15] Carlos Sandino, Elena Correa, and Federico París. A study of the influence of a nearby fibre on the interface crack growth under transverse compression in composite materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 193:1–16, 2018.
- [16] A Arteiro, G Catalanotti, AR Melro, P Linde, and Pedro P Camanho. Micro-mechanical analysis of the in situ effect in polymer composite laminates. *Composite Structures*, 116:827–840, 2014.
- [17] V Mantič. Interface crack onset at a circular cylindrical inclusion under a remote transverse tension. application of a coupled stress and energy criterion. *International journal of Solids and Structures*, 46(6):1287–1304, 2009.
- [18] T. Guillén-Hernández, I. G. García, J. Reinoso, and M. Paggi. A micromechanical analysis of inter-fiber failure in long reinforced composites based on the phase field approach of fracture combined with the cohesive zone model. *International Journal of Fracture*, 2019.