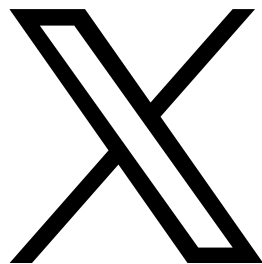


Bienvenid@s

WEBINAR





#WebinarsAEMAC

Estudio experimental del papel de la rotura de fibras
en la resistencia de los compuestos de matriz
termoplástica sometidos a compresión tras impacto



FERNANDO NAYA
Investigador Postdoctoral
UC3M

Grupo Dinámica de Estructuras Ligeras

5



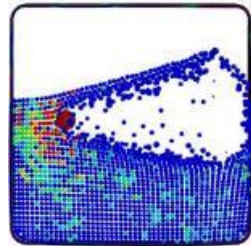
Dinámica de estructuras ligeras: 1 CU, 4 TU, 3 PD, 2 PhD

El grupo de investigación se centra en el estudio **experimental** del comportamiento de **estructuras ligeras** bajo **condiciones dinámicas** (impacto a alta y media velocidad), incluyendo la modelización del comportamiento de materiales a **altas velocidades de deformación** para desarrollar **modelos numéricos** y **analíticos** eficaces y fiables.

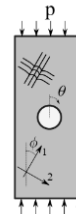
Experimental



Numérico



Analítico

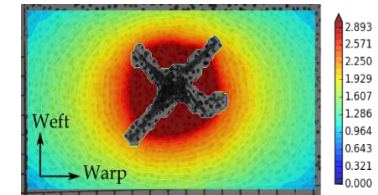
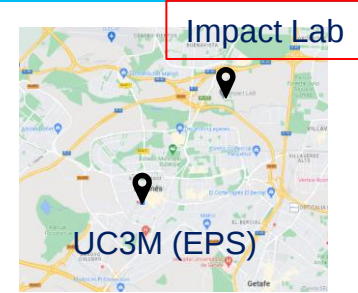
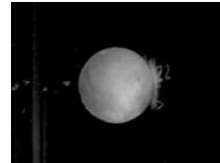
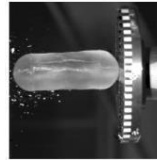


$$\sigma_{\theta} = P \frac{E_{\theta}}{E_1} \{ [-\cos^2 \phi (k + n) \sin^2 \phi] k \cos^2 \theta + [(1 + n) \cos^2 \phi - k \sin^2 \phi] \sin^2 \theta - n (1 + k + n) \sin \phi \cos \phi \sin \theta \cos \theta \}$$

Instalaciones: ensayos dinámicos (estructurales)

6

- Múltiples cañones propulsados por gas (aire o helio)
- Velocidades subsónicas y supersónicas (de 20 a 1000 m/s)
- De a 5 mm a 500 mm de calibre y de 2 m a 18 m de longitud
- Cañones especiales (rectangulares) para formas complejas
- 5 cámaras de alta velocidad (2.1 Mfps)
- Software para hacer 3D-DIC

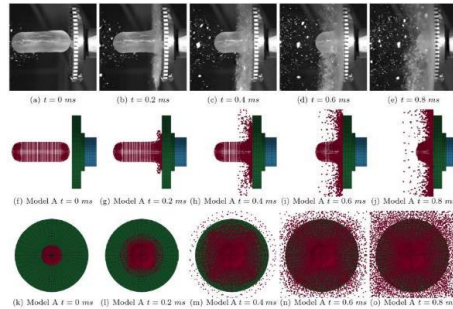


3D DIC

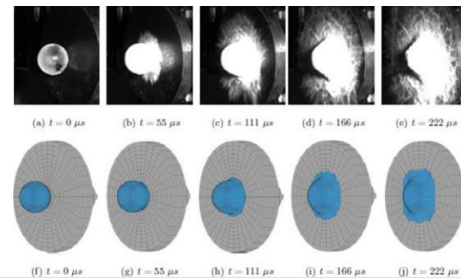
Modelización de impactos de alta velocidad

7

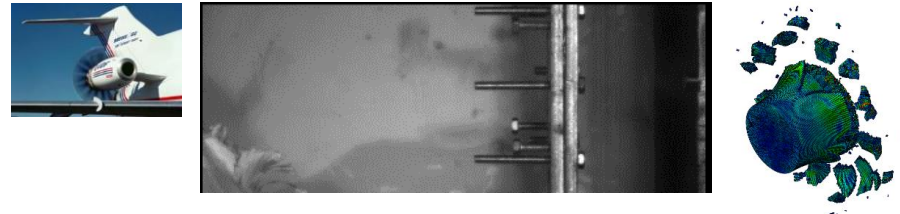
Hielo/granizo:



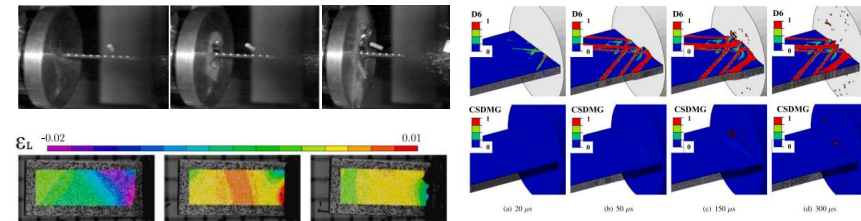
Pájaro (artificial):



Open rotor $\rightarrow$ Uncontained Engine Rotor Failure (UERF):



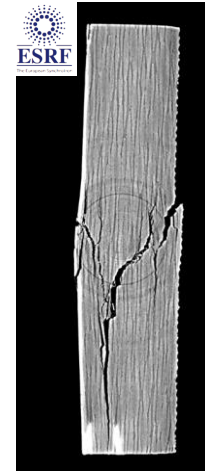
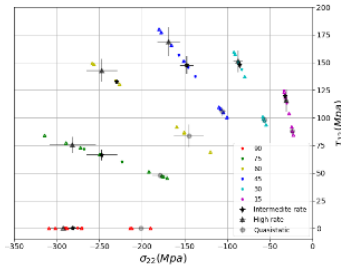
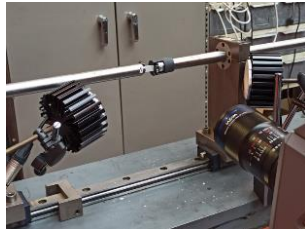
Impacto de fragmentos de CFRP:



Caracterización dinámica de materiales

8

- Caracterización del comportamiento dinámico de materiales a altas velocidades de deformación



uc3m

Universidad
Carlos III
de Madrid



AMAD
Universidad De Granada



DASSAULT
AVIATION





Estudio experimental del papel de la rotura de fibras en la resistencia de los compuestos de matriz termoplástica sometidos a compresión tras impacto

**J. Pernas-Sánchez^a, F. Naya^a, C. Fernández^b, P. Zumel^b,
M. Droździel-Jurkiewicz^c, J. Bieniaś^c**

^a *Grupo de Dinámica de Estructuras Ligeras*, Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Universidad Carlos III de Madrid

^b *Grupo de Sistemas de Electrónica de Potencia (GSEP)*, Dpto. Tecnología Electrónica
Universidad Carlos III de Madrid

^c Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering,
Lublin University of Technology



LUBLIN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING

- INTRODUCCIÓN
- MATERIALES Y MÉTODOS
- DAÑO EM vs LVI
- RESULTADOS DE CAI
- CONCLUSIONES (PARTE 1)
- TRABAJOS EN CURSO
- CONCLUSIONES (PARTE 2)

IMPACTOS EN ESTRUCTURAS LIGERAS

12

Fragmentos metálicos



Motores Open rotor



Impacto de pájaro



Hielo/granizo



Pneumáticos



Uncontained Engine Rotor Failure (UERF)

IMPACTOS EN ESTRUCTURAS DE CFRP

13

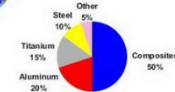
- Estructuras de material compuesto (CFRP) → Bajo peso y ahorro de combustible
- ¿Comportamiento dinámico (admisibles)? ¿Tolerancia al daño?



A350XWB



■ Carbon laminate
■ Carbon sandwich
■ Fiberglass
■ Aluminum
■ Aluminum/steel/titanium pylons



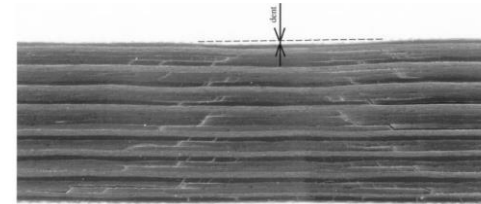
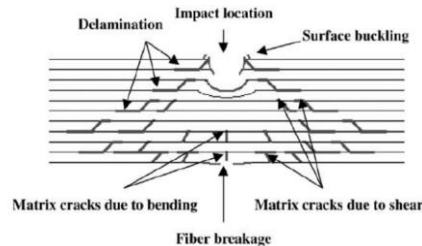
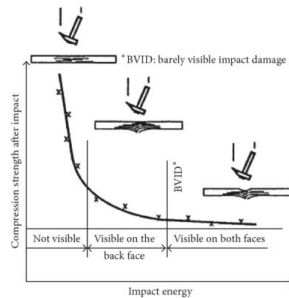
CFRP > 50%



BARELY VISIBLE IMPACT DAMAGE (BVID)

14

“Damage caused by an impact such as a tool drop, bird hit or lightning strike, that lead to **fiber or matrix cracking**. The complex stacking nature of CFRP materials makes the out-of-plane direction more sensitive to impact damage. Despite the barely visible dent of about 0.3 mm left behind on the outer surface by a BVID, a substantially larger delaminated area can occur between the different plies. This **delamination** can grow drastically when exposed to structural loads, with possible component failure as a **result**”. [1]

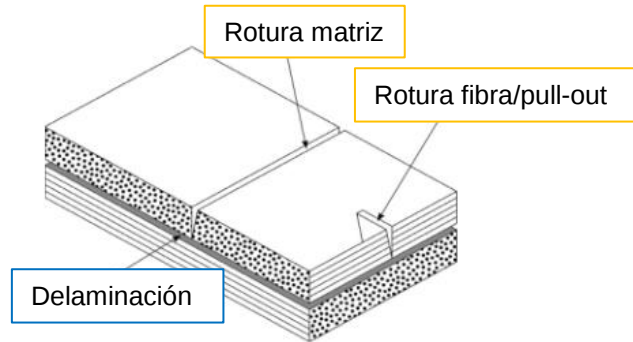


- ¿Qué mecanismo de fallo controla la disipación de energía y la resistencia residual?
- ¿Qué relación existe entre ellos?

MODELOS NUMÉRICOS PREDICTIVOS

15

Daño intralaminar (modelo de daño continuo)



Daño interlaminar (interacción cohesiva)

- Reproducen los resultados experimentales
- Permiten virtual testing y estudios paramétricos
- Consumo de CPU (> varios días)
- Gran cantidad de propiedades de material (ensayos inevitables)
- ¿Iniciación del daño y propagación (resistencia, tenacidad)?
- ¿Validación experimental (coeficiente de fricción)?
- ¿Variables de proceso (porosidad, velocidad de enfriamiento, presión, etc.)?

- La contribución de cada mecanismo de fallo aún no está clara, ya que los resultados pueden estar sesgados en función de las propiedades del material elegido y de los parámetros del modelo.

Distintos modelos → distintas conclusiones

MODELOS NUMÉRICOS PREDICTIVOS

16



510 citas (ScienceDirect)



58 citas (ScienceDirect)

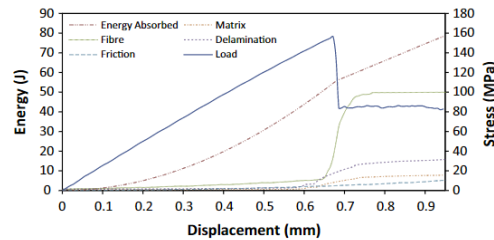
[4] Tan, W., Falzon et al. (2015). Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates. *Comp. Part A*, 71, 212–226.

[5] Baluch, A. H. et al. (2019). An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to Barely Visible Impact Damage. *Composite Structures*, 225.

MODELOS NUMÉRICOS PREDICTIVOS

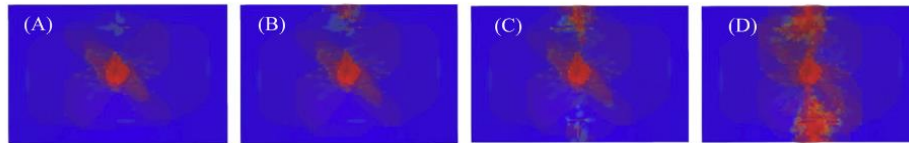
17

- La resistencia intralaminar (matrix cracking) apenas afecta al patrón y la extensión de la delaminación
- La rotura de la matriz afecta claramente a la carga máxima durante el LVI
- ¿La rotura de fibras desencadena el fallo final durante la CAI?
- ¿Cómo se propaga el daño?



“the rapid increase in fibre-dominated damage led to a corresponding sudden load drop under displacement control”. [4]

Progresión del daño intralaminar durante CAI (energía de impacto 29,5 J):



“Damage initiated from the two outer edges, due to free-edge effects”. [4]

MODELOS NUMÉRICOS PREDICTIVOS

18



Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates

Wei Tan^a, Brian G. Falzon^{a,*}, Louis N.S. Chiu^b, Mark Price^a

^aSchool of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University Belfast, Ashby Building, Belfast BT9 5AH, UK
^bDepartment of Mechanical and Aerospace Engineering, Monash University, Building 31, Clayton, VIC 3800, Australia



510 citas (ScienceDirect)



An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to Barely Visible Impact Damage

Abrar H. Baluch^{a,*}, Olben Falcó^a, José Luis Jiménez^a, Bas H.A.H. Tijs^b, Cláudio S. Lopes^{a,*}

^aIMDEA Materials Institute, c/ Eric Kandel 2, 28906 Getafe, Madrid, Spain
^bGKN Aerospace: Fokker, Papendrecht, The Netherlands



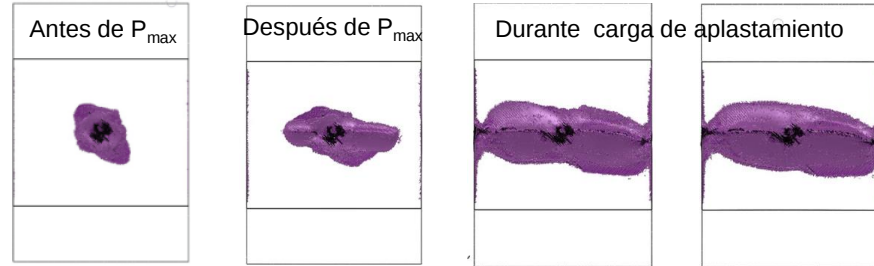
58 citas (ScienceDirect)

[4] Tan, W., Falzon et al. (2015). Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates. *Comp. Part A*, 71, 212–226.

[5] Baluch, A. H. et al. (2019). An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to Barely Visible Impact Damage. *Composite Structures*, 225.

“CAI behaviour after BVID depends almost exclusively on the delamination damage produced during LVI”

“damage propagation accompanied the local buckling and bulging of the sub-laminates and occurred within a relatively narrow loading window before the CAI specimen finally collapsed as the result of global or combined local–global buckling modes.” [5]



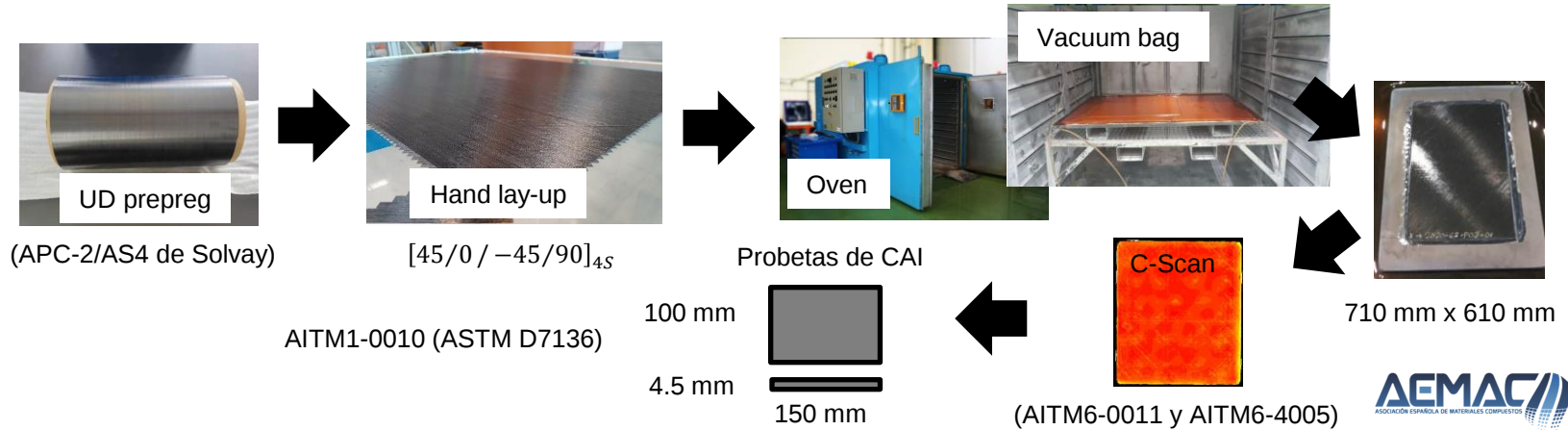
- La delaminación debe ser mapeada en unas pocas interfaces críticas. ¿En cuáles?
- ¿Qué ocurre con energías de impacto mayores? ¿Qué papel desempeñan los diferentes mecanismos de daño intralaminar (matrix cracking y rotura de fibras)? ¿Indentación del laminado tras LVI?

EXPERIMENTOS → explicar la contribución de cada mecanismo de fallo a la tolerancia al daño

MATERIAL (AS4/PEEK) Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

20

- Polímero reforzado con fibra de carbono ($V_f = 56\%$). Ampliamente utilizadas en la industria aeronáutica.
- AS4 son fibras continuas, de módulo intermedio y alta resistencia, a base de PAN
- PEEK es un termoplástico semicristalino de alto rendimiento. Su comportamiento depende de las condiciones de fabricación (PEEK e intercara).
- Curado en horno (al vacío) siguiendo las recomendaciones del fabricante



IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD

21

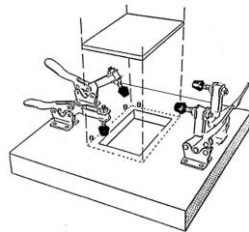
- Pruebas realizadas según la norma AITM1-001. Impactador semiesférico (R= 8 mm) de 5.556 kg.
- Energías de impacto comprendidas entre 30 J y 70 J (rango de velocidad entre 3.3 m/s y 5 m/s)

Torre de caída

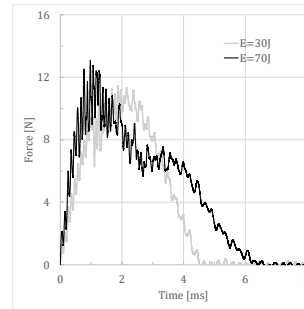


INSTRON-CEAST Fractovis 6875

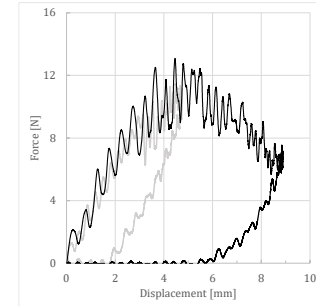
100 mm x 150 mm coupon



Plato de fijación



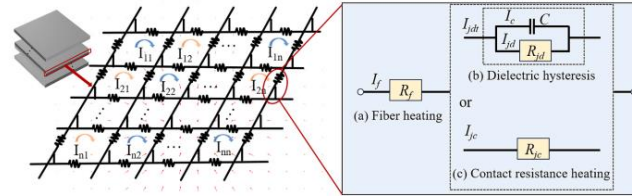
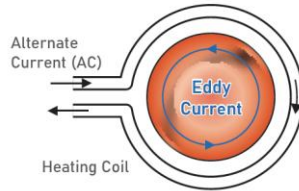
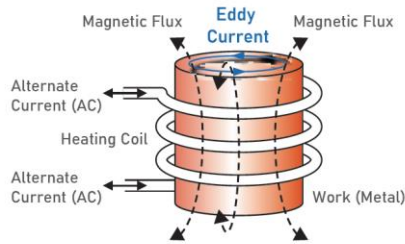
$$\dot{x}(t) = \int \ddot{x}(t) dt$$
$$x(t) = \int \dot{x}(t) dt$$



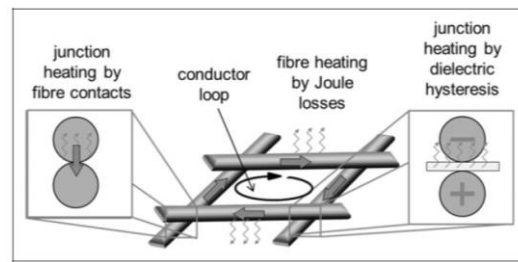
DAÑO INDUCIDO POR EM

22

- Nueva metodología para causar daños mediante campos electromagnéticos y corrientes de Foucault.



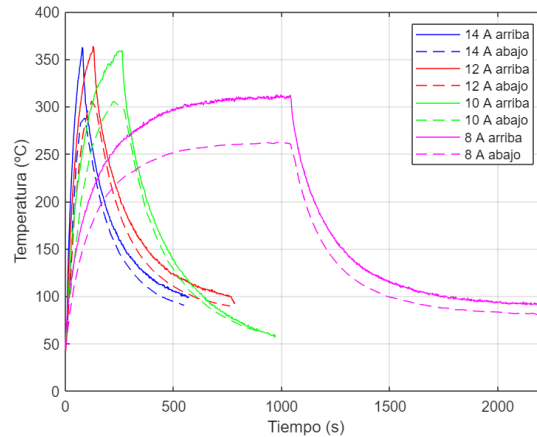
De [7]



DAÑO INDUCIDO POR EM

23

- La evolución de la temperatura depende de la forma del inductor, la potencia, el voltaje, frecuencia y otros parámetros experimentales como la distancia entre el inductor y la placa.

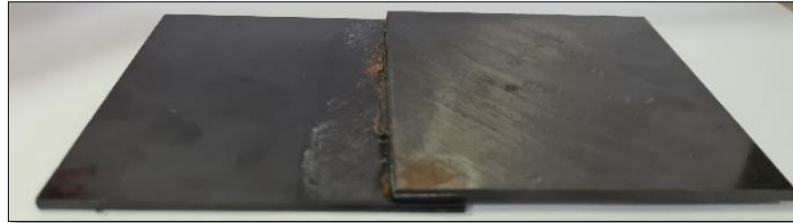


- A mayor potencia, mayor temperatura en el mismo intervalo de tiempo
- Las frecuencias altas calientan áreas más superficiales, mientras que las bajas penetran más profundamente.

DAÑO INDUCIDO POR EM

24

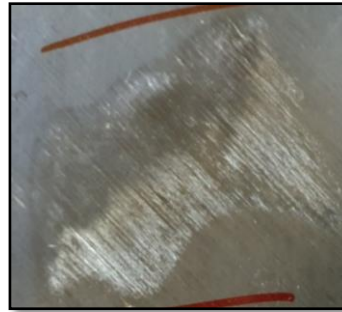
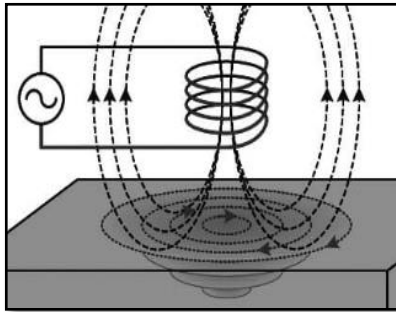
- Desarrollado originalmente para la soldadura de termoplásticos (proyecto UNION)



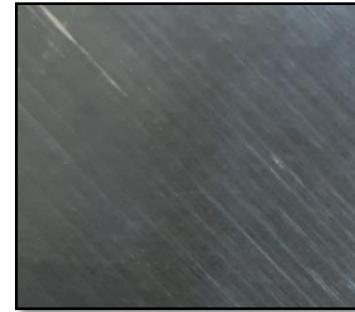
DAÑO INDUCIDO POR EM

25

- Mediante el calentamiento por inducción, se ha conseguido alcanzar la temperatura de fusión, pero siempre, con un gradiente entre caras muy alto.



Cara Superior 414 °C

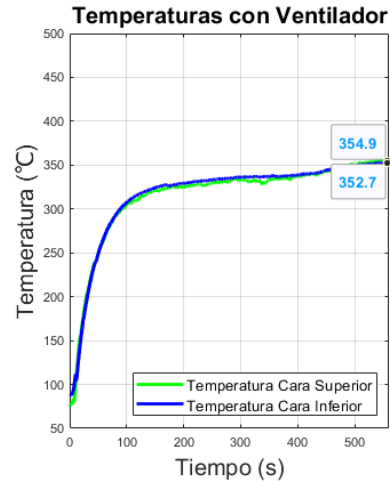
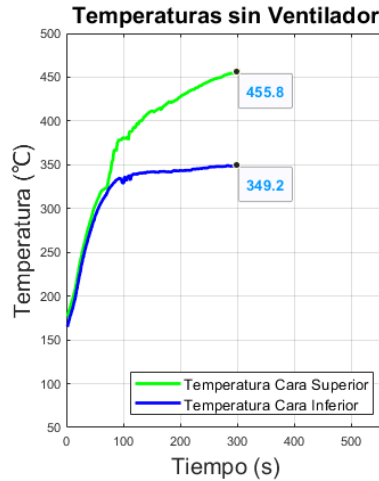


Cara Inferior 318 °C

DAÑO INDUCIDO POR EM

26

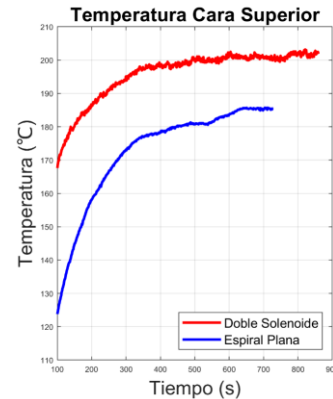
- Es difícil tener la misma temperatura en ambas caras del laminado → Convección forzada (cara superior).
- La potencia del ventilador se ajusta en función de la diferencia de temperaturas



DAÑO INDUCIDO POR EM

27

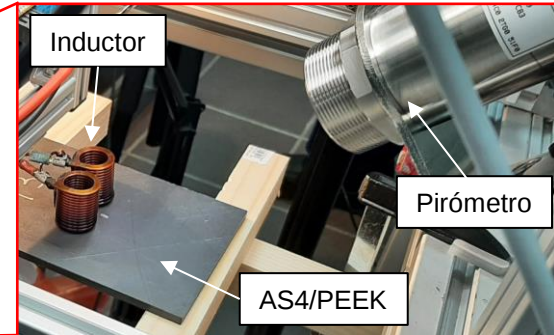
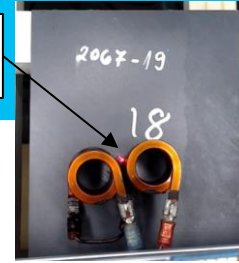
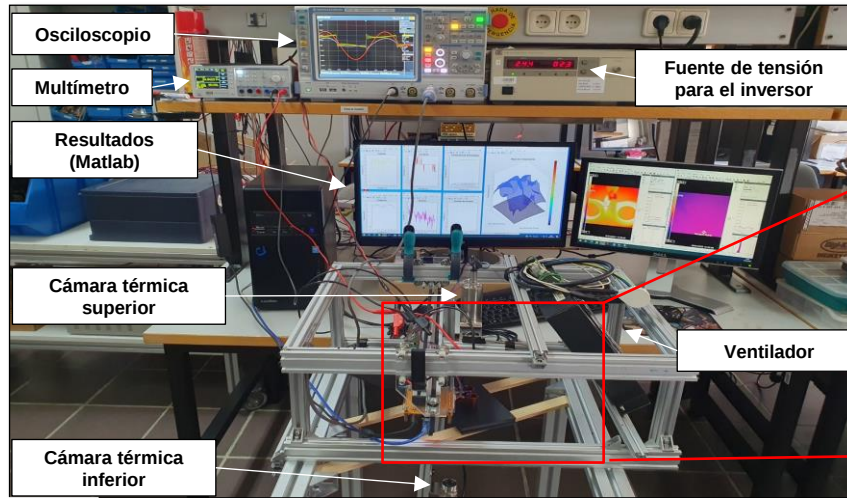
- La forma del inductor afecta a la uniformidad del campo magnético y a la distribución de temperatura (temporal y espacialmente) y, por lo tanto, la profundidad de calentamiento.
- Con el doble solenoide se alcanza una temperatura más alta, pero con la espiral plana se consigue un menor gradiente entre la cara superior e inferior.



DAÑO INDUCIDO POR EM

Temperatura
superficial

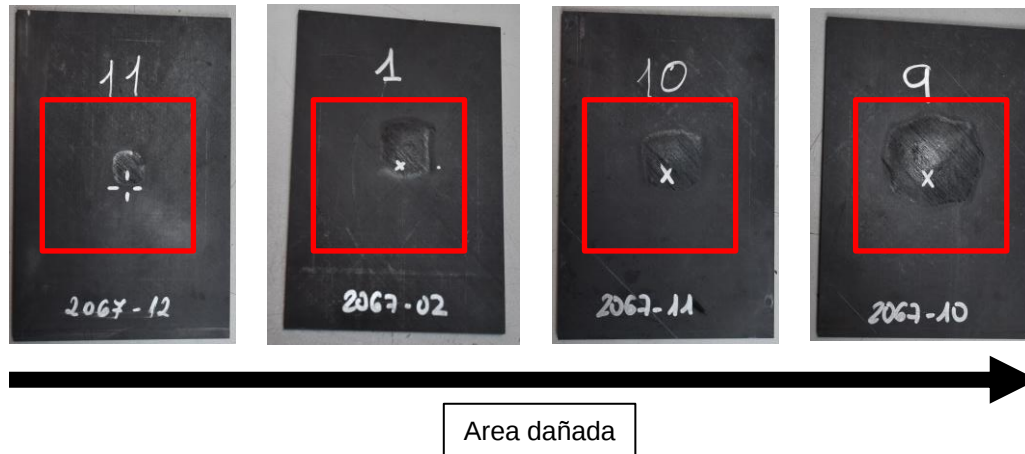
28



DAÑO INDUCIDO POR EM

29

- El proceso de calentamiento finaliza cuando se alcanza la temperatura de fusión
- Se ha utilizado varias combinaciones de potencia-voltaje para crear daños de diferentes áreas



RIGIDEZ TRANSVERSAL RESIDUAL

30

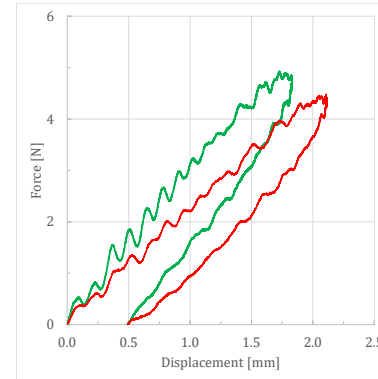
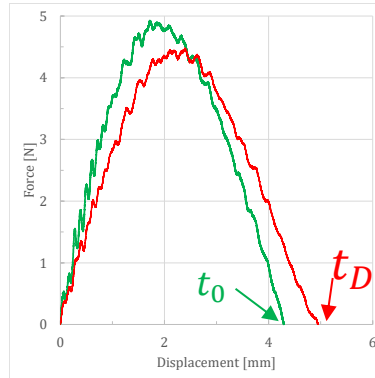
Método para determinar la rigidez transversal residual [6]

1. Impacto subcrítico (elástico): la energía permanece por debajo del umbral de daño $\rightarrow t_0$
2. Impacto crítico: energía de ensayo superior al umbral, y a la energía deseada
3. Impacto subcrítico (elástico) en el cupón dañado $\rightarrow t_D$

$$\bar{K}_{D0} = \frac{K_D}{K_0} = \sqrt{\left(\frac{t_0}{t_D}\right)}$$

K_0 : rigidez transversal (intacto)

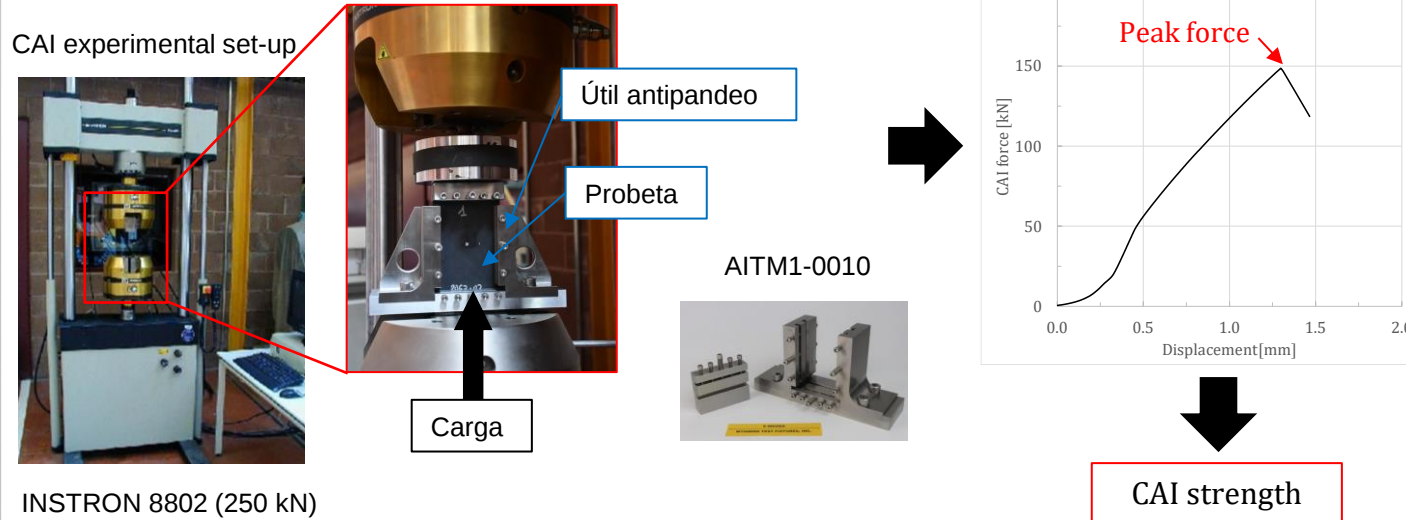
K_D : rigidez transversal (daño)



COMPRESIÓN DESPUÉS DE IMPACTO (CAI)

31

- Pruebas de CAI (AITM1-0010) realizadas con las muestras dañadas por LVI y EM

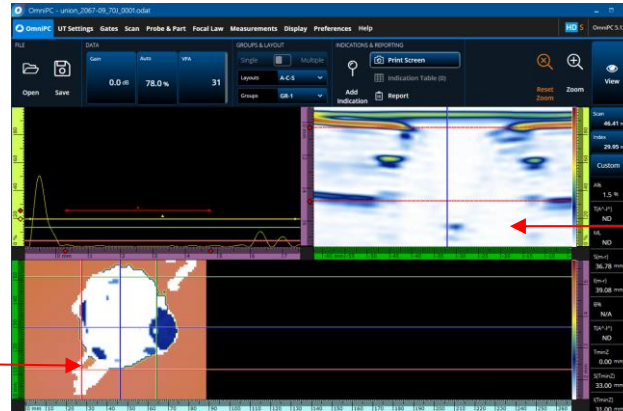


DAÑO POR LVI VS EM (INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS) 32

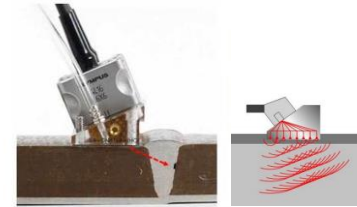
- Las muestras dañadas por LVI y EM se inspeccionan mediante un escáner Phased-Array
→ Área delaminada



Olympus OmniScan X3



C-Scan

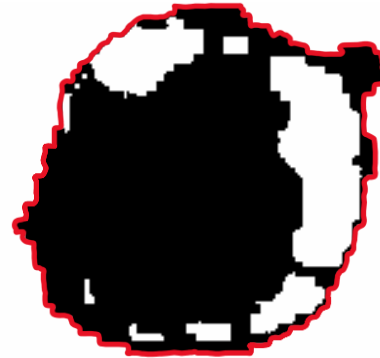
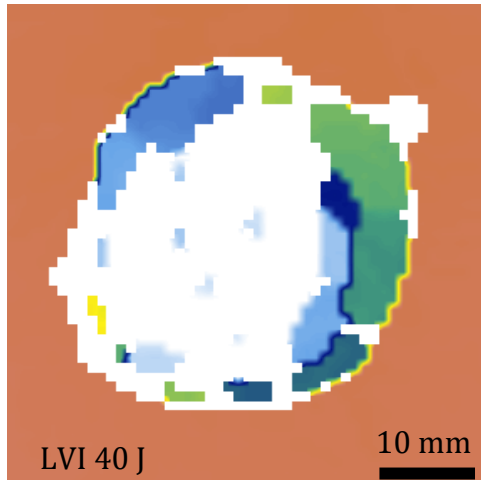


S-Scan

Patrón de daño a lo largo del espesor

DAÑO POR LVI VS EM (INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS) 33

- Las imágenes son posprocesadas con el software (libre) ImageJ



Área = 1091 mm²

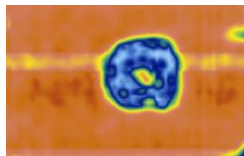
DAÑO POR LVI VS EM (INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS) 34

- Para mejorar la calidad de la medida y reducir la incertidumbre → Dos algoritmos

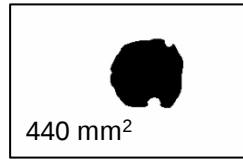
Thickness-based



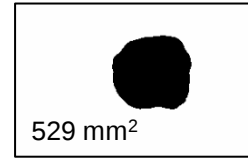
Attenuation-based



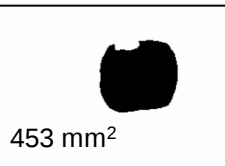
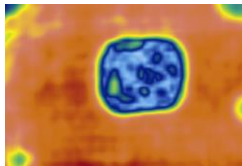
Área delaminada media= 484.5 mm²



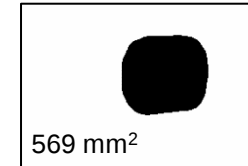
440 mm²



529 mm²



453 mm²



569 mm²

Área delaminada media= 511 mm²

INSPECCIÓN MICROGRÁFICA

35

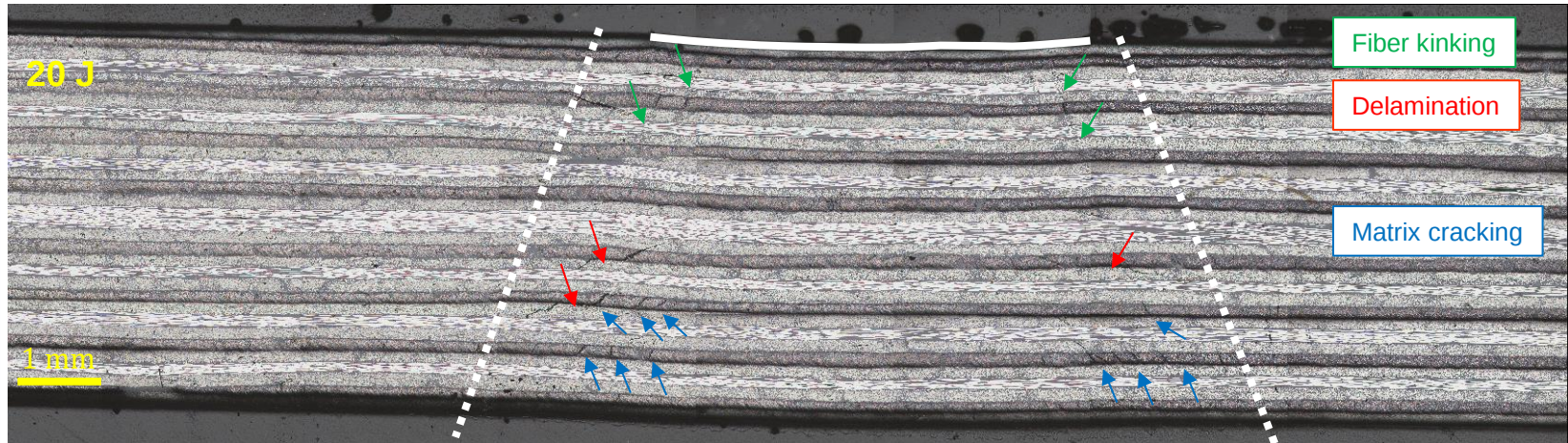
- Para estudiar y comparar la morfología del daño (EM vs LVI) → Inspección micrográfica



IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (20J)

36

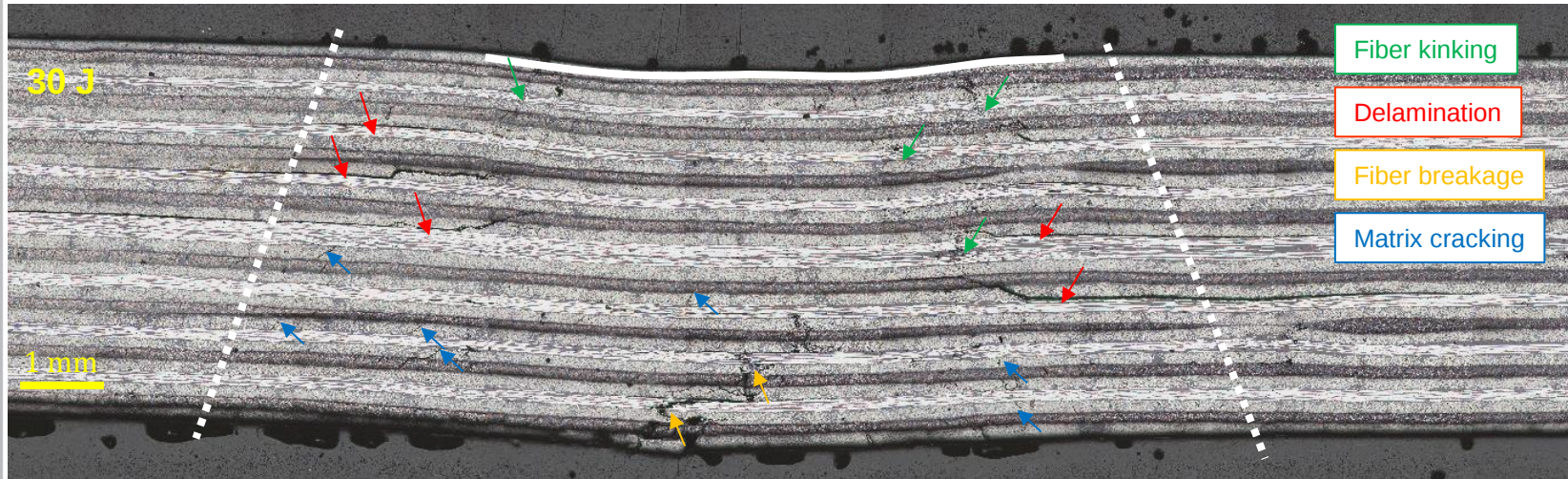
- No se produce rotura de fibras a 20 J



IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (30J)

37

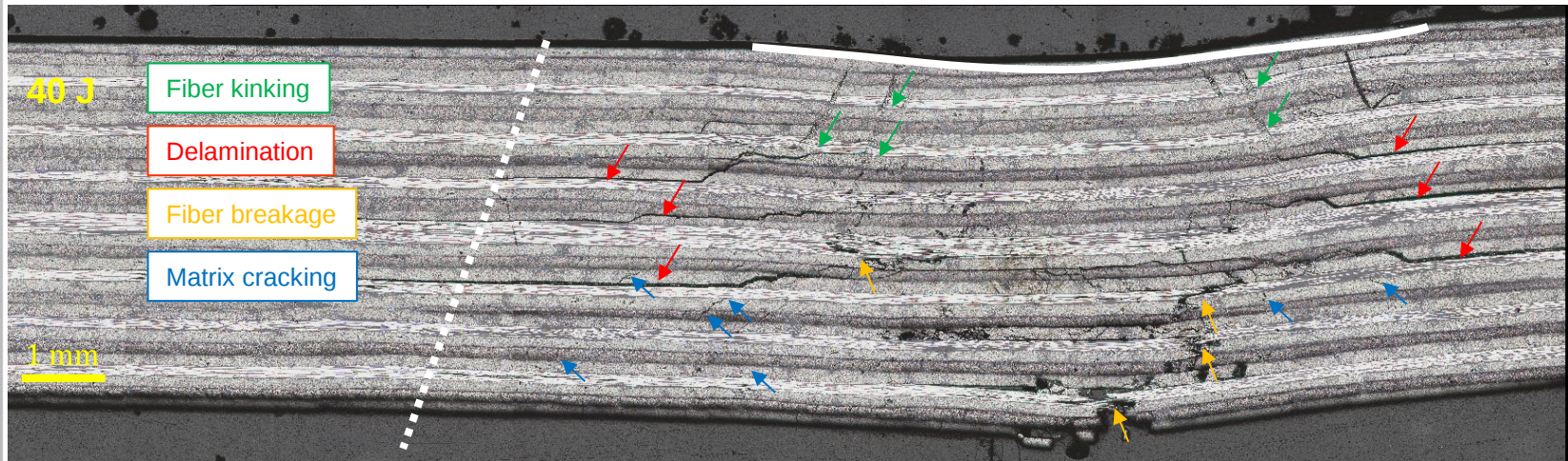
- Rotura de fibras a 30 J. Energía umbral entre 20 J y 30 J



IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (40J)

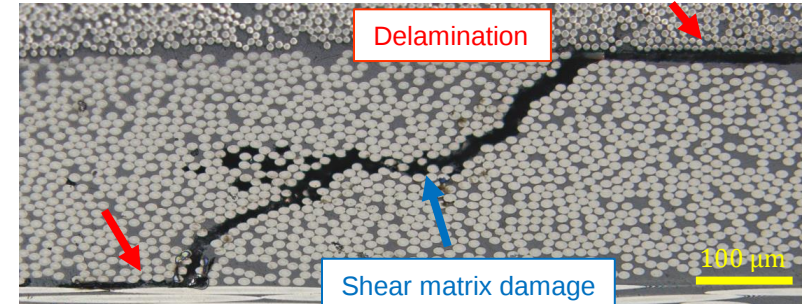
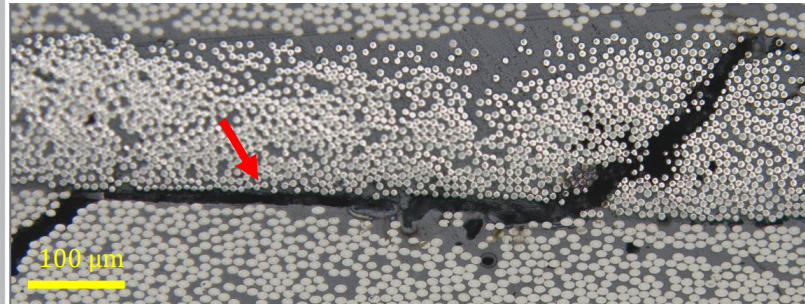
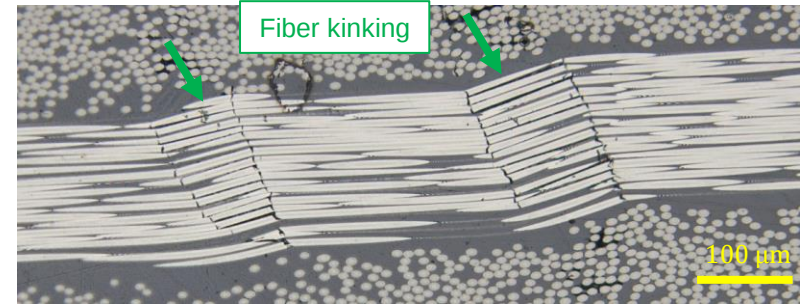
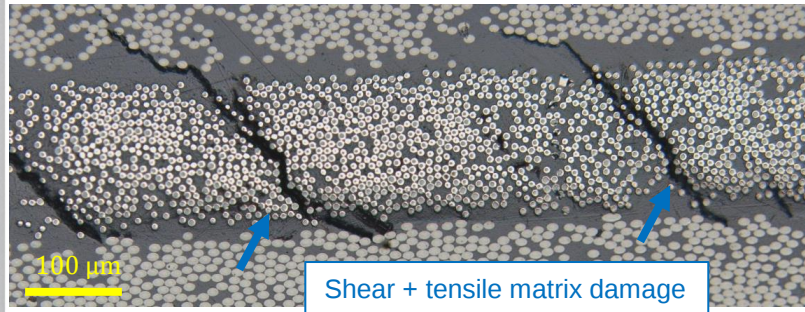
38

- Rotura de fibras a aumenta con la energía de impacto (30 J $\rightarrow$ 40 J)



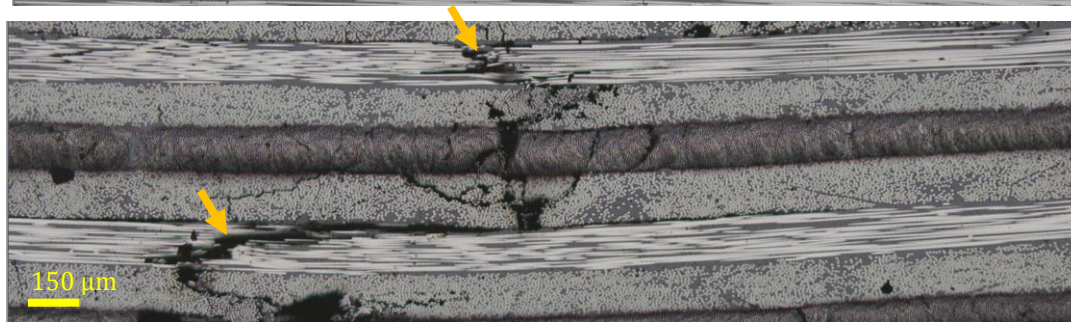
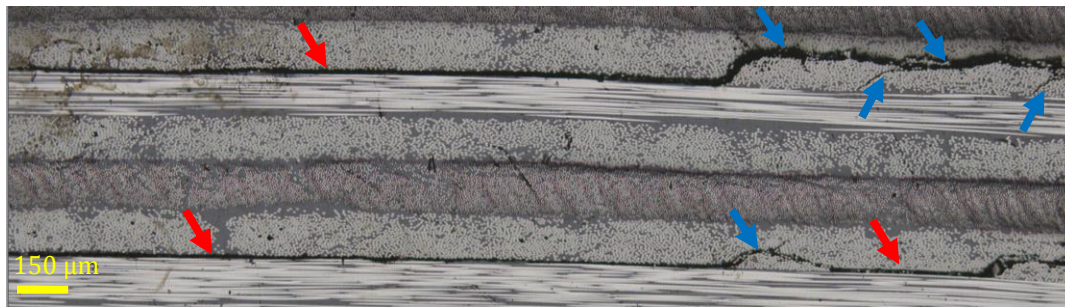
IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (20 J)

39



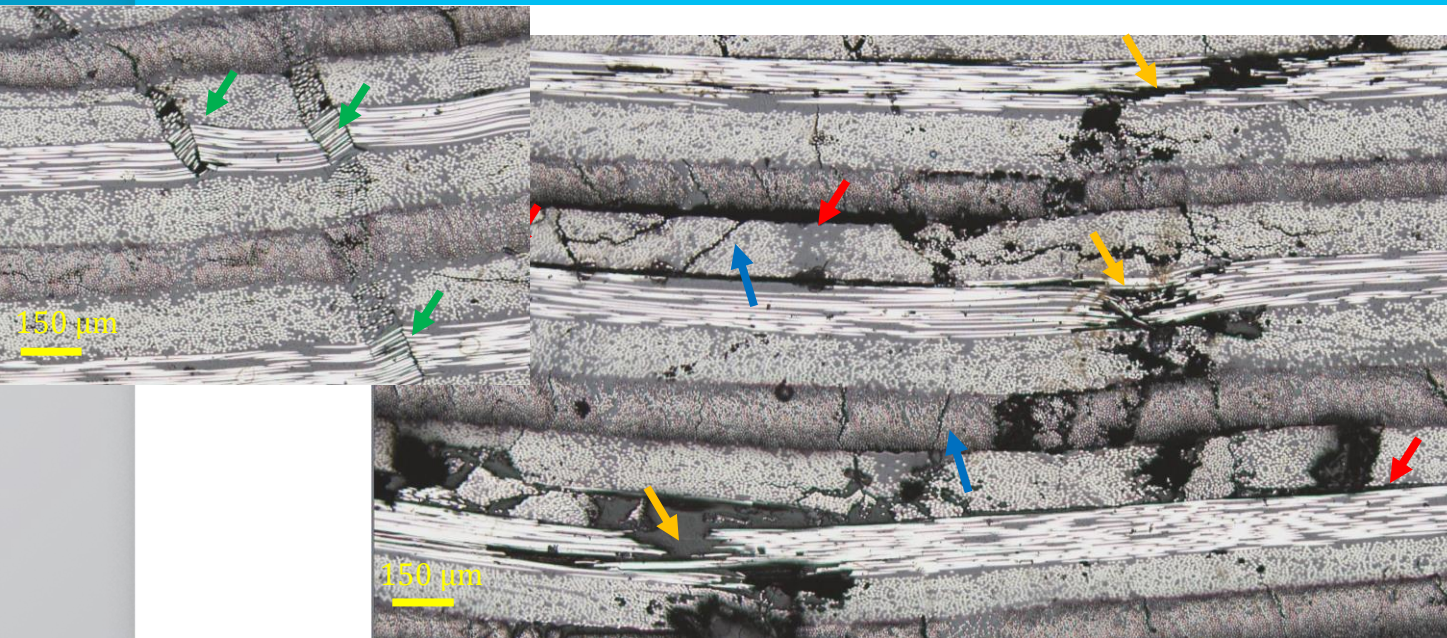
IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (30 J)

40



IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD (40 J)

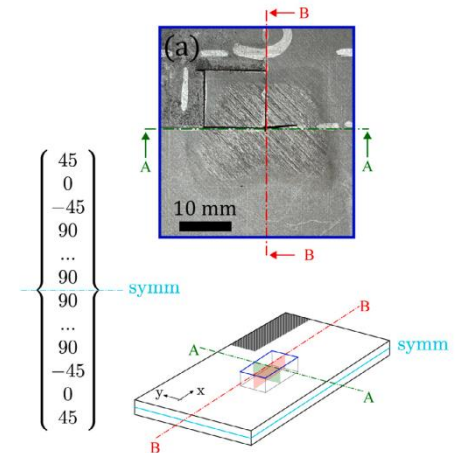
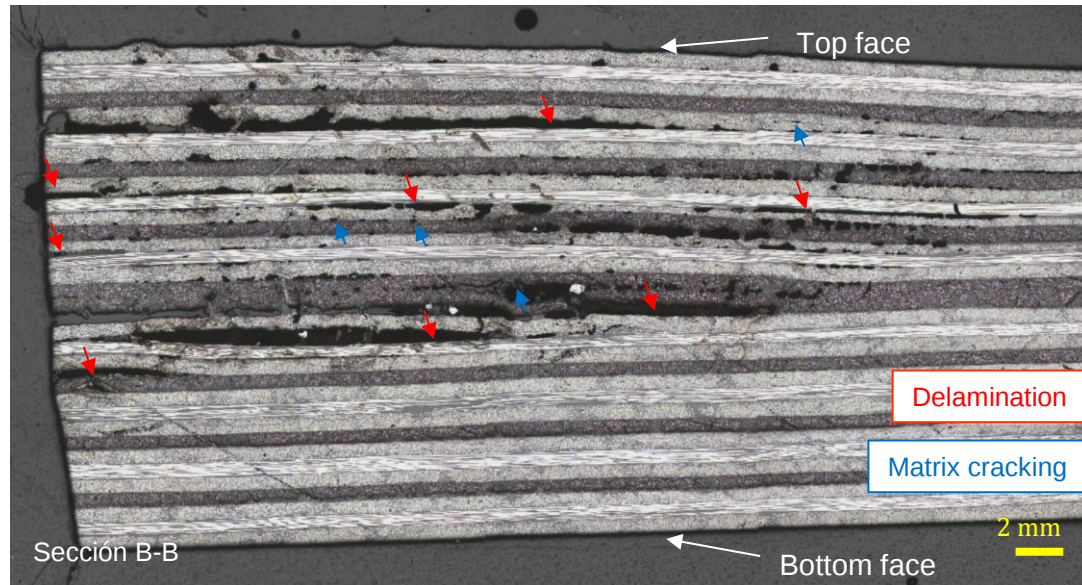
41



DAÑO POR EM

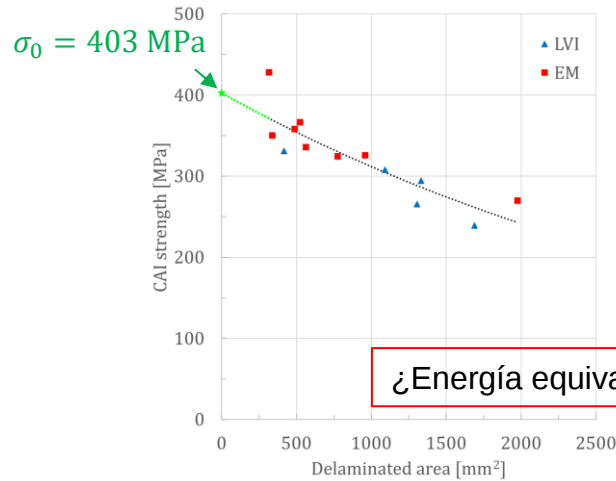
42

- No se produce daño por rotura de fibra en ningún caso

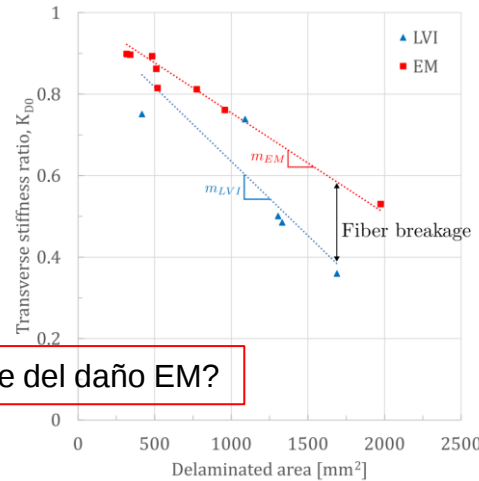


RESULTADOS

43



¿Energía equivalente del daño EM?



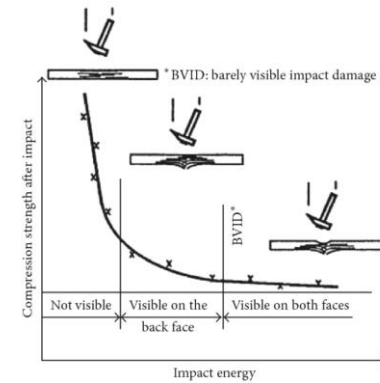
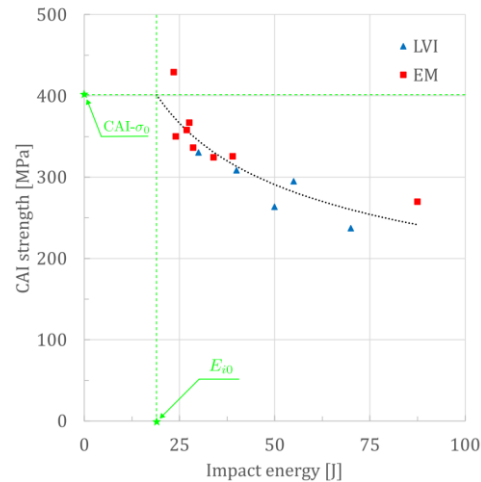
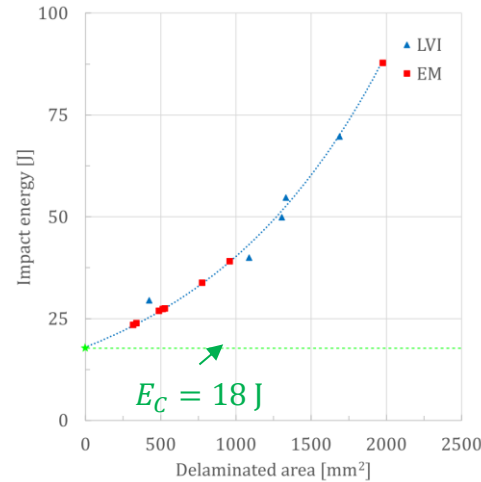
$$\bar{K}_{D0} = \frac{K_D}{K_0} = \sqrt{\left(\frac{t_0}{t_D}\right)}$$

K_0 : rigidez transversal (intacto)
 K_D : rigidez transversal (daño)

- La resistencia del CAI no depende de la rotura de fibras
- La rigidez transversal residual se ve claramente afectada por la rotura de fibras

RESULTADOS

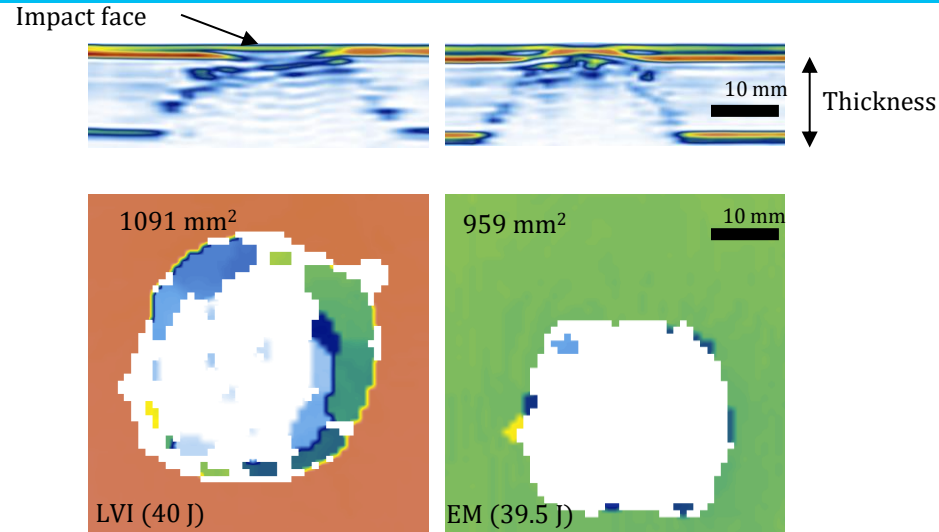
44



- Ahora podemos comparar las muestras dañadas por LVI y EM para una energía de impacto equivalente
- Ahora podemos comparar patrones de daño para energías equivalentes

DAÑO LVI VS EM (INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS)

45



- El patrón y la extensión del daño son similares para LVI y EM de energía de impacto similar
- La extensión y el patrón de los daños del LVI pueden reproducirse mediante corrientes EM

DAÑO LVI VS EM (INSPECCIÓN POR CT)

46



POLITECHNIKA
LUBELSKA
LUBLIN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

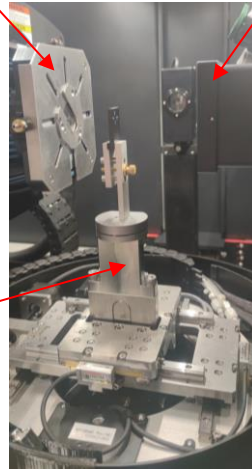


LUBLIN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING

Detector de rayos X

Fuente de rayos X

Base multifunción



Zeiss Xradia 510 Versa:

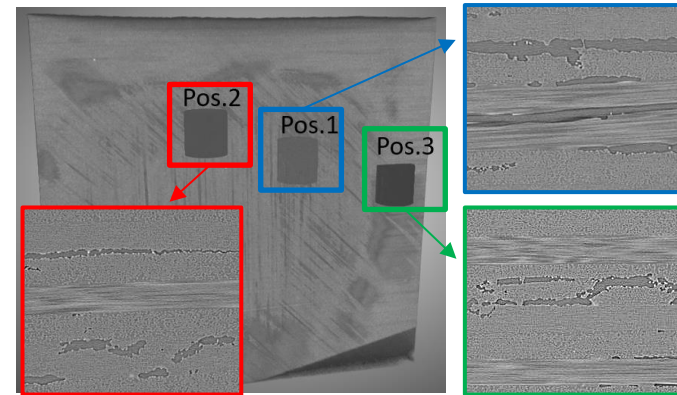
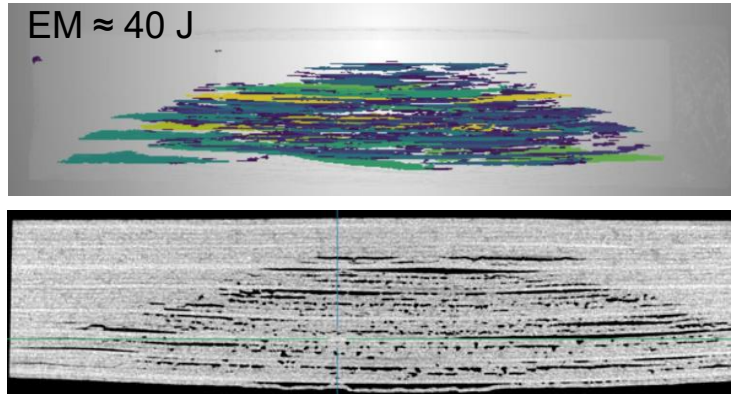


Muestras de 20 mm x 30 mm
Tamaño de voxel 22 μm / 2 μm
Tiempo 4 h / 4 h

- Se inspeccionaron por CT muestras obtenidas de probetas impactadas (30 J y 40 J)
- Se inspeccionaron por CT muestras obtenidas de probetas dañadas por EM para energías equivalentes

DAÑO LVI VS EM (INSPECCIÓN POR CT)

48



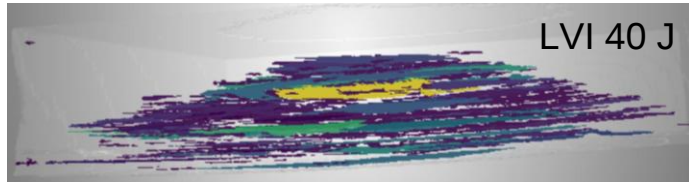
- No se observa rotura de fibras en las muestras dañadas por EM

DAÑO LVI VS EM (INSPECCIÓN POR CT)

49

La tomografía confirma los resultados de la inspección por ultrasonidos

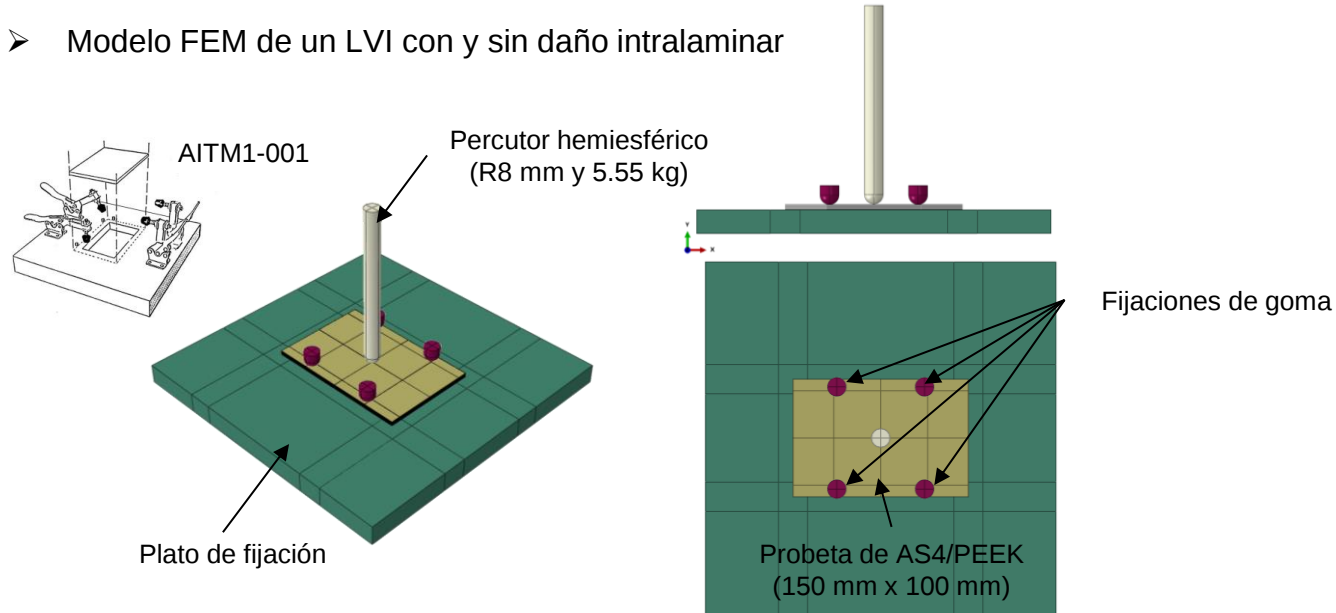
- No hay rotura de fibras en muestras dañadas por EM
- Tanto para LVI como para EM → Patrón cónico de daño



- Se ha desarrollado una nueva metodología, basada en corrientes EM, para producir daños de tipo LVI en laminados AS4/PEEK. Como resultado:
 - La **rotura de fibras** no afecta a la resistencia CAI, pero sí a la rigidez transversal residual.
 - La **delaminación** es el principal mecanismo de fallo que rige la resistencia del CAI. Parece que la resistencia del CAI se rige por la resistencia al pandeo de las sublaminas, formadas debido a la **delaminación**.
 - La **huella de indentación** no afecta a la resistencia del CAI, al menos para la gama de energías de impacto probadas.
- Trabajos en curso:
 - El **agrietamiento de la matriz** no afecta directamente a la resistencia del CAI, pero su **efecto sobre** el desencadenamiento de **la delaminación** en un LVI aún no está claro.
 - La **rotura de fibras** no tiene influencia en la resistencia de CAI, pero su **efecto sobre la delaminación** en un LVI no está claro.

MATRIX CRACKING, ROTURA DE FIBRAS Y DELAMINACIÓN 51

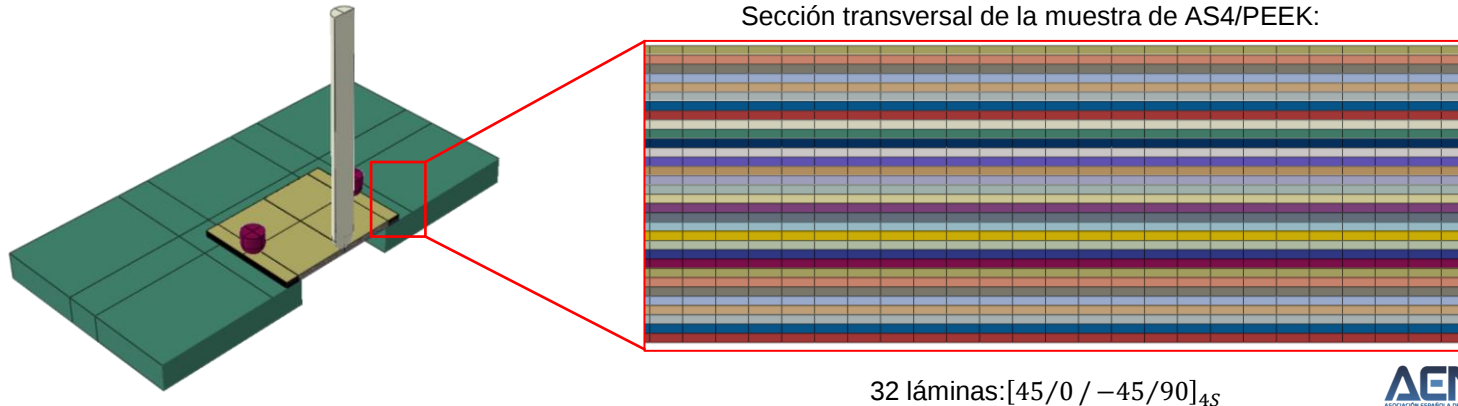
- Modelo FEM de un LVI con y sin daño intralaminar



MODELO FEM ELÁSTICO

52

- Modelo realizado en Abaqus Explicit
- Laminado simplemente apoyado. Las 32 láminas de AS4/PEEK modelizadas individualmente.
- Velocidad del percutor ajustada para 30 J, 40 J y 50 J
- Plato de fijación → desplazamientos (x,y,z) bloqueados
- Fijaciones de goma → desplazamiento vertical (y) bloqueado



MODELO FEM ELÁSTICO (MATERIALES)

53

- Percutor y placa de fijación de acero, modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Fijaciones de goma modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Cada **lámina de AS4/PEEK** modelada como sólido **elástico lineal transversalmente isótropo**

Acero

E	ν	ρ
200 GPa	0.35	7850 kg/m ³

Goma

E	ν	ρ
2.5 GPa	0.4	1000 kg/m ³

AS4/PEEK [8]

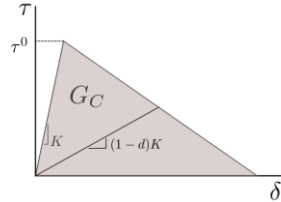
E_{11}	$E_{22} = E_{33}$	$G_{12} = G_{13}$	G_{23}	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}	ρ
122.7 GPa	10.1 GPa	5.5 GPa	3.7 GPa	0.25	0.45	1320 kg/m ³

MODELO FEM ELÁSTICO (MATERIALES)

54

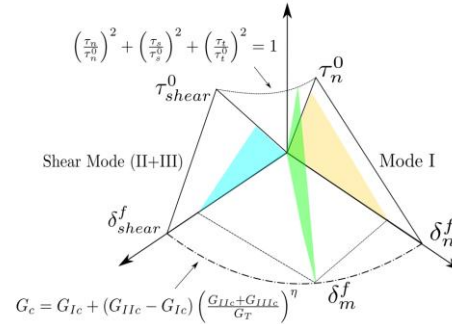
- Percutor y placa de fijación de acero, modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Fijaciones de goma modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Cada **lámina de AS4/PEEK** modelada como sólido **elástico lineal transversalmente isótropo**
- Comportamiento interlaminar modelado como **interacción cohesiva**:

Ley tracción-separación:



Evolución lineal del daño controlado por la energía de fractura interlaminar (G_{IC} , G_{IIC} y G_{IIIC})

Criterio de inicio de daño cuadrático



Modo mixto: Benzeggagh-Kenane.

Resistencia interlaminar (iniciación) [8]

N	S	T	K
80 MPa	100 MPa	100 MPa	10^6 N/mm^3

Energía de fractura (propagación) [8]

G_{IC}	$G_{IIC} = G_{IIIC}$	η
0.969 kJ/m ²	1.719 kJ/m ²	2.284

MODELO FEM ELÁSTICO (MATERIALES)

55

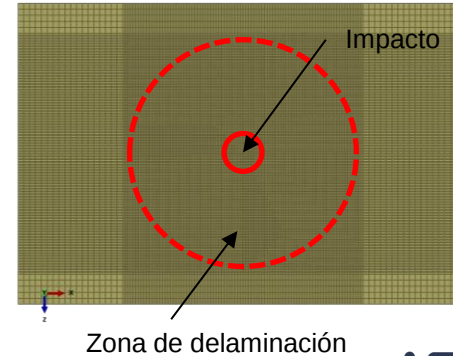
- Percutor y placa de fijación de acero, modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Fijaciones de goma modelados como sólidos elásticos, lineales e isótropos
- Cada **lámina de AS4/PEEK** modelada como sólido **elástico lineal transversalmente isótropo**
- Comportamiento interlaminar modelado como **interacción cohesiva**:

Longitud cohesiva [8] :

$$l_{CZ} = \frac{E_{22} G_{IC}}{N^2} \approx 1.53 \text{ mm}$$

$$l_{CZ} = \frac{G_{12} G_{IIC}}{S^2} \approx 0.95 \text{ mm}$$

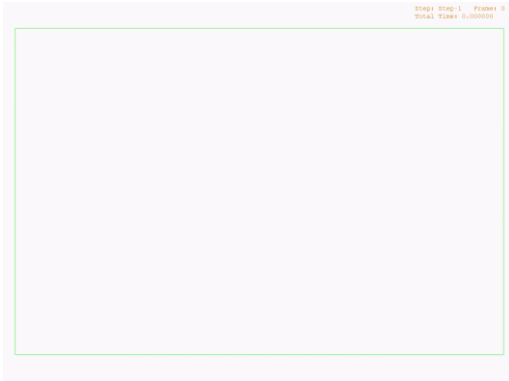
→ Tamaño de malla: 0.25 mm



RESULTADOS FEM ELÁSTICO (DELAMINACIÓN)

56

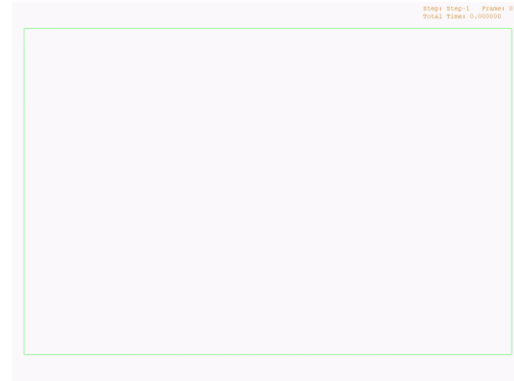
Energía de impacto 30J



Energía de impacto 40J



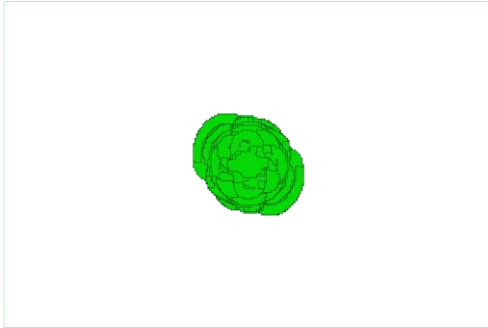
Energía de impacto 50J



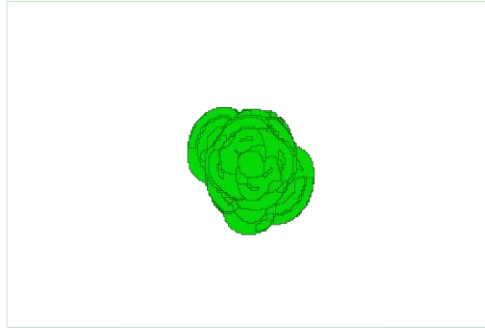
RESULTADOS FEM ELÁSTICO (DELAMINACIÓN)

57

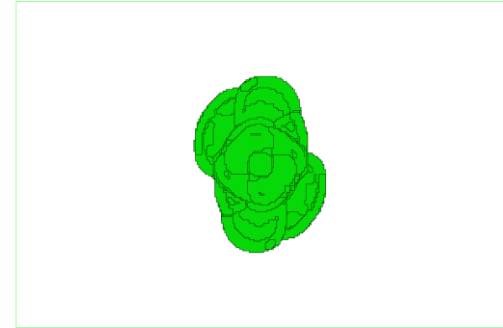
Energía de impacto 30J



Energía de impacto 40J



Energía de impacto 50J



- El área delaminada crece al aumentar la energía de impacto
- La delaminación es progresiva (sin saltos bruscos)
- La delaminación se reparte entre múltiples capas

MODELO FEM CON DAÑO INTRALAMINAR (HASHIN)

58

- Ampliamos el modelo elástico añadiendo daño intralaminar (criterio de HASHIN)
- AS4/PEEK: elementos sólidos (C3D8R) → Continuum Shell (SC8R)
- Subrutina VUSDFLD para eliminar elementos dañados

Resistencia intralaminar (iniciación) [9]

X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_L	S_T
2100 MPa	1050 MPa	80 MPa	250 MPa	100 MPa	100 MPa

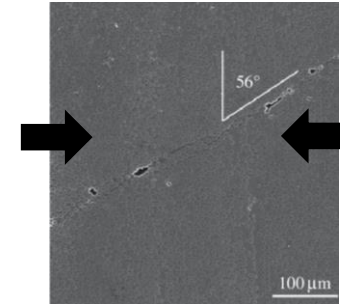
Energía de fractura (propagación) [10]

G_{1+}	G_{1-}	$G_{2+} = G_{IC}$	$G_{2-} = \frac{G_6}{\cos(\alpha_0)}$	$G_6 = G_{IIC}$
100 kJ/m ²	50 kJ/m ²	0.969 kJ/m ²	3.07 kJ/m ²	1.719 kJ/m ²

```

1  subroutine vusdfld(
2  c Read only -
3  * nblock, nstatev, nfieldv, nprops, ndir, nshr,
4  * jElem, kintPt, kLayer, kSecPt,
5  * stepTime, totalTime, dt, curname,
6  * coordMp, direct, T, charLength, props,
7  * stateOld,
8  c Write only -
9  * stateNew, field)
10 c
11  include 'vaba_param.inc'
12 c

```



De [11]

[9] Totry, E. et al. (2008). Prediction of the failure locus of C/PEEK composites under transverse compression and longitudinal shear *Composites Science and Technology*, 68(15–16), 3128–3136.

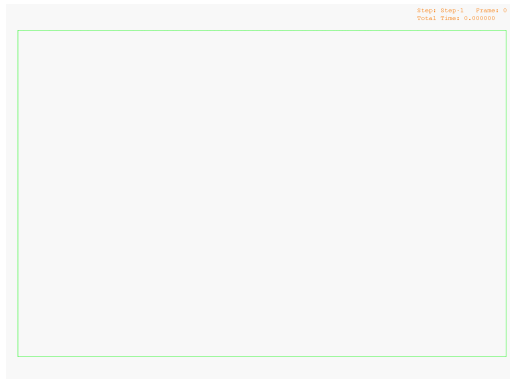
[10] Haldar, S. et al. (2019). Relations between intralaminar micromechanisms and translaminar fracture behavior of unidirectional FRP *Composites Part B: Engineering*, 174, 107000.

[11] González, C, et al. (2007). Mechanical behavior of unidirectional fiber-reinforced polymers under transverse compression: Microscopic mechanisms *Composites Science and Technology*, 67(13), 2795–2806.

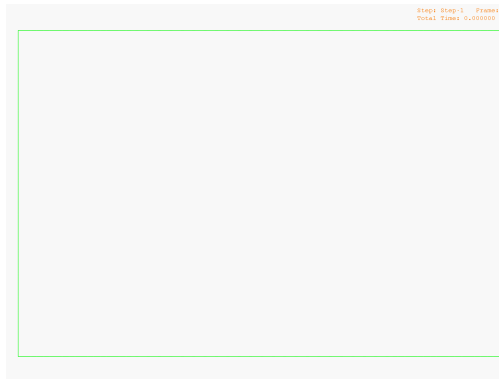
RESULTADOS FEM HASHIN (DELAMINACIÓN)

59

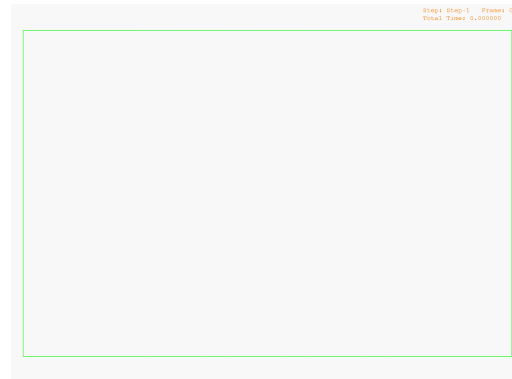
Energía de impacto 30J



Energía de impacto 40J



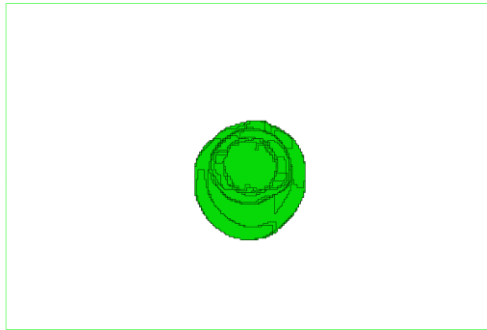
Energía de impacto 50J



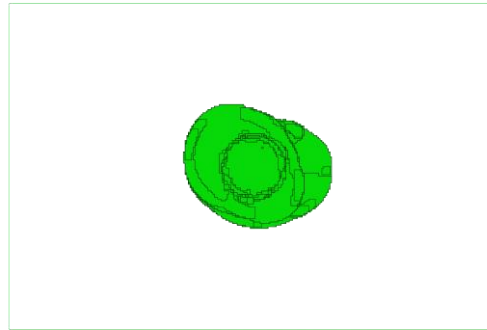
RESULTADOS FEM HASHIN (DELAMINACIÓN)

60

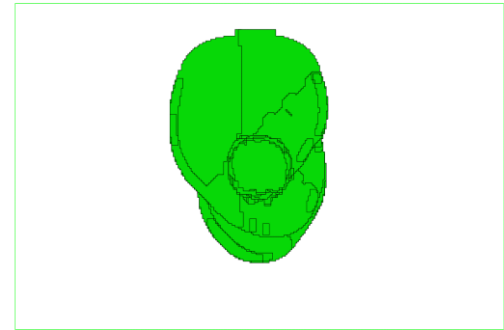
Energía de impacto 30J



Energía de impacto 40J



Energía de impacto 50J



- El área delaminada crece de manera menos progresiva y homogénea que en el caso elástico
- El área delaminada es mayor que en el caso elástico

El daño de fibra y/o de matriz afectan al patrón y a la evolución de la delaminación

RESULTADOS HASHIN (30 J)

61

CSDMG



t=0.0019 s

DAMAGEFT



t=0.0019 s

DAMAGEMT



t=0.0019 s

CSDMG



t=0.002 s

DAMAGEFT



t=0.002 s

DAMAGEMT



t=0.002 s

RESULTADOS HASHIN (40 J)

62

CSDMG



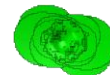
t=0.0016 s

DAMGEFT



t=0.0016 s

DAMGEMT



t=0.0016 s

CSDMG



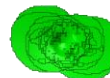
t=0.0017 s

DAMGEFT



t=0.0017 s

DAMGEMT



t=0.0017 s

RESULTADOS HASHIN (40 J)

63

CSDMG



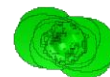
t=0.0016 s

DAMGEFT



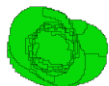
t=0.0016 s

DAMGEMT



t=0.0016 s

CSDMG



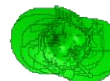
t=0.0018 s

DAMGEFT



t=0.0018 s

DAMGEMT



t=0.0018 s

RESULTADOS HASHIN (50 J)

64

CSDMG



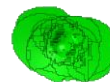
t=0.0014 s

DAMGEFT



t=0.0014 s

DAMGEMT



t=0.0014 s

CSDMG



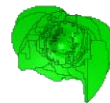
t=0.0015 s

DAMGEFT



t=0.0015 s

DAMGEMT



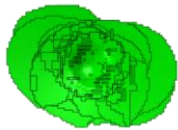
t=0.0015 s

RESULTADOS HASHIN (50 J)

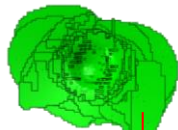
65

Matrix cracking marca el camino de la delaminación

DAMGEMT



t=0.0014 s



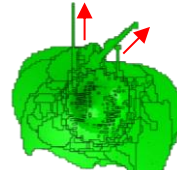
t=0.0015 s



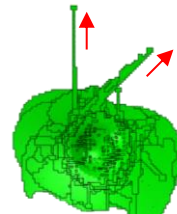
t=0.0016 s



t=0.0017 s



t=0.0018 s

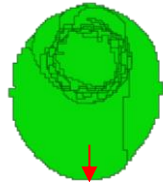


t=0.0019 s

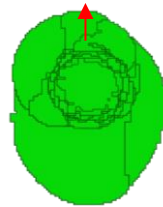
CSDMG



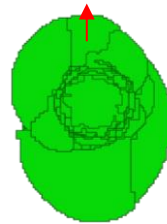
t=0.0014 s



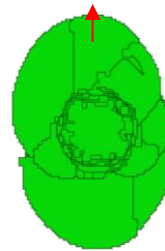
t=0.0015 s



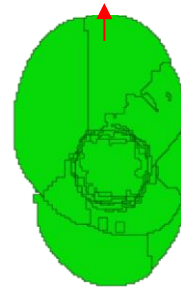
t=0.0016 s



t=0.0017 s



t=0.0018 s

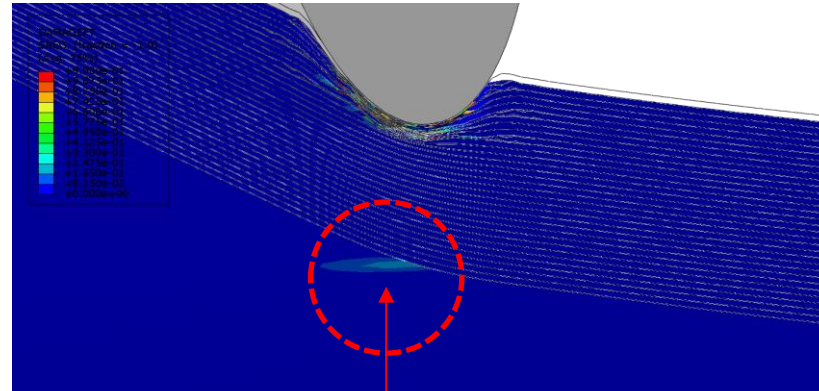


t=0.0019 s

ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (30 J)

66

- 30 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0019$ s y $t=0.002$ s

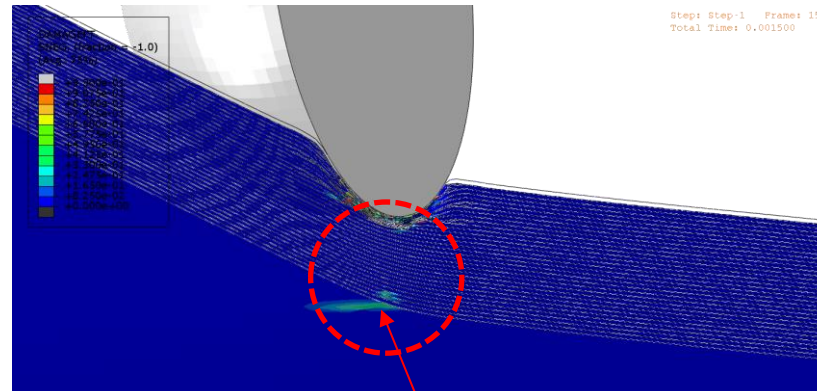


El daño de fibra en la cara inferior aparece para $t = 0.0018$ s

ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (40 J)

67

- 40 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0016$ s y $t=0.0017$ s

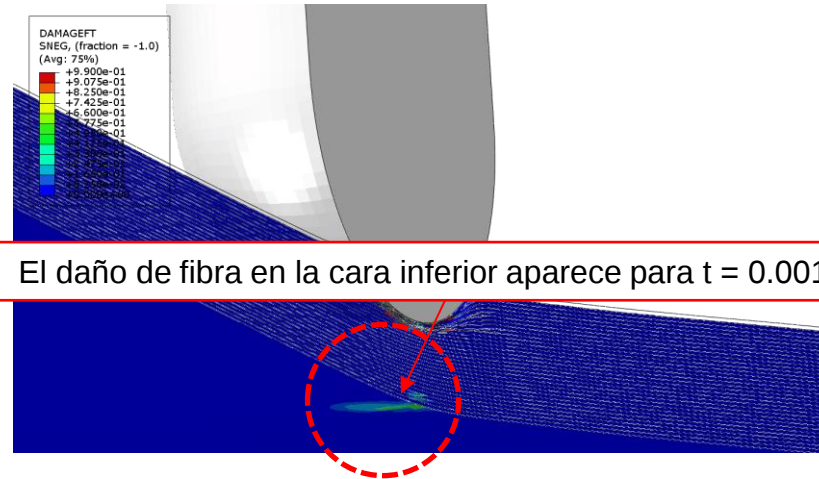


El daño de fibra en la cara inferior aparece para $t = 0.0015$ s

ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (50 J)

68

- 50 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0014$ s y $t=0.0015$ s

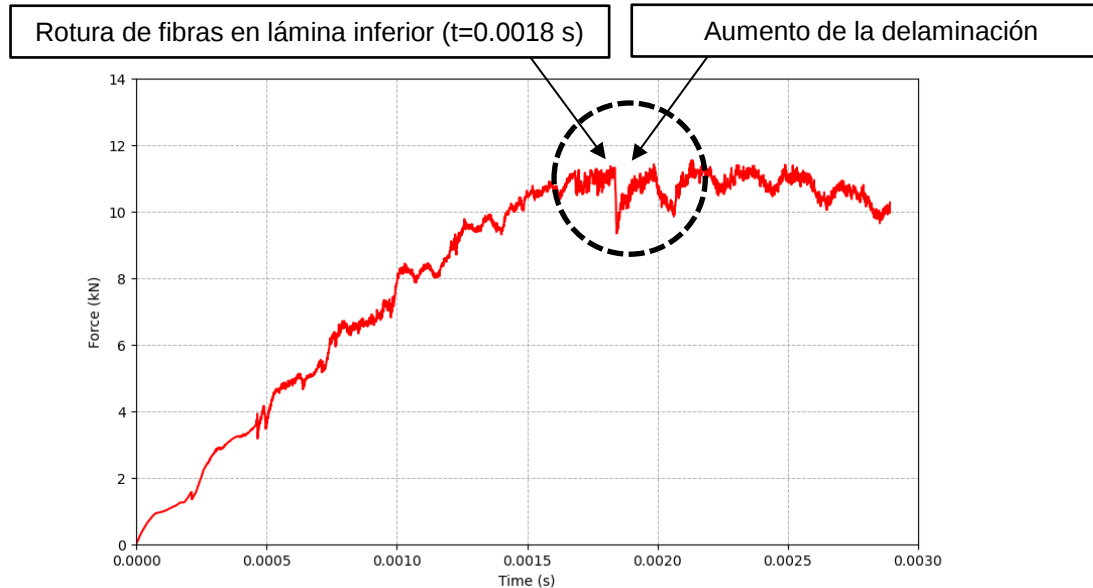


- La rotura de fibras de la lámina inferior → aumento del matrix cracking
- Aumento del matrix cracking → aumento brusco de la delaminación

ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (30 J)

69

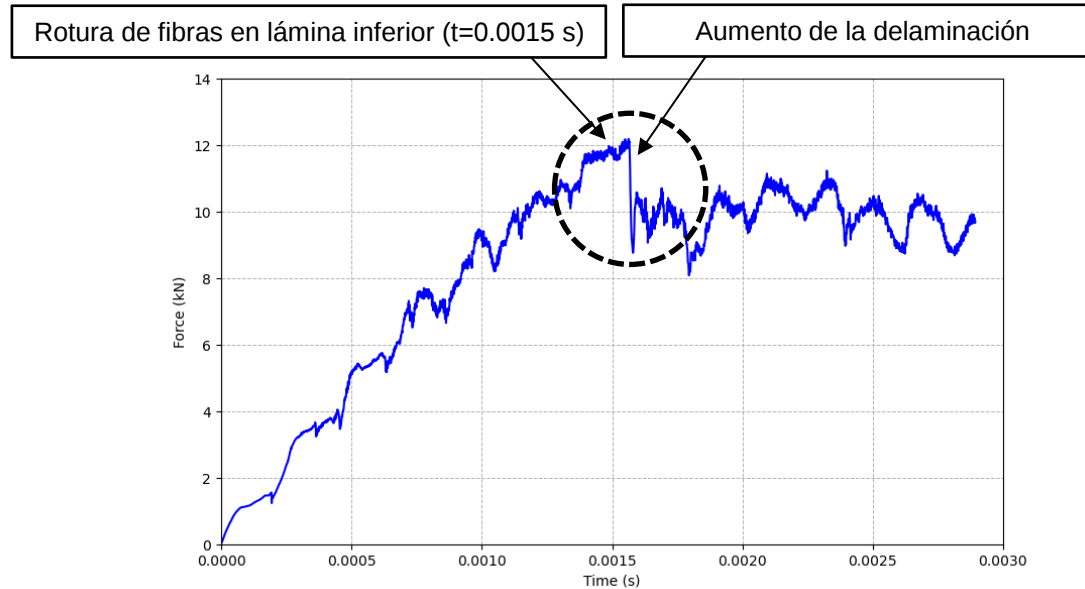
- 30 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0019$ s y $t=0.002$ s



ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (40 J)

70

- 40 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0016$ s y $t=0.0017$ s



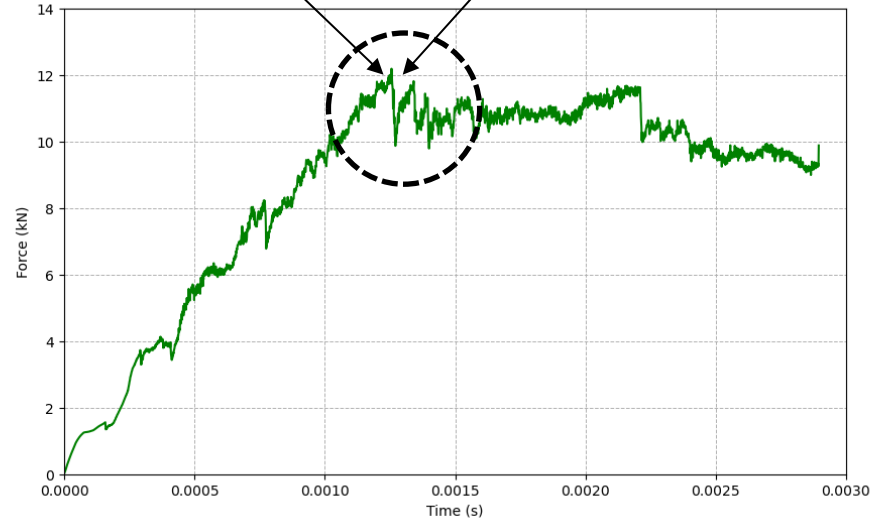
ROTURA DE FIBRAS EN CARA INFERIOR (50 J)

71

- 50 J: aumento brusco de la delaminación entre $t=0.0019$ s y $t=0.002$ s

Rotura de fibras en lámina inferior ($t=0.0013$ s)

Aumento de la delaminación



HASHIN (FUERTE) vs HASHIN (DÉBIL)

72

Resistencia intralaminar (iniciación):

X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_L	S_T	
2100 MPa	1050 MPa	80 MPa	250 MPa	100 MPa	100 MPa	→ Matriz fuerte
2100 MPa	1050 MPa	40 MPa	200 MPa	50 MPa	50 MPa	→ Matriz Débil

Energía de fractura (propagación):

G_{1+}	G_{1-}	$G_{2+} = G_{IC}$	$G_{2-} = \frac{G_6}{\cos(\alpha_0)}$	$G_6 = G_{IIC}$	
100 kJ/m ²	50 kJ/m ²	0.969 kJ/m ²	3.07 kJ/m ²	1.719 kJ/m ²	→ Matriz fuerte
100 kJ/m ²	50 kJ/m ²	0.969 kJ/m ²	3.07 kJ/m ²	1.719 kJ/m ²	→ Matriz Débil

HASHIN (FUERTE) vs HASHIN (DÉBIL)

73

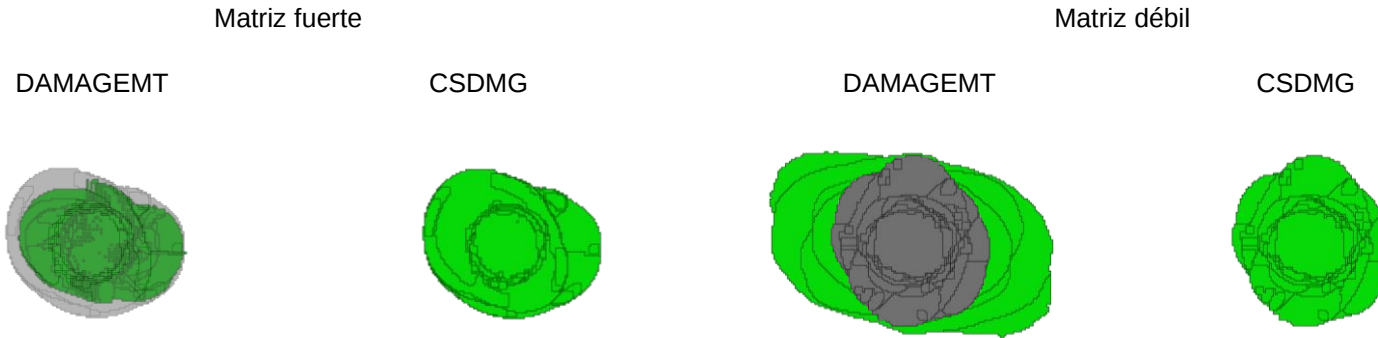
Matriz fuerte

Matriz débil

Stage 00001 - Frame 0 Total Time 0.000000	Stage 00001 - Frame 0 Total Time 0.000000	Stage 00001 - Frame 0 Total Time 0.000000	Stage 00001 - Frame 0 Total Time 0.000000
DAMAGEMT	CSDMG	DAMAGEMT	CSDMG

HASHIN (FUERTE) vs HASHIN (DÉBIL)

74



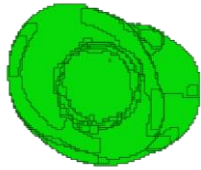
- El área afectada por matrix cracking es mayor en el material con la matriz débil, lo que ayuda a facilitar el crecimiento progresivo de la delaminación.
- La delaminación crece siempre dentro del área dañada por matrix cracking (**matriz débil**)

HASHIN (FUERTE) vs HASHIN (DÉBIL)

75

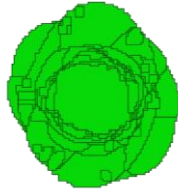
- La evolución de la delaminación para la matriz débil es más progresiva y homogénea
- El área delaminada es prácticamente la misma → Delaminación no depende de la resistencia

Matriz fuerte



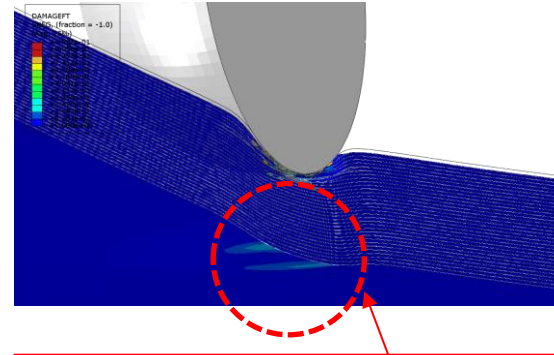
Área = 1338 mm²

Matriz débil



Área = 1330 mm²

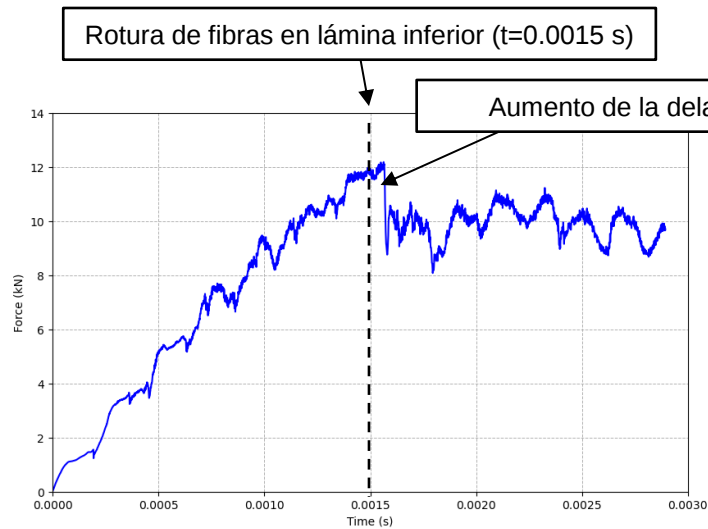
¿Energía de fractura controla
propagación de la delaminación?



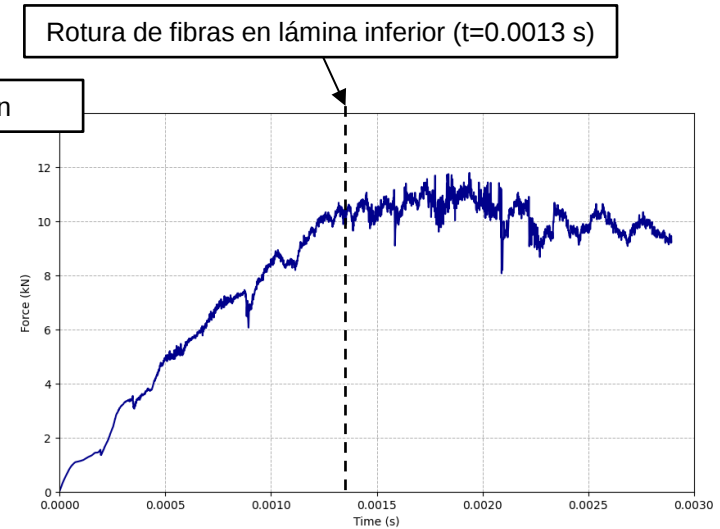
El daño de fibra en la cara inferior aparece antes
con la **matriz débil** (t = 0.0013 s vs t = 0.0015 s)

HASHIN (FUERTE) vs HASHIN (DÉBIL)

76



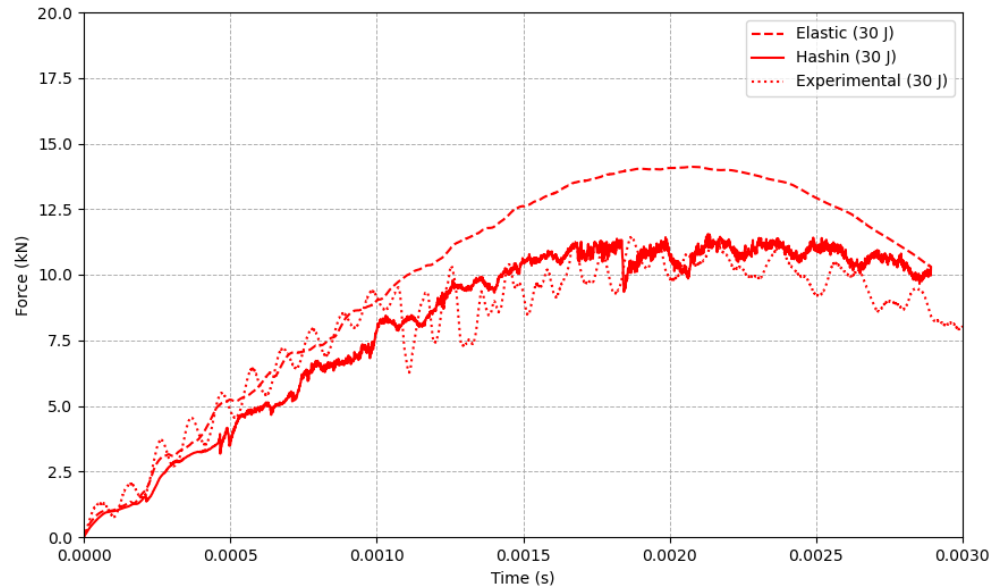
Matriz fuerte



Matriz débil

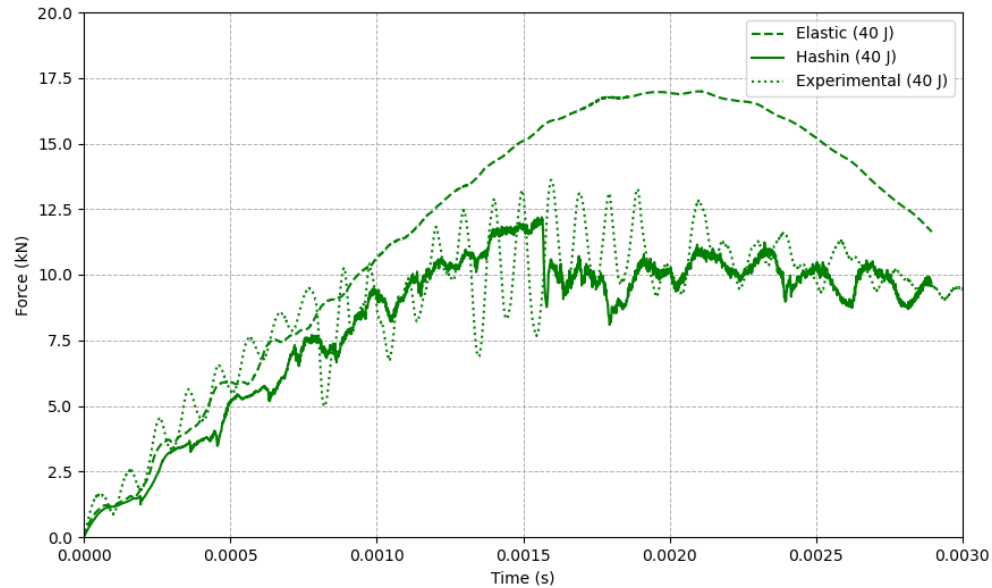
ELASTICO vs HASHIN vs EXPERIMENTAL

77



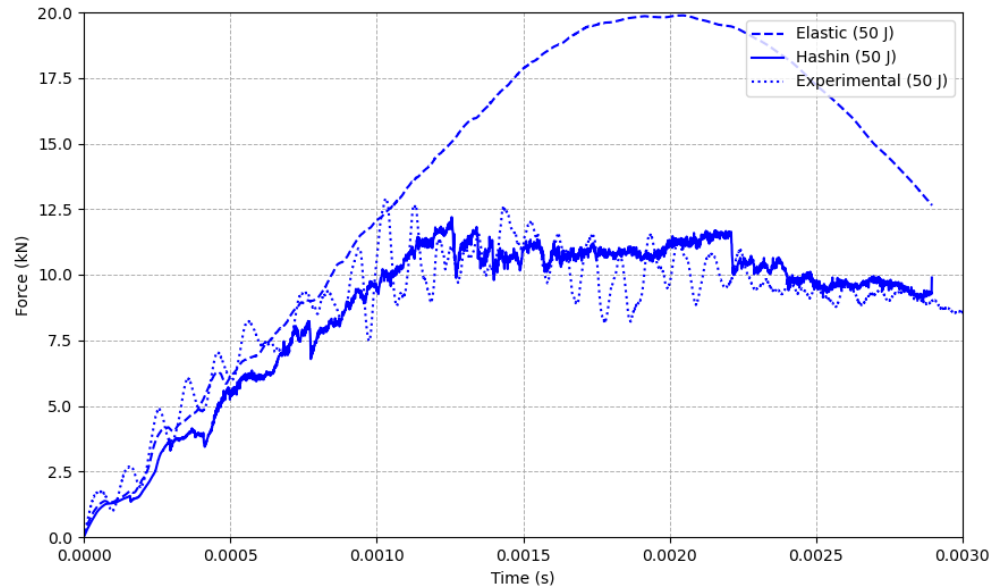
ELASTICO vs HASHIN vs EXPERIMENTAL

78



ELASTICO vs HASHIN vs EXPERIMENTAL

79



- El **daño intralaminar** (rotura de fibra y matriz) claramente juega un papel en el patrón y en la evolución de la **delaminación** durante un impacto de baja velocidad.
- La **rotura de fibras** de las láminas inferiores provoca un aumento repentino del **matrix cracking**, el cual lleva asociado un incremento del **área delaminada**.
- La rotura de fibras de las láminas inferiores limita la carga durante el LVI.
- Una fuerte reducción de las resistencias de láminas asociadas a la matriz no afecta a la extensión del área delaminada mientras se conserve la tenacidad → La **tenacidad a fractura** gobierna la **delaminación**.

- Trabajos futuros:
 - Validación experimental de la secuencia de daño durante un LVI → Sychrotron (ESRF)
 - Nuevos análisis paramétricos para determinar la importancia de la tenacidad de los diferentes mecanismos de daño.



Contents lists available at ScienceDirect

Composite Structures

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compstruct

Experimental study of the importance of fiber breakage on the strength of thermoplastic matrix composites subjected to compression after impact

F. Naya^a, J. Pernas-Sánchez^{a,*}, C. Fernández^b, P. Zumel^b, M. Drożdźiel-Jurkiewicz^c, J. Bieniaś^c

^a Department of Continuum Mechanics and Structural Analysis, University Carlos III of Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

^b Electronic Technology Department, University Carlos III of Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

^c Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland

Naya, F., Pernas-Sánchez, J., Fernández, C., Zumel, P., Drożdźiel-Jurkiewicz, M., & Bieniaś, J. (2024). Experimental study of the importance of fiber breakage on the strength of thermoplastic matrix composites subjected to compression after impact. *Composite Structures*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118238>

Estudio experimental del papel de la rotura de fibras en la resistencia de los compuestos de matriz termoplástica sometidos a compresión tras impacto

uc3m

MUCHAS GRACIAS

AEMAC
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE MATERIALES COMPUESTOS



LUBLIN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING



**Ayuda Ramón y Cajal
(RYC2022-037771-I)**



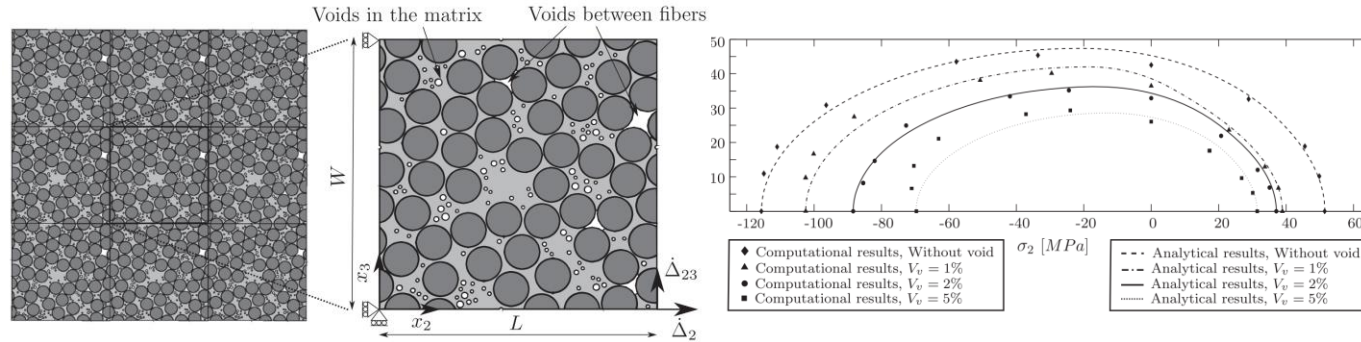
@Dynamics_uc3m

<http://www.dynamicsuc3m.com/>

CONDICIONES DE FABRICACIÓN (POROSIDAD)

83

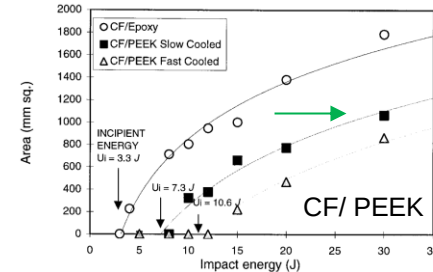
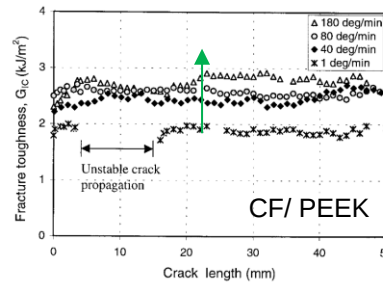
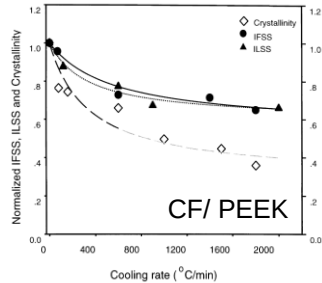
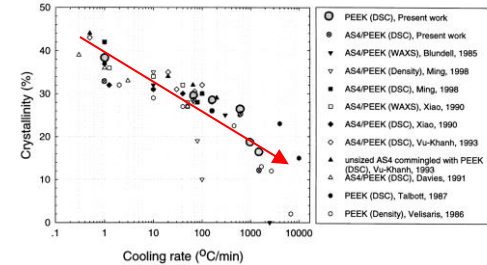
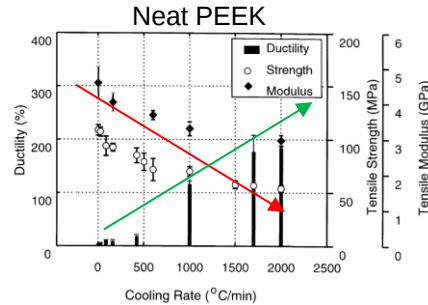
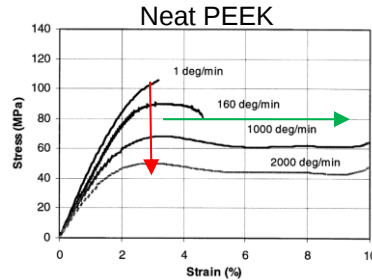
- Influencia de la porosidad en la envolvente de fallo ($\sigma_{22}-\tau_{23}$) [12]:



- La presencia de poros reduce la resistencia del material compuesto en la dirección transversal.
- Niveles de porosidad superiores al 2%, son considerados inaceptables por la industria aeroespacial

CONDICIONES DE FABRICACIÓN (ENFRIAMIENTO)

84

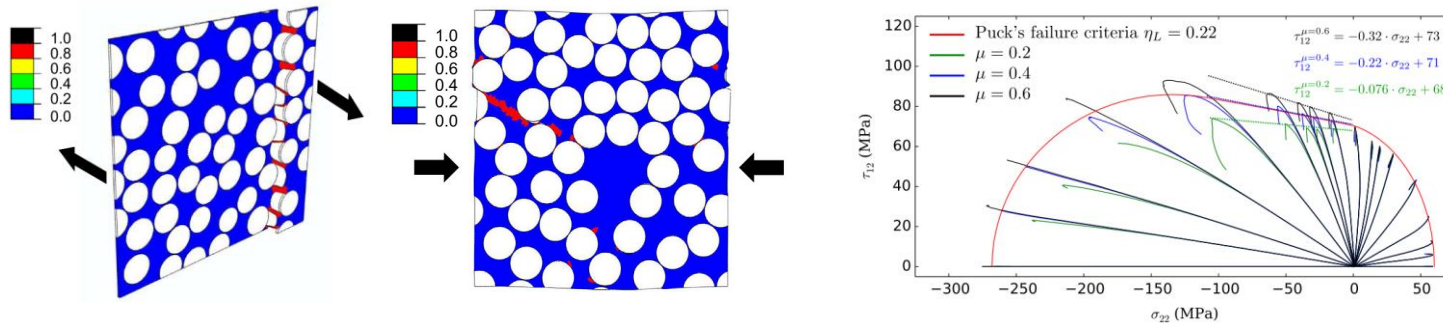


➤ Aumentando $\frac{dT}{dt}$ aumento la tenacidad → Mejor resistencia a impacto

FRICCIÓN FIBRA MATRIZ EN CFRP

85

- Influencia del rozamiento fibra/matriz en la envolvente de fallo ($\sigma_{22}-\tau_{12}$) [15]:



- El coeficiente de fricción se obtuvo a partir de simulaciones micromecánicas de la envolvente de fallo, ajustando el resultado a un criterio de Puck [16].

**MUCHAS
GRACIAS**

