

Bienvenid@s

WEBINAR



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



CIMNE

International Center
for Numerical Methods in Engineering

#WebinarsAEMAC



Dr. XAVIER MARTINEZ
Profesor de la UPC
Investigador en CIMNE
xmartinez@cimne.upc.edu

ANALISIS MULTIESCALA NO-LINEAL.

Propuestas para un cálculo eficiente con el que
simular componentes estructurales

X. Martinez, S. Oller, F. Otero, S. Zaghi

15 de Enero de 2018, 16:00 h (Madrid, GMT+2)

ANÁLISIS MULTIESCALA NONEAL.

Propuestas para un cálculo eficiente con el que simular componentes estructurales



CONTENIDOS

- Necesidad de los análisis multiescala
- Posibles métodos con los que realizar análisis multiescala no-lineales
- Estrategia no-lineal (F. Otero, 2016)
- Base de datos constitutiva multiescala (S. Zaghi 2018)
- Conclusiones

1.

NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



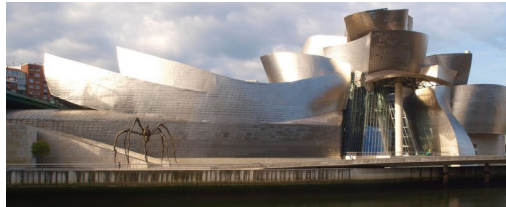
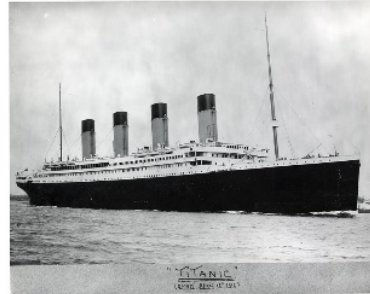
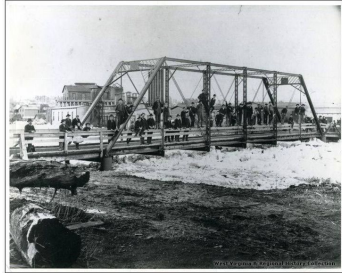
CIMNE

International Center
for Numerical Methods in Engineering

NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

Evolución del análisis estructural:

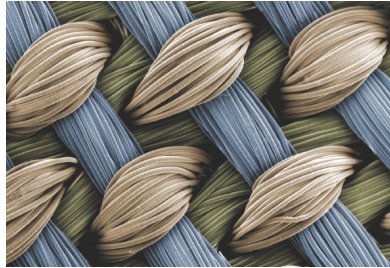
La incorporación de herramientas numéricas en el análisis estructural ha permitido mejorar y aumentar la complejidad de las estructuras en la ingeniería.



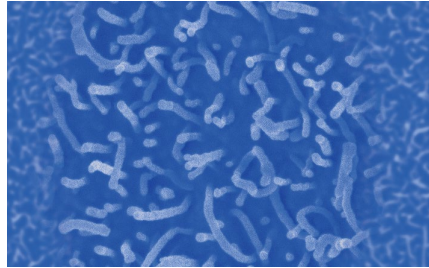
NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

Esta misma evolución se ha dado en los materiales:

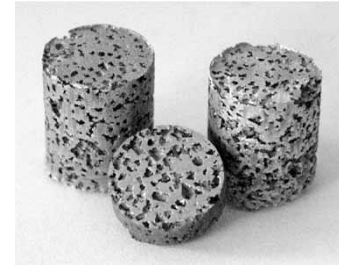
La complejidad de las estructuras internas que tienen los materiales hoy en día hace necesario mejorar las herramientas de simulación, para poder obtener una buena predicción de su comportamiento.



I-Chien Liao *et al.* (2013)



Hayashida, K. and Tanaka, H. (2012)



Michailidis *et al.* (2012)

Esto es especialmente significativo cuando el análisis se quiere realizar en el campo no lineal.

NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

En la simulación de materiales compuestos, muchas veces éstos se asimilan a materiales ortótropos con propiedades heredadas de sus constituyentes (o proporcionadas por el fabricante).

El fallo del material se predice a partir de criterios de comparación tales como el de máximas tensiones, máximas deformaciones, Tsai-Hill, **Tsai-Wu**, etc.

$$f_1(\sigma_1) + f_2(\sigma_2) + f_{11}(\sigma_1)^2 + f_{22}(\sigma_2)^2 + 2f_{12}(\sigma_1\sigma_2) + f_3(\tau_{12})^2 = 1$$

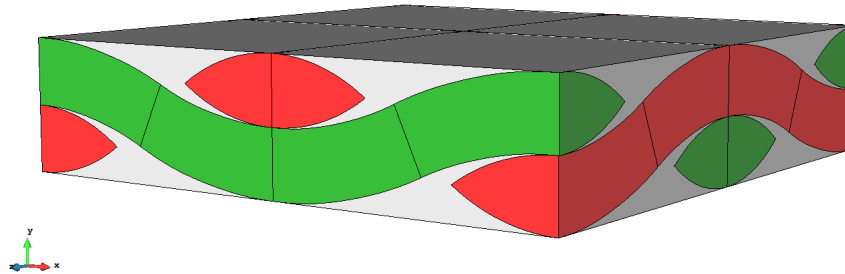
$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} & f_2 &= \frac{2}{F_{2t}} - \frac{2}{F_{2c}} & f_{12} &= -\frac{1}{2F_{1t}^2} \\ f_{11} &= \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} & f_{22} &= \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} & f_3 &= \frac{1}{F_{12}^2} \end{aligned}$$

No obstante, mediante estos procedimientos no es posible obtener el comportamiento no lineal del compuesto. Ni tampoco caracterizar compuestos con una estructura interna compleja.

NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

Existen también modelos específicos que permiten calcular algunos modos de fallo tales como rotura transversal de la matriz, pandeo de fibras, delaminación, etc.

No obstante, para obtener una predicción ajustada del comportamiento del material, es necesario tratarlo como lo que es: una **micro-estructura con distintos componentes interactuando entre ellos**.

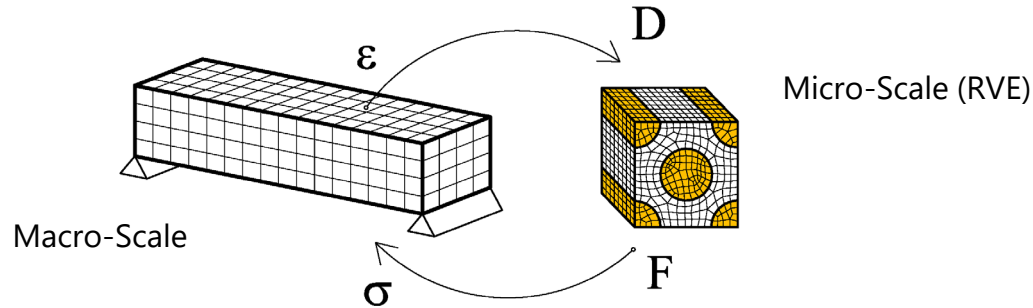


Esto se puede hacer mediante un método multiescala.

NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

Un método multiescala consiste en la obtención del comportamiento del material que compone la macro-estructura, a partir de la resolución de un micro-modelo en el que se define ese material.

El micro-modelo se define mediante lo que se conoce como un Volumen Elemental Representativo (Representative Volume Element - RVE)

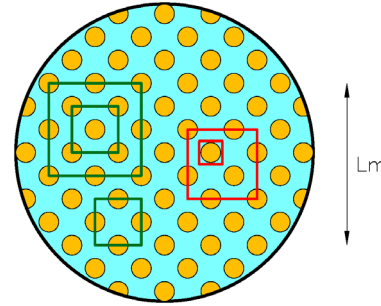
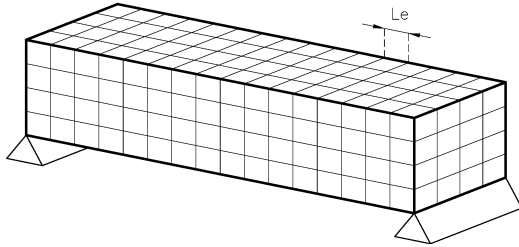


NECESIDAD DE LOS ANÁLISIS MULTIESCALA

Condiciones que se deben verificar para aplicar un método multiescala:

Para poder aplicar correctamente un método multiescala se deben verificar dos condiciones:

1. Periodicidad del RVE definido
2. Separación de escalas ($L_m \ll L_e$)



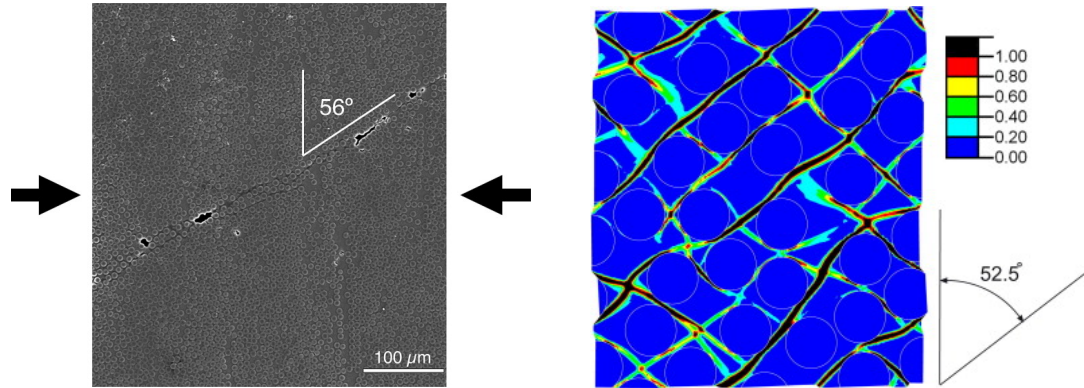
There are several studies concerning the most representative size of the RVE, such as:

S.M. Mirkhalaf, F.M. Andrade Pires, Ricardo Simoes:
Determination of the size of the Representative Volume Element (RVE) for the simulation of heterogeneous polymers at finite strains. Finite Elements in Analysis and Design (119), 2016

En la publicación **Otero et al 2018** se describe la teoría asociada a los métodos multiescala y su implementación en un código de elementos finitos.

ANÁLISIS MULTIESCALA EN RÉGIMEN NO LINEAL

Si un método multiescala se utiliza para obtener el comportamiento no lineal del material: **La condición de periodicidad del RVE se pierde en cuanto se inicia el daño.**



C. Gonzalez, J. Llorca, *Composites Science and Technology* DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.02.001

ANÁLISIS MULTIESCALA EN RÉGIMEN NO LINEAL

En esta situación, se deberían reformular las condiciones de borde que se aplican sobre el RVE ya que las de periodicidad no tienen por que ser válidas.

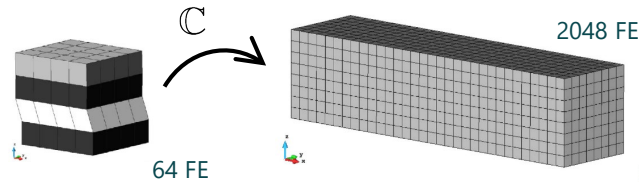
En el trabajo que presentamos esto no se hará. Los resultados del RVE se toman como los resultados que proporciona una ecuación constitutiva y nuestro interés se centra en el inicio del daño y la rigidez del material una vez este daño se ha dado.

Al hacer esta consideración, estamos cometiendo un error. No obstante, éste es mucho menor que el error que se comete si no se tiene ningún modelo con el que analizar el material.

COSTE COMPUTACIONAL DE UN ANÁLISIS MULTIESCALA NO LINEAL

En condiciones elásticas, el comportamiento del material no varía durante el análisis. Luego, el cálculo de la matriz de rigidez asociada al RVE es suficiente para realizar todo el análisis.

En una simulación no lineal, la matriz de rigidez se debe ir actualizando a medida que daña/plastifica el material. Esto eleva enormemente el coste computacional de la simulación.



[*]	196,608 FE		
	Micro-model	Multiscale linear	Multiscale FE2
CPU Time [mm:ss]	8:44	0:03	9:31
Memory [Mb]	2690.0	7.5	7.5
Reaction force	236.1	224.7	224.7

[*] F. Otero et al. *Computers and Structures*. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.11.041

Para ser competitivos, los métodos multiscale necesitan estrategias con las que minimizar su coste computacional.

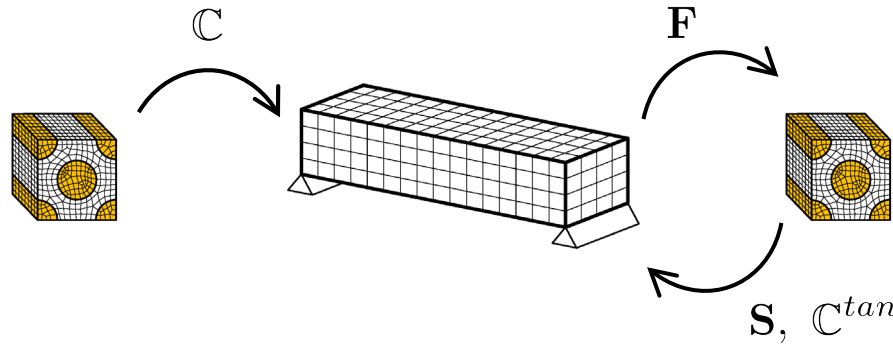
2.

POSIBLES MÉTODOS CON LOS QUE REALIZAR ANÁLISIS MULTIESCALA NO-LINEALES



MÉTODO 1: MULTIESCALA COMPLETO (FE2)

Un método multiescala completo (también llamado FE2) consiste en utilizar el RVE como una ecuación constitutiva, sin aplicar ninguna estrategia con la que minimizar el número de veces que se resuelve: El RVE se resuelve para cada punto de gauss, en cada paso de carga.

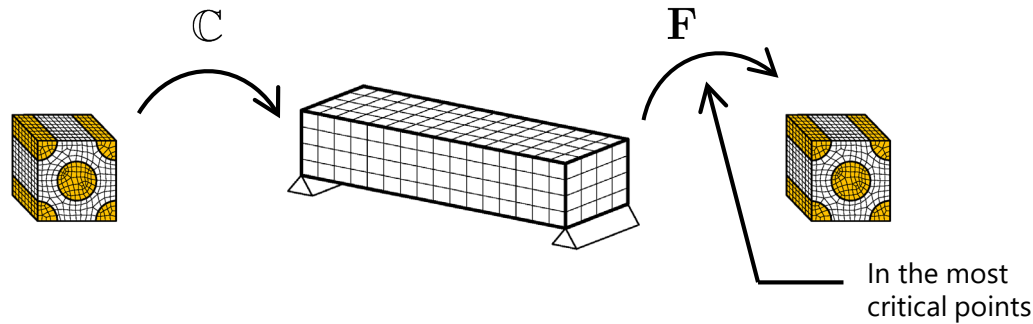


Ventaja: Es el método que proporciona mayor exactitud

Inconveniente: El coste computacional es enorme

MÉTODO 2: SIMULACIÓN HASTA CARGA CRÍTICA

Este método consiste en simular la macro-estructura en régimen lineal. Una vez finalizada la simulación, se estudian los RVE correspondientes a los puntos de Gauss con mayor tensión para obtener la carga bajo la que se pierde el comportamiento lineal.

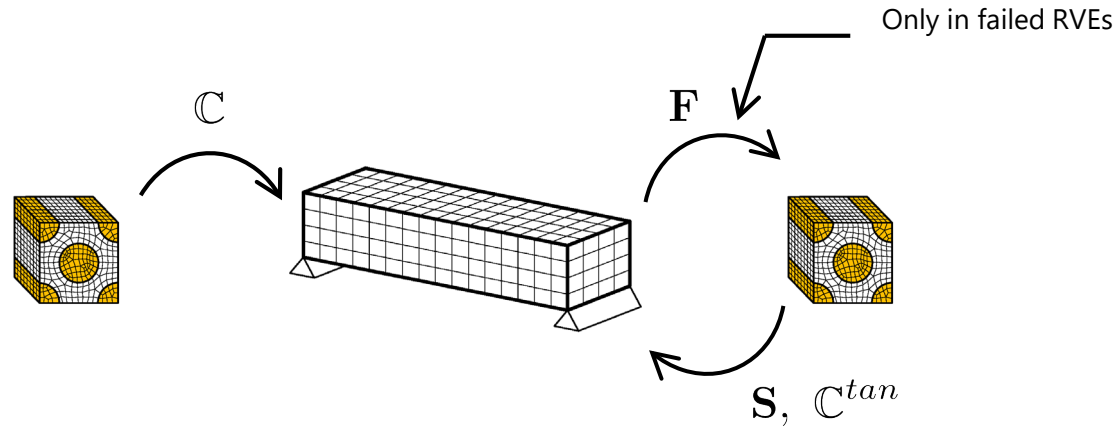


Ventaja: Con un coste computacional asumible, es posible conocer si la estructura rompe y el factor de seguridad bajo las cargas aplicadas.

Inconveniente: Es muy difícil saber con seguridad el punto de gauss que puede conducir a la rotura del compuesto

MÉTODO 3: ESTRATEGIA NO-LINEAL (F. OTERO *ET AL* 2016)

Se ha desarrollado una estrategia que permite conocer los RVE que están cercanos al fallo. Únicamente se analizarán estos.

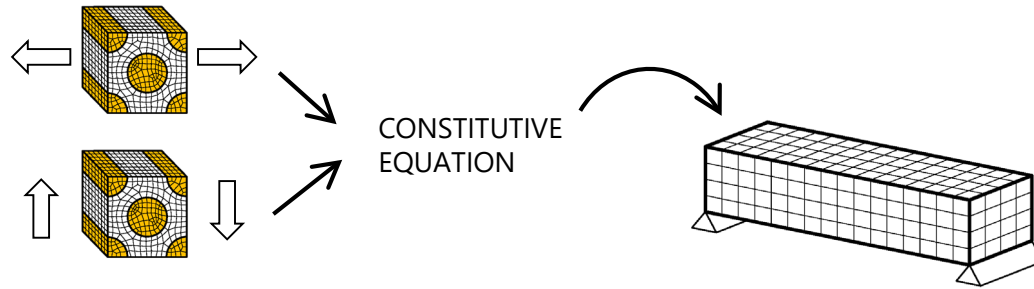


Ventaja: Se reduce enormemente el coste computacional comparado con un procedimiento FE2 ya que son muy pocos los elementos que rompen.

Inconveniente: Es un método que sigue siendo caro, especialmente cuando empieza el comportamiento no lineal

MÉTODO 4: BASE DE DATOS CONSTITUTIVA MULTIESCALA (S. ZAGHI *ET AL* 2016)

El RVE se utiliza como una probeta experimental. Se analiza numéricamente para definir una ecuación constitutiva en forma de base de datos. Ésta base de datos se puede utilizar posteriormente en cualquier macro-modelo.



Ventaja: El coste computacional del análisis macro es mínimo. Una vez analizado un RVE, no es necesario volverlo a analizar en futuras simulaciones.

Inconveniente: El coste de generar la base de datos constitutiva multiescala de un material dado es muy elevado.

3.

ESTRATEGIA NO-LINEAL (F. OTERO *ET AL* 2016)



ESTRATEGIA NO-LINEAL

El objetivo de la estrategia no lineal (Non Linear Strategy, NLS) es reducir el coste computacional de un análisis no-lineal material de grandes estructuras mediante métodos multiescala.

La NLS se compone de dos procedimientos distintos:

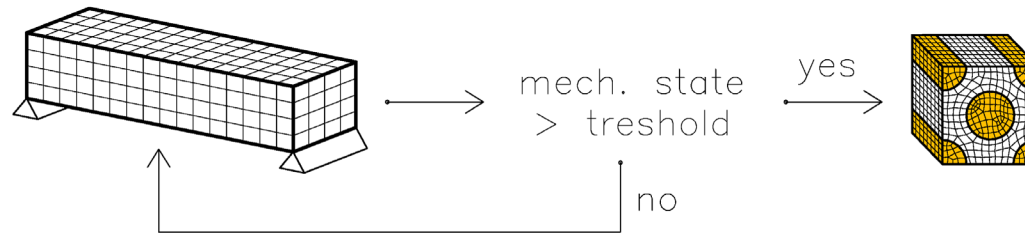
1. Definición de una Non-Linear Activation Function (NLAF)
2. Definición de un algoritmo de Smart First Step (SFS)

La NLS no intenta reducir el coste computacional mediante la extrapolación de algunos resultados no-lineales (tal como hacen los modelos de reducción). Lo que pretende es minimizar el número de RVEs que se resuelven, analizando únicamente aquellos que presentan un comportamiento no lineal.

Esta estrategia ha sido desarrollada por Fermin Otero en sus estudios de doctorado bajo la dirección de S. Oller y X. Martínez.

NON-LINEAR ACTIVATION FUNCTION (NLAF)

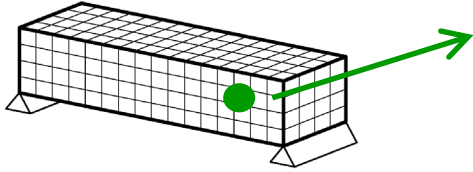
El objetivo de la NLAF es definir un valor umbral en el macro-modelo que indique la carga para la que el micro-modelo pasa a tener un comportamiento no-lineal. En este momento, será necesario la resolución del RVE para obtener el comportamiento del material.



La NLAF se debe calcular en el macro-modelo pero depende del daño en el micro-modelo.

NON-LINEAR ACTIVATION FUNCTION (NLAF)

La NLAF se define mediante la densidad de energía elástica del material. Ésta depende del estado de carga aplicado al material.



Para cada punto de integración calculamos: $\Psi_e = \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon$

A cada punto de integración le corresponde un RVE, sobre el que podemos calcular una densidad de energía límite: Ψ_e^{Lim} . Ésta, de nuevo, depende del estado de cargas aplicado.

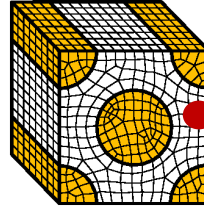
La función de activación no lineal se define como: $\Psi_e - \Psi_e^{Lim} \leq 0$

El cálculo de la densidad de energía límite del punto de integración, Ψ_e^{Lim} , se calcula a partir de la siguiente hipótesis

NON-LINEAR ACTIVATION FUNCTION (NLAF)

El material tiene un comportamiento no-lineal en el momento en que el primer punto de integración del RVE alcanza un comportamiento no-lineal.

Para un estado tenso-deformacional dado, podemos calcular para cada punto de integración (k) del RVE:



$$\Psi_{e_k} = \frac{1}{2} \sigma_k : \varepsilon_k$$

$$\Psi_{e_k}^{Lim} = \frac{1}{2} \sigma_k^{Lim} : \varepsilon_k^{Lim}$$

Ahora se puede definir una función f que define lo cerca que está cada uno de los puntos de integración de la tensión de rotura:

$$f_k = \frac{\Psi_{e_k}}{\Psi_{e_k}^{Lim}} \xrightarrow{\text{Extrapolación al macro-modelo}} f = \max\{f_k\}$$

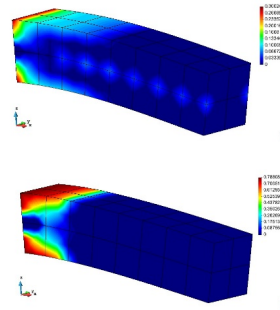
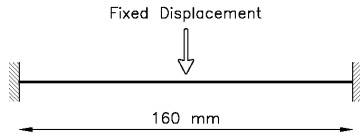
Luego:

$$\Psi_e^{Lim} = \frac{\Psi_e}{f}$$

NON-LINEAR ACTIVATION FUNCTION (NLAF)

El valor de la densidad de energía elástica límite calculada para cada uno de los puntos de integración de la macro-estructura depende de su estado tenso-deformacional. Si éste varía, también variará la densidad de energía elástica límite

Luego, es necesario verificar para cada paso de carga que $\varepsilon_n \sim \varepsilon_0$, y calcular de nuevo ψ_e^{Lim} si esta proporcionalidad no se verifica.

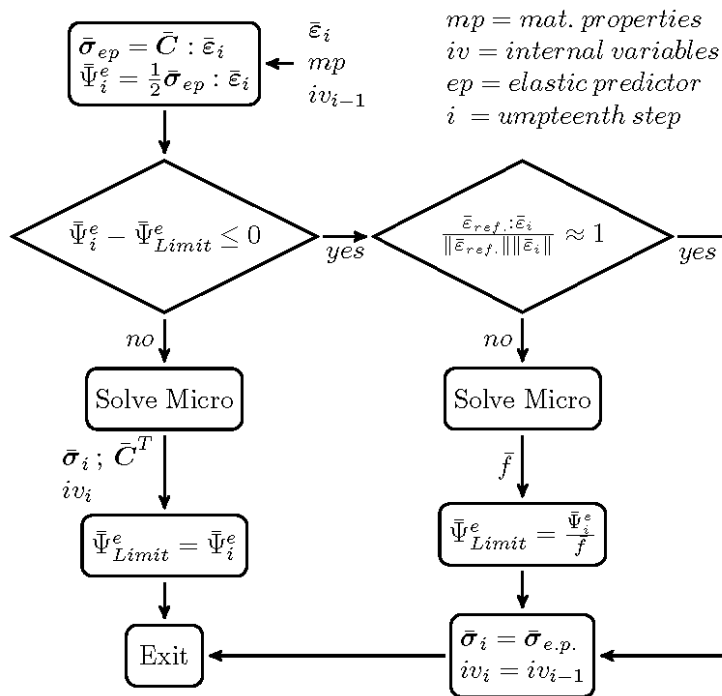


Resultado si no se verifica la proporcionalidad

Resultado verificando la proporcionalidad

NON-LINEAR ACTIVATION FUNCTION (NLAf)

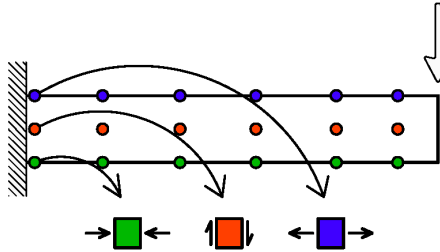
La implementación de la NLAf en un código de elementos finitos se realiza mediante el siguiente diagrama de flujo.



SMART FIRST STEP (SFS)

El procedimiento propuesto requiere analizar, en el primer paso de carga, el RVE en todos los puntos de integración del macro-modelo, para poder calcular ψ_e^{Lim}

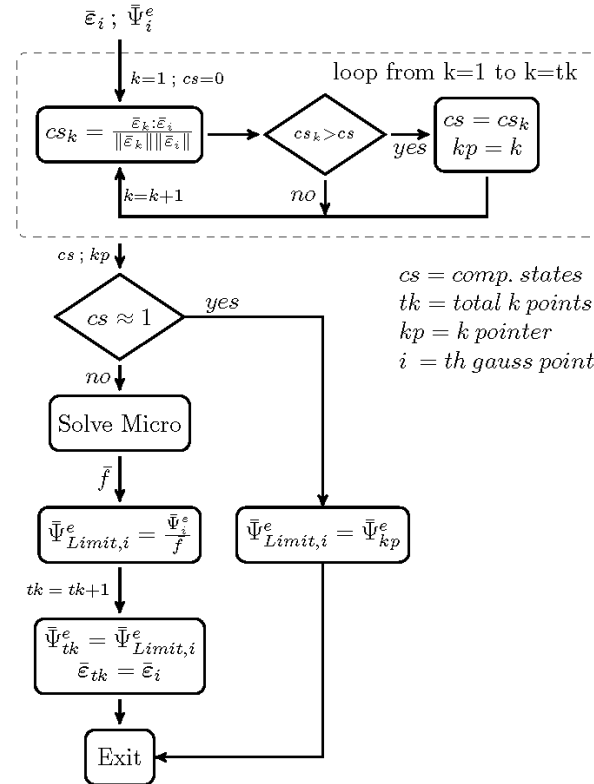
No obstante lo más común es que las estructuras tengan muchos estados tenso-deformacionales proporcionales:



Es posible definir un Smart First Step que minimice el número de RVEs que se deben calcular para obtener la densidad de energía elástica límite de los distintos puntos de integración.

SMART FIRST STEP (SFS)

El modo en que se procede con el Smart First Step es:

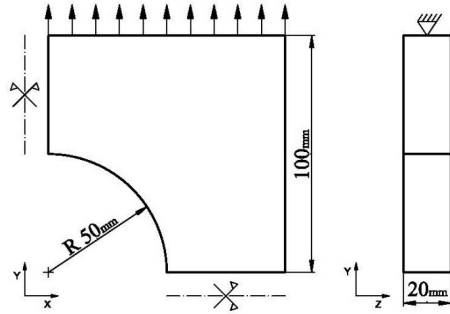


ESTRATEGÍA NO-LINEAL – ALGUNAS CONSIDERACIONES

1. El principal objetivo de la NLS es evitar el cálculo de los RVEs que se encuentran en régimen elástico.
2. Una vez un punto de integración macro supera su límite elástico, permanecerá no lineal. Esto obliga a analizar su RVE para cada paso de carga de la simulación.
3. Un análisis no-lineal material requiere una buena aproximación del tensor tangente del material. En procesos multiescala éste se obtiene mediante una derivación numérica, lo que supone analizar 6 veces más el RVE una vez se ha alcanzado la convergencia.

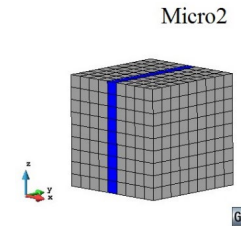
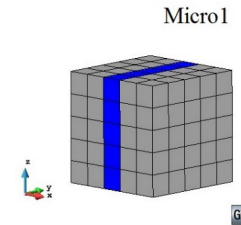
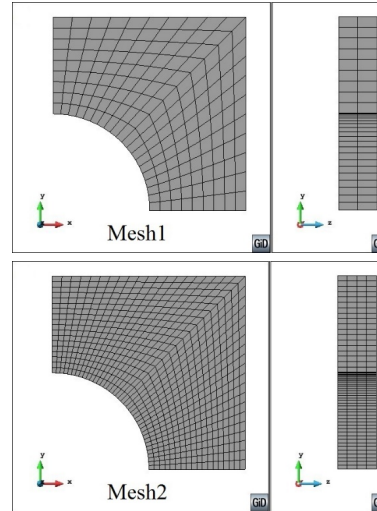
Conclusión: **Un análisis multiescala no-lineal es caro, independientemente de la estrategia que se utilice.**

EJEMPLO NUMÉRICO – PLACA CON AGUJERO



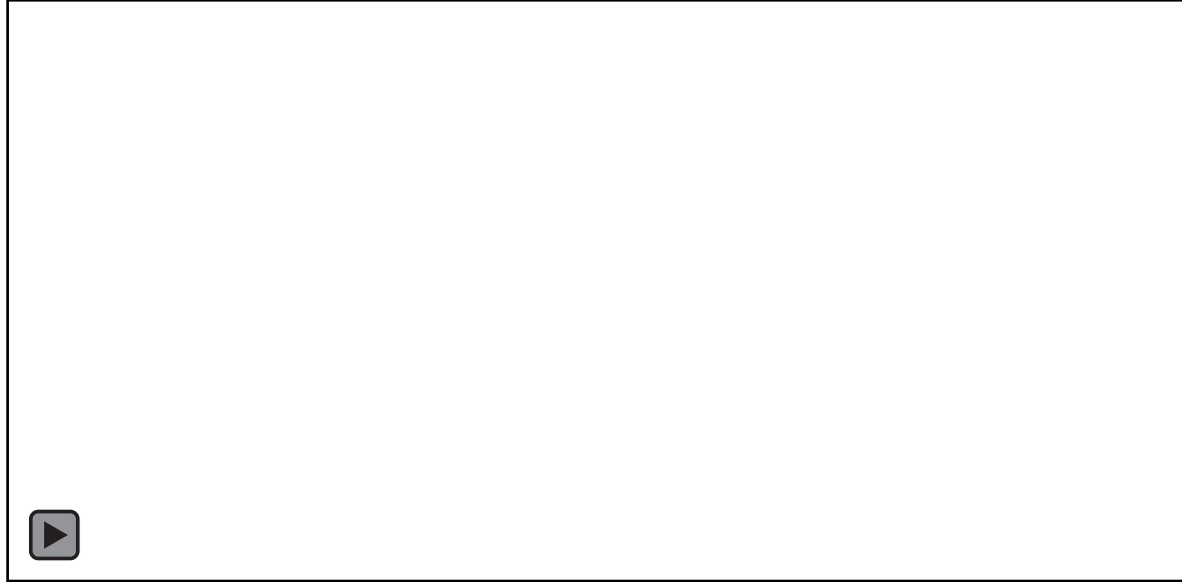
Property	Grey mat.	Blue mat.
E [GPa]	100	100
ν	0.15	0.15
σ_{lim} [MPa]	102	100
Gf [kJ/m ²]	10	10

Ambos materiales se caracterizan con un daño escalar explícito



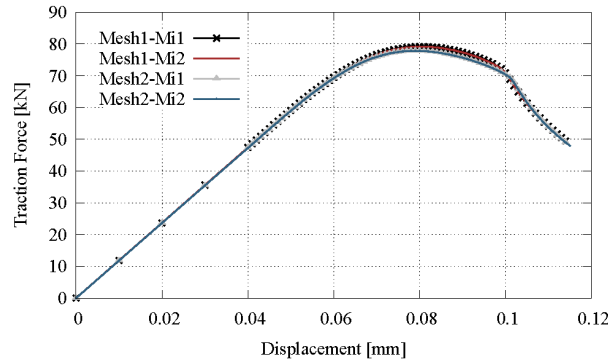
EJEMPLO NUMÉRICO – PLACA CON AGUJERO

Resultados obtenidos. Parámetro de daño



EJEMPLO NUMÉRICO – PLACA CON AGUJERO

Gráficos fuerza-desplazamiento para los distintos modelos analizados:



Energía de fractura del macro-modelo: $g_f = \frac{G_f}{L_f}$

Energía de fractura en el micro-modelo:

$$g_f = \frac{1}{V_m} \int_{\Omega_m} g_f^m dV_m$$

$$g_f^m = \frac{g_f l}{l_f} = \frac{G_f l}{L_f l_f}$$

L_f = Fracture length macro
 l_f = Fracture length micro
 l = Length of the micro model

Coste computacional:

Si la simulación se para para Displ = 0.08mm, el speed ratio es 7.0

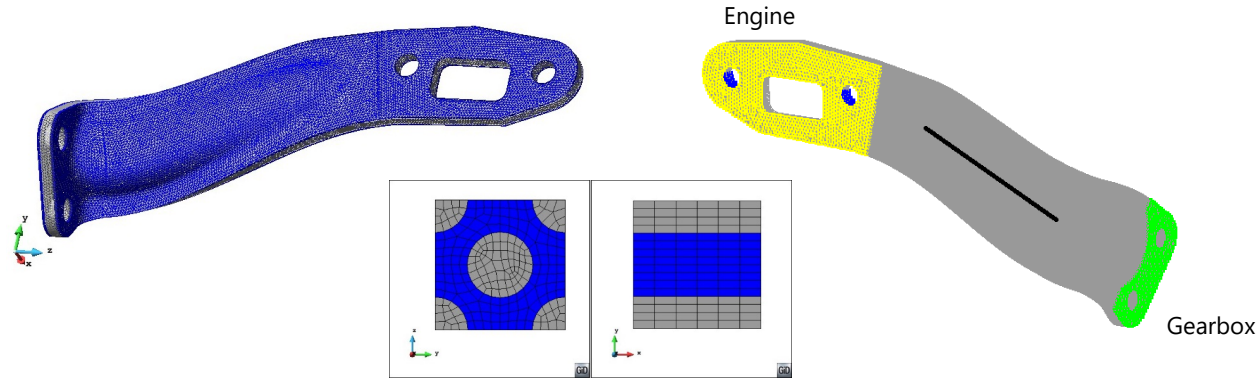
Model	FE ²	NLS	Speed ratio
Mesh1-Micro1	1h 21' 53"	28' 19"	2.89
Mesh1-Micro2	8h 41' 19"	3h 10' 44"	2.73
Mesh2-Micro1	11h 19' 49"	2h 29' 28"	4.55
Mesh2-Micro2	76h 40' 33"	18h 39' 33"	4.11

EJEMPLO NUMÉRICO – PLACA CON AGUJERO

Mejora computacional proporcionada por el Smart First Step:

Model	Without SFS		With SFS		Speed ratio
	Time	RVE solved	Time	RVE solved	
Mesh1-Micro1	18''	2,880	1''	151	17.9
Mesh1-Micro2	1' 48''	2,880	6''	151	16.7
Mesh2-Micro1	2' 12''	23,040	3''	303	50.8
Mesh2-Micro2	14' 06''	23,040	12''	303	67.7

EJEMPLO NUMÉRICO – COMPONENTE INDUSTRIAL



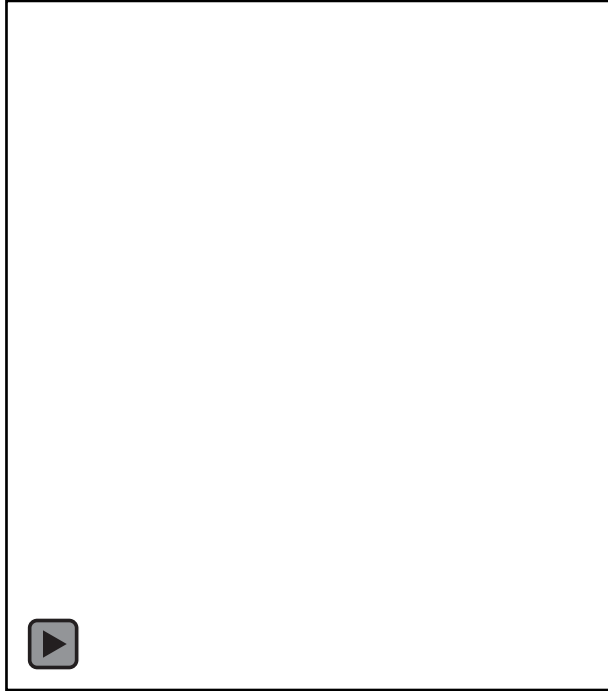
Material	Model	E [GPa]	ν	σ_{lim} [MPa]	Gf [kJ/m ²]
Fibre (Carbon)	Elastic	235	0.21	4410	-
Matrix (Epoxy)	Damage	4.52	0.36	68	780

Material	Model	E1 [GPa]	E2 [GPa]	G [MPa]
TenCate core	Elastic	56.1	55.6	4.5

EJEMPLO NUMÉRICO – COMPONENTE INDUSTRIAL

Resultados.

Parámetro de daño:



Nota: El parámetro de daño en el macro-modelo se calcula a partir de la pérdida de rigidez de todo el RVE, y no como la integral del daño sobre los distintos puntos del RVE.

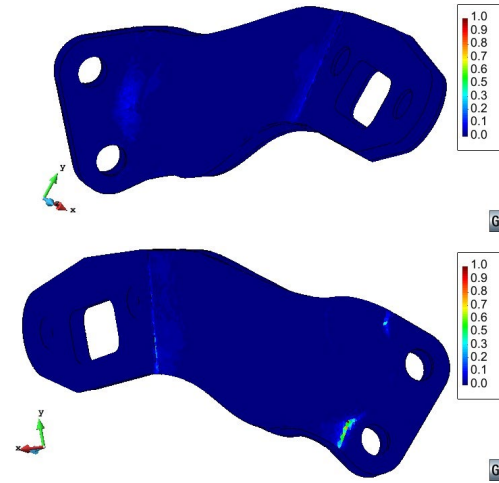
EJEMPLO NUMÉRICO – COMPONENTE INDUSTRIAL

La estrategia no-lineal presentada también proporciona las posibles regiones de fallo.

Esta información se obtiene en el primer paso de carga de la simulación.

Valores altos indican que hay poca densidad de energía elástica disponible.

Un valor igual a 1 indica que toda la energía elástica se ha consumido.



Coste computacional:

Model	FE ²	NLS	Speed ratio
Mesh1-Micro1	32d 14h 46'	11h 36'	67.4

¡ Reducción del 98.5 % !

4.

BASE DE DATOS CONSTITUTIVA MULTIESCALA (S. ZAGHI *ET AL* 2016)



BASE DE DATOS CONSTITUTIVA MULTIESCALA

El objetivo que se persigue es definir una ecuación constitutiva para el micro-modelo, de modo que sea posible la resolución de la estructura macro a partir de la ecuación constitutiva, sin necesidad de resolver el RVE.

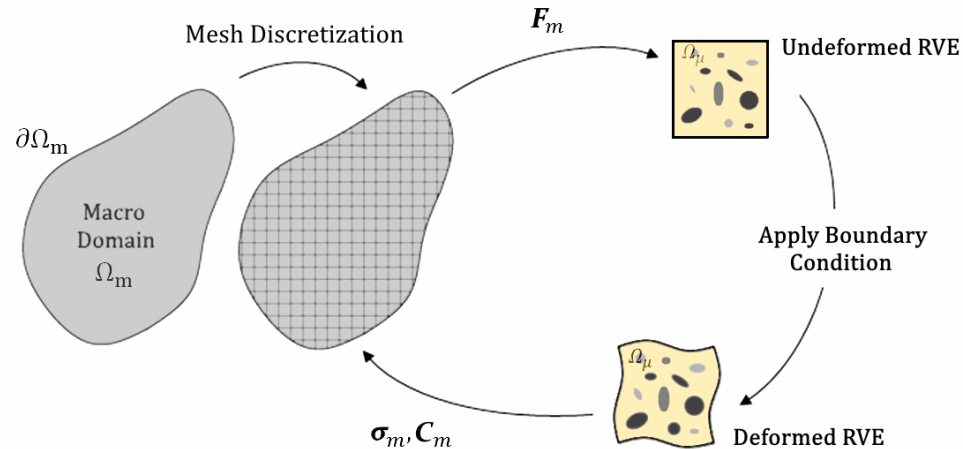
La variabilidad de comportamientos que pueden desarrollar los materiales compuestos imposibilitan la definición de una ecuación específica. Es por ello que se propone utilizar un esquema de base de datos.

En una primera fase, la ecuación constitutiva se utilizará para obtener el límite elástico del material compuesto. Esto se hace mediante la definición de una Discrete Multiscale Threshold Surface (DMTS)

Estos desarrollos los ha realizado Stefano Zaghi en sus estudios de doctorado bajo la dirección de X. Martínez y R. Rossi.

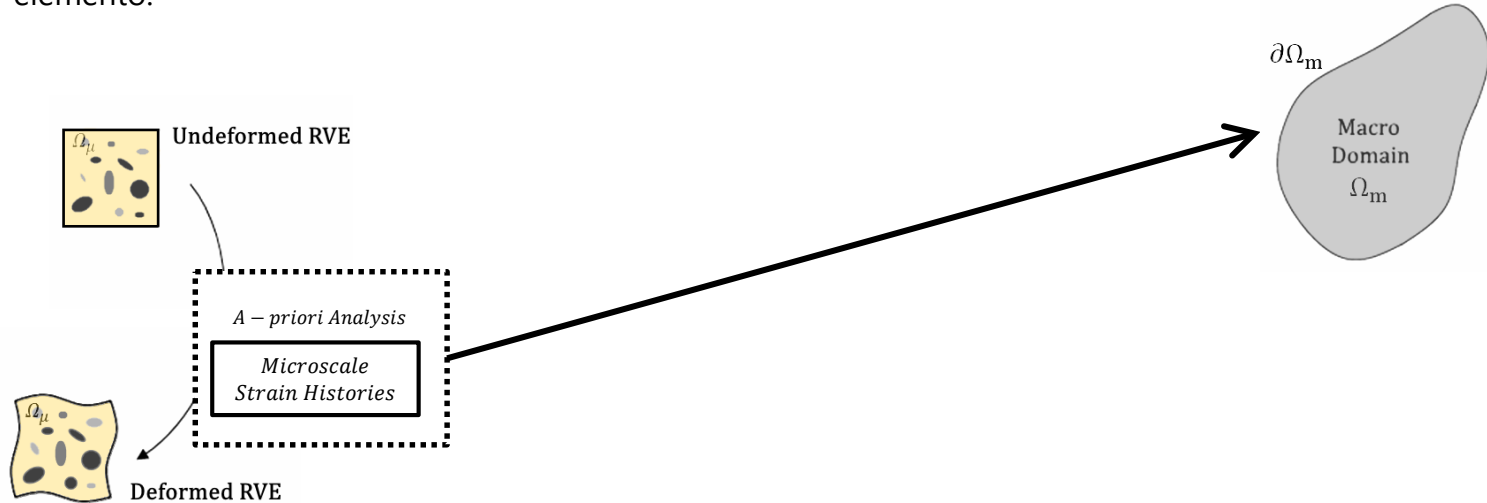
DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

La Discrete Multiscale Threshold Surface (DMTS) se obtiene analizando el comportamiento del RVE mediante una formulación de primer orden, aplicándolo en un macro-modelo simple de un único elemento.



DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

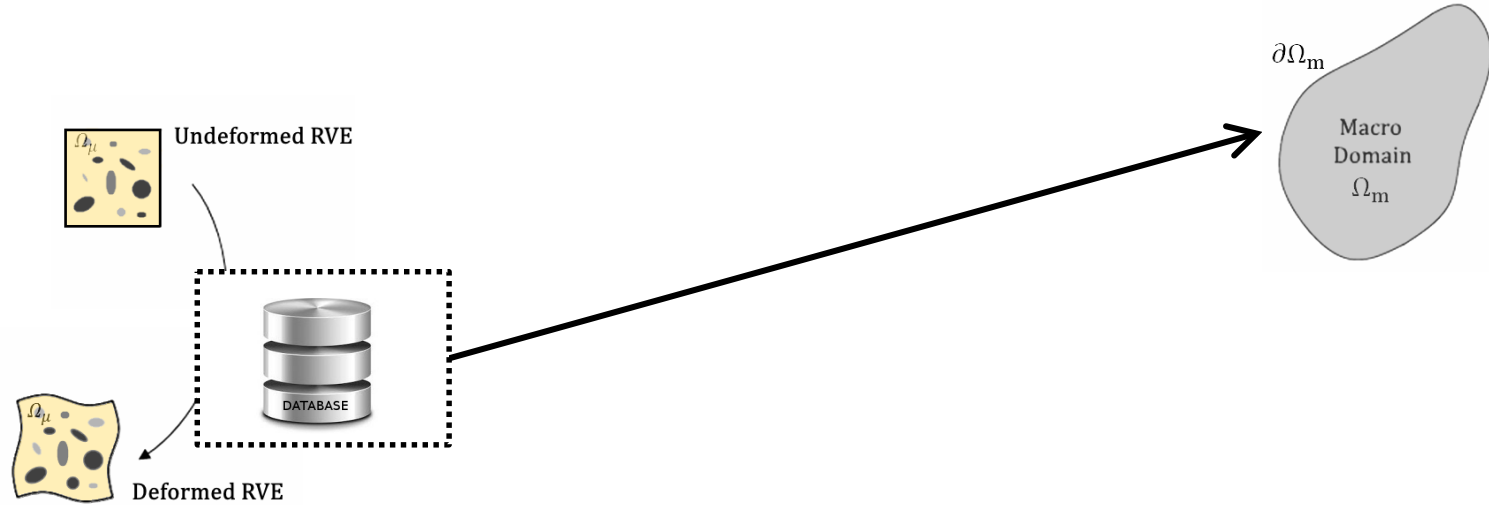
La Discrete Multiscale Threshold Surface (DMTS) se obtiene analizando el comportamiento del RVE mediante una formulación de primer orden, aplicándolo en un macro-modelo simple de un único elemento.



El RVE se somete a un numero finito de análisis, imponiendo un deformación fija creciente, hasta que alcanza su límite elástico.

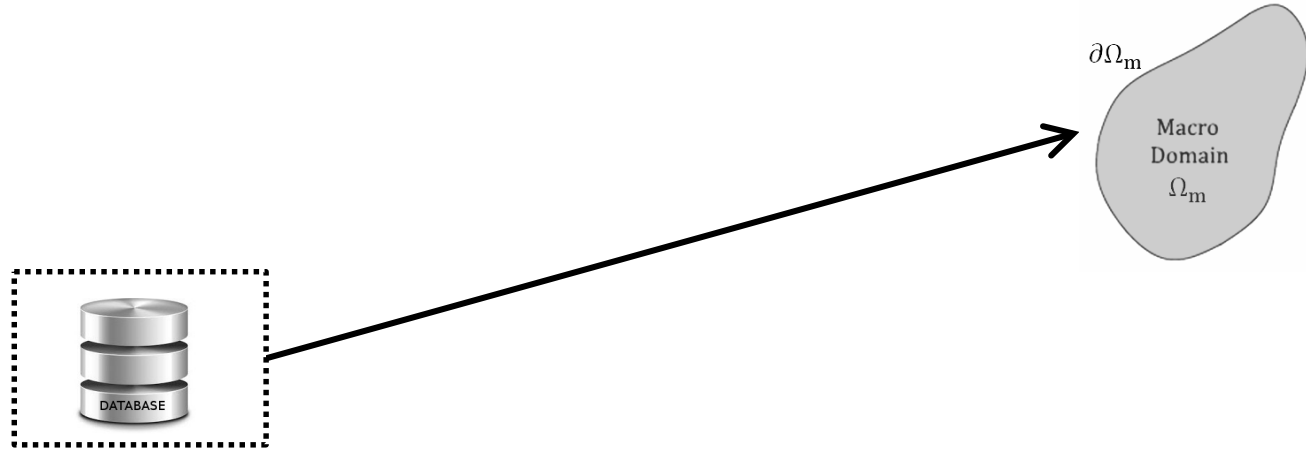
DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

La información obtenida del análisis del RVE se almacena en una base de datos.



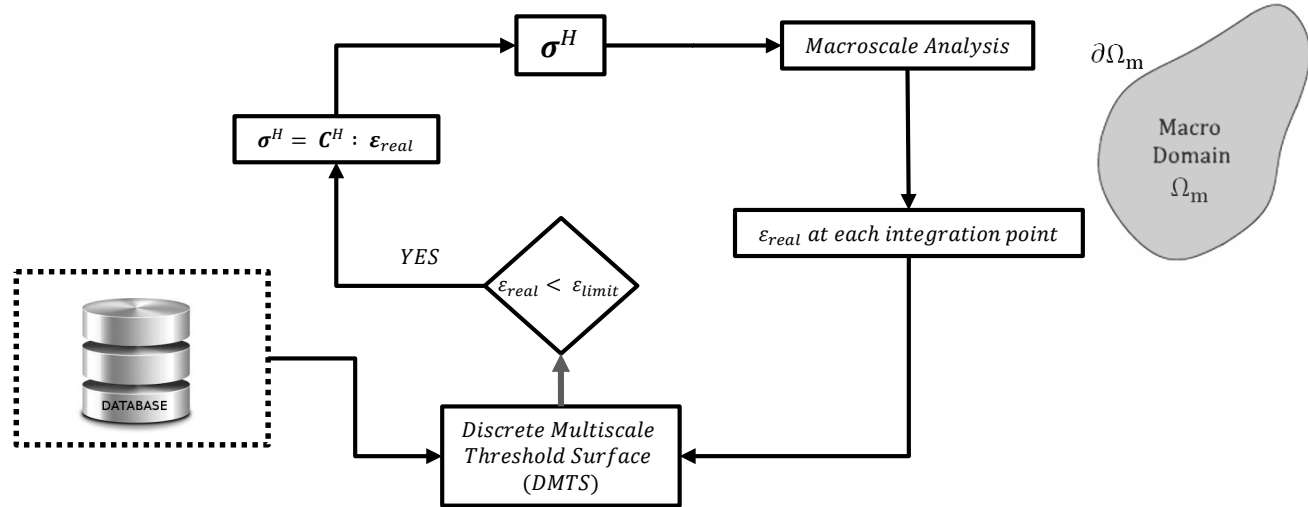
DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

Una vez se tiene el comportamiento del RVE almacenado en la base de datos, se puede prescindir del RVE y utilizar ésta para obtener el comportamiento del macro-modelo.



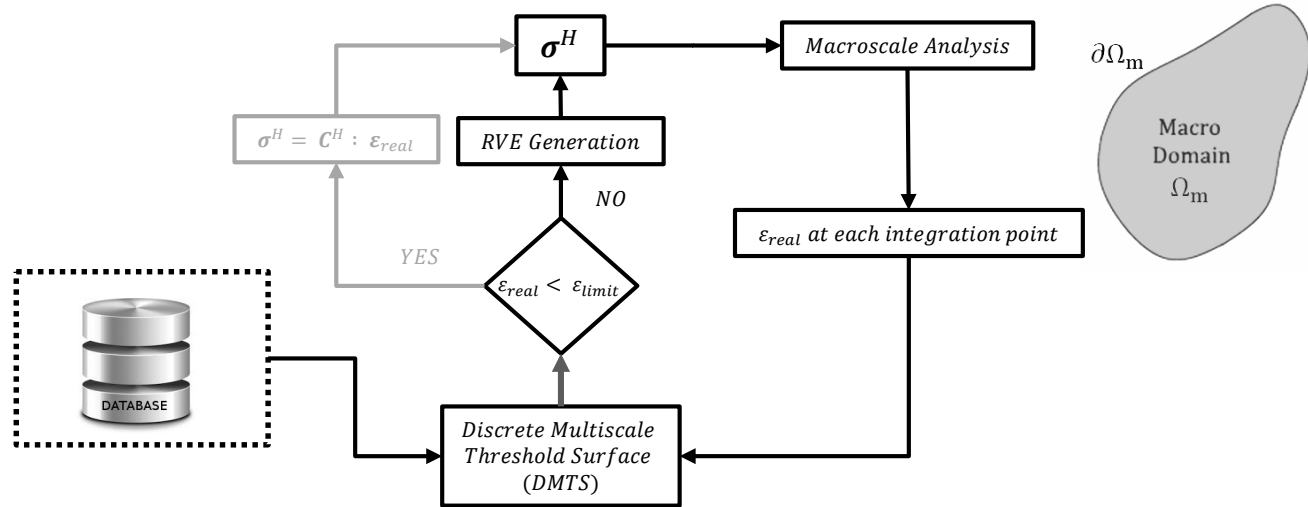
DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

El macro-modelo compara las deformaciones obtenidas en el paso de carga, ε_{real} , con las máximas deformaciones admisibles en el material, ε_{limit} , que se encuentran almacenadas en la base de datos.



DISCRETE MULTISCALE THRESHOLD SURFACE (DMTS)

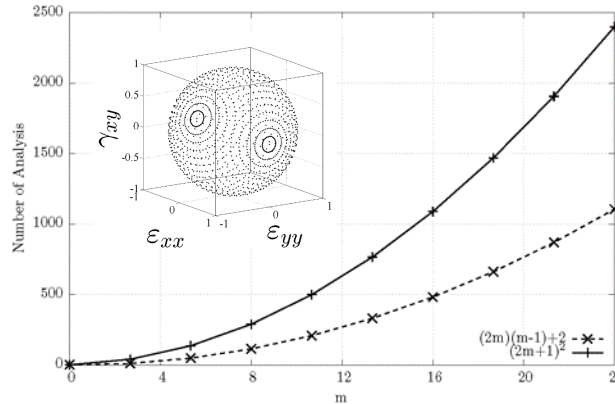
En caso de que las deformaciones superen el máximo admisible, será necesario generar el RVE para obtener el comportamiento no-lineal del material.



ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS DEL MATERIAL

Debido a que es materialmente imposible analizar el RVE en todas las direcciones del espacio, se define un número discreto de direcciones en los que se realizará dicho análisis.

En 2D, las deformaciones en las que se analiza el RVE se definen como puntos equi-espaciados en una esfera en la que el radio representa la magnitud de la deformación aplicada.



$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = r \cdot \cos(\theta) \\ \epsilon_{yy} = r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \\ \gamma_{xy} = r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \end{cases}$$

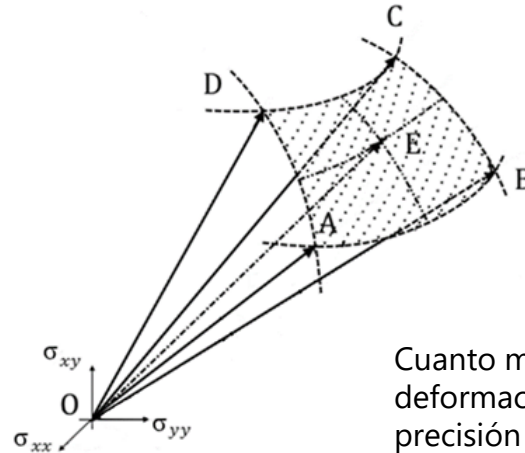
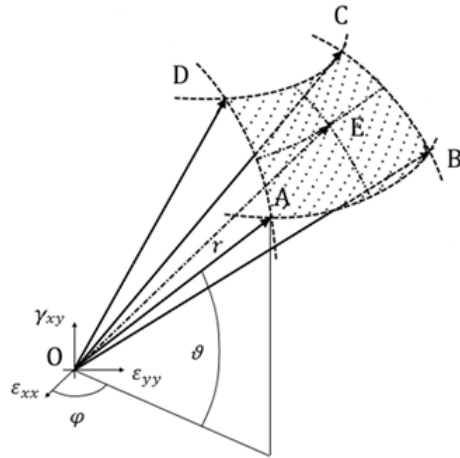
$$r = \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 + \gamma_{xy}^2}$$

El número de análisis que se deben realizar se ve incrementado exponencialmente al refinar el espacio de deformaciones

ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS DEL MATERIAL

Generalmente, la simulación numérica obtendrá valores de deformaciones no calculados al generar la base de datos.

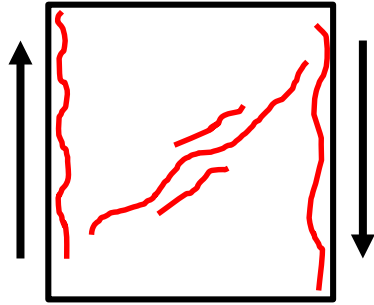
En estos casos, es necesario realizar una interpolación entre los valores más cercanos. La interpolación se puede hacer tanto en el espacio de deformaciones, como en el espacio de tensiones.



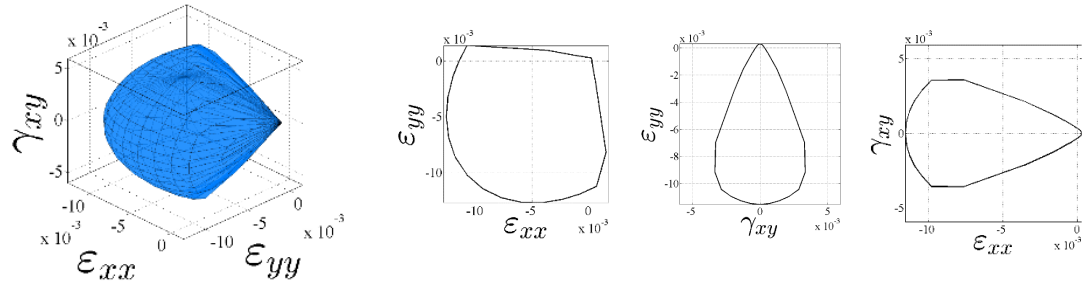
Cuanto más refinado es el espacio de deformaciones calculado, mayor precisión se tiene en la interpolación.

EJEMPLO DE VALIDACIÓN (1)

La validación de la formulación se realiza a partir de una simulación a corte de un material homogéneo caracterizado con una ley de daño con comportamiento diferenciado a tracción-compresión.

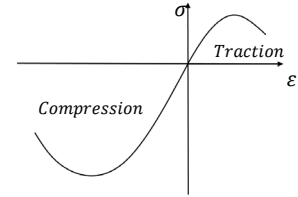


Discrete Multiscale Threshold Surface obtenidas para el material



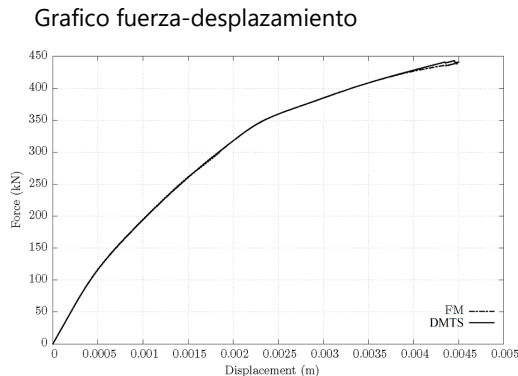
Damage Traction/Compression Properties

Young Modulus	900 MPa
Poisson Ratio	0.15
Stress Traction Limit	0.25 MPa
Traction Fracture Energy	0.016 J/mm ²
Stress Compression Limit	10.5 MPa
Compression Fracture Energy	40.0 J/mm ²



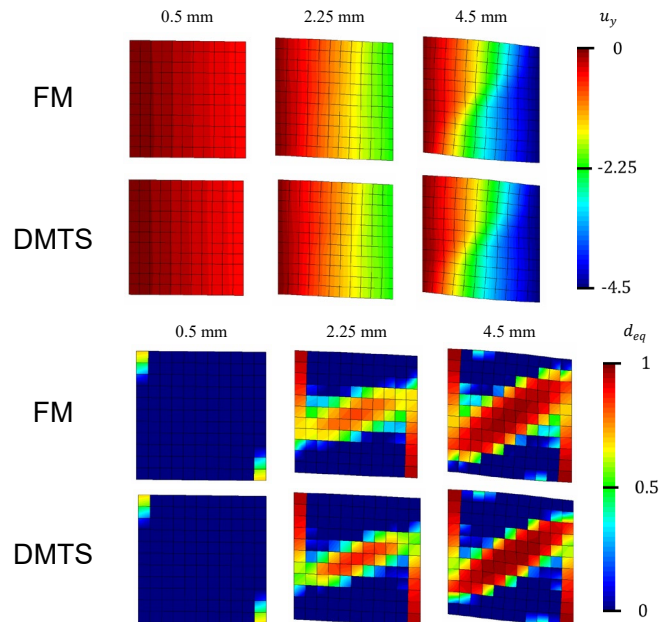
EJEMPLO DE VALIDACIÓN (1)

Comparación con los resultados obtenidos mediante un modelo multiescala completo (FE2)



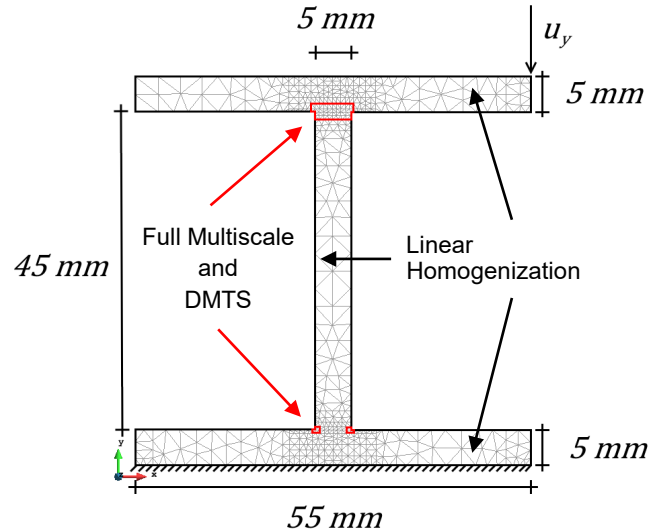
Memory and Time comparison

Type	Time [s]	Memory [kB]	Number of Active RVEs	Time Speedup
Full	844.72	169788	484/484	-
Multiscale				
DMTS	646.39	92140	388/484	1.307



EJEMPLO DE VALIDACIÓN (2)

El segundo ejemplo de validación considerado es un perfil doble T de pultrusión, sometido a una carga puntual en el extremo del ala.



Mechanical Properties of Epoxy Resin

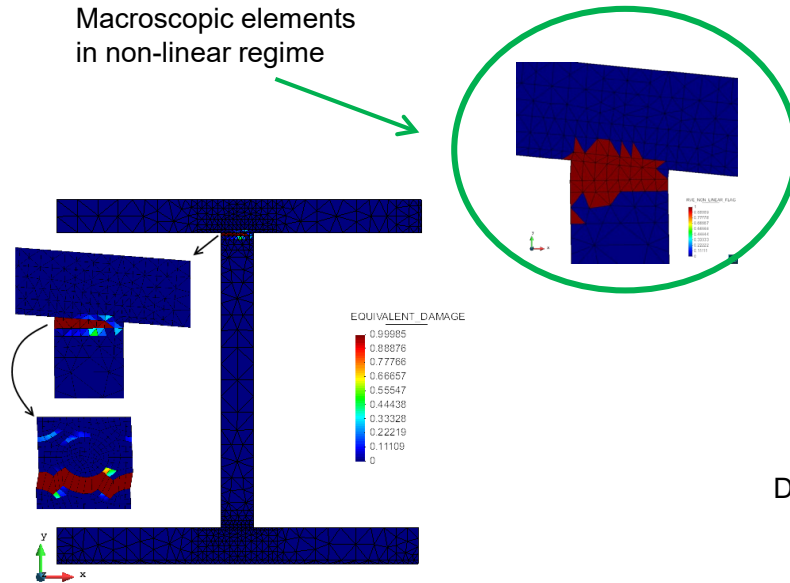
Young Modulus	3.24e3	MPa
Poisson Ratio	0.32	
Stress Traction Limit	80	MPa
Traction Fracture Energy	0.73	J/mm ²
Stress Compression Limit	240	MPa
Compression Fracture Energy	2.19	J/mm ²

Mechanical Properties of Carbon fibers

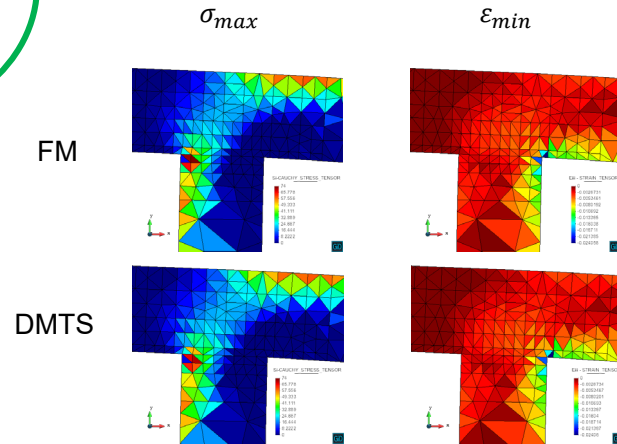
Young Modulus	235e3	MPa
Poisson Ratio	0.21	

EJEMPLO DE VALIDACIÓN (2)

Elementos dañados obtenidos con la simulación que utiliza la formulación DMTS



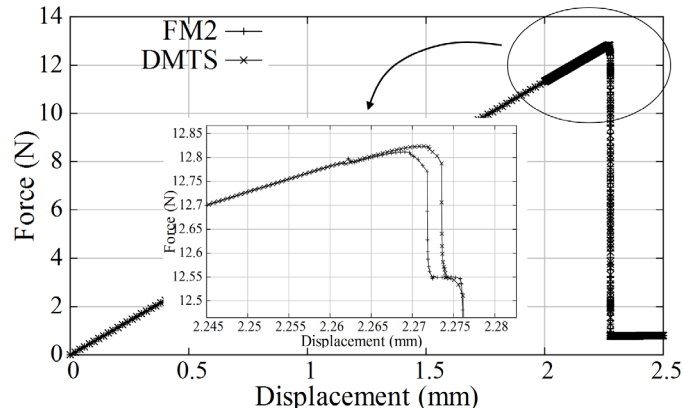
Comparación del comportamiento
tenso-deformacional obtenido
mediante FM y DMTS



EJEMPLO DE VALIDACIÓN (2)

Comparación del comportamiento global de la estructura, a partir del gráfico fuerza-desplazamiento.

Comparación de los tiempos de cálculo.



Memory and Time comparison

Type	Time [s]	Memory [kB]	Number of Active RVEs	Time Speedup
Full Multiscale	40267.5	152212	84/1075	-
DMTS	19183.3	108696	70/1075	2.1

CONCLUSIONES

- Los métodos multiescala permiten analizar materiales complejos, que no se puede caracterizar con ninguna otra formulación. Esto es de especial importancia para el análisis de materiales compuestos.
- El uso de métodos multiescala en análisis estructurales que tengan en cuenta el comportamiento no-lineal del material es hoy en día prohibitivo en términos de coste computacional (tiempo y memoria)
- Se han presentado cuatro estrategias distintas con las que afrontar un cálculo no-lineal mediante métodos multiescala. Dos de ellas consistentes en minimizar el número de RVEs que debe analizar la formulación.
- Tanto la Estrategia No Lineal (NLS) como la Base de Datos Constitutiva Multiescala han mostrado que es posible reducir de forma considerable el coste computacional de la simulación.
- Actualmente se considera imperativo el uso de este tipo de estrategias para realizar un análisis multiescala no lineal.

MUCHAS GRACIAS



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



CIMNE

International Center
for Numerical Methods in Engineering