Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Modelización Micromecánica basada en RVE para la Evaluación de Figuras Mérito en Piezocompuestos 0-3 y 1-3

Autor: María García Correa Tutor: Luis Rodríguez de Tembleque Solano

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Modelización Micromecánica basada en RVE para la Evaluación de Figuras Mérito en Piezocompuestos 0-3 y 1-3

Autor:

María García Correa

Tutor:

Luis Rodríguez de Tembleque Solano Catedrático de Universidad

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado:Modelización Micromecánica basada en RVE para la Evaluación
de Figuras Mérito en Piezocompuestos 0-3 y 1-3

Autor:María García CorreaTutor:Luis Rodríguez de Tembleque Solano

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor, Luis Rodríguez de Tembleque, que ha puesto toda la paciencia y me ha brindado toda la ayuda que he necesitado para concluir con éxito este trabajo.

También me gustaría agradecer a todas las personas que he conocido a lo largo de la carrera que han hecho que haya podido llegar hasta aquí. A Carmen, Delia y Marta, que hicieron que hasta los trabajos más difíciles fueran divertidos. A todos los que comenzaron siendo compañeros para terminar siendo amigos; y en especial a Juanmi, con quien he compartido los mejores (y los peores) momentos de realizar un TFG. A Bruno, que es sin duda lo mejor que me llevo.

Por último, me gustaría agradecer a mi familia, que me ha dado la oportunidad de llegar hasta aquí. En ella incluyo, por supuesto, a Rocío y a Alicia. Hemos estado presentes en todas nuestras etapas, tanto educativas como personales, y esta no ha sido diferente. Solo espero que nos podamos seguir viendo crecer siempre.

María García Correa Sevilla, 2024

Resumen

E n los últimos años, el estudio de los compuestos piezoeléctricos libres de plomo ha cobrado especial relevancia, debido a la creciente necesidad de encontrar alternativas a los materiales tradicionales, más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Este trabajo estudia diversas propiedades y figuras de mérito de estos compuestos en configuraciones 0-3 y 1-3. Más concretamente analiza la influencia de la morfología de la fibra y las inclusiones de la fase activa en la matriz, así como la auxeticidad de la misma.

El análisis se basa en la comparación de propiedades a través de figuras de mérito, herramientas fundamentales para evaluar la idoneidad de los piezocompuestos bajo diferentes condiciones de carga. Para ello, es necesario obtener los coeficientes elásticos y piezoeléctricos mediante simulaciones que se realizan utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF) sobre un elemento de volumen representativo (RVE), implementado en el software Ansys.

El uso de este método vendrá respaldado por comparaciones con otros estudios que han trabajado con los mismos modelos aquí empleados, garantizando la fiabilidad de los resultados. Además, los estudios se harán con los piezoeléctricos conocidos como *lead-free*; es decir, libres de plomo. Esto hace que este trabajo también tenga interés en este sentido, debido a su carácter nocivo para la salud. Es por esto que eliminarlo presenta grandes ventajas.

Entre las principales conclusiones, se destaca que las figuras de mérito muestran una notable consistencia dentro de un mismo tipo de conectividad, independientemente de la morfología de las fibras. No obstante, las diferencias se hacen notables al comparar conectividad 0-3 y 1-3, lo que subraya la importancia de la estructura del material en su rendimiento. En cuanto a la auxeticidad de la matriz, su influencia varía según los coeficientes y figuras de mérito analizados. Sin embargo, en ninguno de los casos es una diferencia muy acusada.

Abstract

In recent years, the study of lead-free piezoelectric compounds has gained significant relevance due to the growing need to find alternatives to traditional materials that are more sustainable and environmentally friendly. This work studies various properties and figures of merit of these compounds in 0-3 and 1-3 configurations. More specifically, it analyzes the influence of fiber morphology and inclusions of the active phase in the matrix, as well as the auxeticity of the latter.

The analysis is based on comparing properties through figures of merit, fundamental tools for evaluating the suitability of piezocomposites under different loading conditions. For this, it is necessary to obtain elastic and piezoelectric coefficients through simulations performed using the Finite Element Method (FEM) on a representative volume element (RVE), implemented in Ansys software.

The use of this method will be supported by comparisons with other studies that have worked with the same models used here, ensuring the reliability of the results. Additionally, the studies will be conducted on piezoelectric materials known as *lead-free*; that is, lead-free. This makes the work interesting in this sense as well, due to lead's harmful effects on health. For this reason, eliminating it presents great advantages.

Among the main conclusions, it is noteworthy that the figures of merit show remarkable consistency within the same type of connectivity, regardless of the fiber morphology. However, differences become apparent when comparing 0-3 and 1-3 connectivity, highlighting the importance of material structure in its performance. Regarding the auxeticity of the matrix, its influence varies depending on the coefficients and figures of merit analyzed. Nevertheless, in none of the cases is the difference particularly pronounced.

Índice

Re Ab	esume estract	n		III V
Ínc Ínc No	dice de dice de otación	e Figura e Tablas 1	95 5	IX XIII XV
1	Intro	ducció	n	1
	1.1	Motiva	ción	1
	1.2	Objetiv	/0S	6
	1.3	Organi	ización del documento	6
2	Com	portam	niento de los compuestos piezoeléctricos	9
	2.1	Acopla	miento y conectividad	9
	2.2	Ecuaci	iones constitutivas	10
	2.3	Presta	ciones de los piezocompuestos	12
	2.4	Compu	uestos piezoeléctricos a estudiar	14
3	Mod	elizació	ón micromecánica de compuestos piezoeléctricos	17
	3.1	Conce	pto de Elemento de Volumen Representativo o RVE	17
	3.2	Homo	geneización y condiciones de contorno periódicas	18
		3.2.1	Condiciones de contorno periódicas	20
	3.3	El Mét	odo de los Elementos Finitos e implementación mediante Ansys	21
	3.4	Modeli	zación del RVE e implementación numérica	22
		3.4.1	Modelado del RVE en Ansys	23
		3.4.2	Definición de materiales en Ansys	25
		3.4.3	Definición de condiciones de contorno y analisis de resultados	26
4	Resu	ultados		29
	4.1	Validad	ción del modelo para el cálculo numérico	29
		4.1.1	Resultados para las condiciones de contorno	30
		4.1.2	Comparativa de resultados con Berger y solución teórica	35
	4.2	Análisi	s de la influencia de la morfología de la fibra	38
	4.3	Análisi	s de la influencia de la inclusión de una matriz auxética	42
5	Cond	clusion	es finales y resumen	53

5.1	Resumen y objetivos cumplidos	53
5.2	Conclusiones	54
5.3	Trabajos futuros	54
Bibliogra	fía	57
Apéndic	e A Códigos de Ansys	59
A.1	Fibra circular PZT matriz epoxy CC1	59
A.2	Fibra circular PZT matriz epoxy CC2	65
A.3	Fibra circular PZT matriz epoxy CC3	71
A.4	Fibra circular PZT matriz epoxy CC4	88
A.5	Fibra circular PZT matriz epoxy CC5	104
A.6	Fibra circular PZT matriz epoxy CC6	110
A.7	Fibra circular KNN matriz polietileno CC1	116
A.8	Fibra circular KNN matriz polietileno auxética CC1	122
A.9	Fibra cuadrada KNN matriz polietileno CC1	128
A.10	Fibra cuadrada KNN matriz polietileno auxética CC1	135
A.11	Fibra esférica KNN matriz polietileno CC1	142
A.12	Fibra esférica KNN matriz polietileno auxética CC1	147
A.13	Fibra hexaédrica KNN matriz polietileno CC1	152
A.14	Fibra hexaédrica KNN matriz polietileno auxética CC1	157
Apéndic	e B Códigos de Matlab	163
B.1	Verificación del modelo	163
B.2	Figuras de mérito para inclusiones circular, cuadrada y hexaédrica	u 172
B.3	Figuras de mérito para inclusión esférica	174
B.4	Comparativa para la influencia de la morfología de fibra	176
B.5	Comparativa para la influencia de la auxeticidad de la matriz	184

Índice de Figuras

1.1	Esquema de un material compuesto. En él, se aprecian la matriz, el refuerzo y la interfase. La interfase es la zona de unión matriz-refuerzo, que en este trabajo se considera nula al suponerse adherencia perfecta entre la matriz y la fibra. Figura extraída de [1]	2
1.2	La Figura (a) ejemplifica el efecto piezoeléctrico directo. En él, se aplica una deformación que da como resultado un campo eléctrico. Análogamente, la Figura (b) explica el efecto piezoeléctrico inverso. En este, como resultado de la aplicación de un campo eléctrico, se	
	obtiene una deformación mecánica. Figuras extraídas de [2]	2
1.3	la aplicación de un campo eléctrico. Tras ella, todos toman la misma orientación. Figura	0
1.4	Las Figuras (a) y (b) corresponden a un mechero y un airbag, ambos con actuadores piezoeléctricos. En el caso del mechero, la deformación de la piedra genera una diferencia de potencial que provoca una chispa; y el airbag es activado al deformarse el piezoeléc- trico del interior. Respecto a la Figura (c), se trata de sensores piezoeléctricos. Estos	3
	dispositivos se emplean para medir deformaciones mediante el campo eléctrico	4
1.5	Comparación de coeficiente piezoeléctrico d_{33} entre algunos de los materiales piezoeléctricos más empleados. Figura extraída de [3]	5
1.6	Estructura no auxética (hexagonal cell), frente a auxética (inverted hexagonal cell). En la no auxética, al comprimir según h_2 la celda hexagonal, en la dirección h_1 se produce un alargamiento. Sin embargo, al hacer lo mismo en la estructura auxética, la distancia h_1 se reducirá. Figura extraída de [4]	5
0.1	Tipos de acontamiente de niezeolóstrigos. El acontamiente 22 consiste en la antigosión de	
2.1	la fuerza en el mismo sentido que la polarización. El acoplamiento 33 consiste en la aplicación de que la fuerza que deforma el material y la polarización tienen sentidos perpendiculares.	
	Figura extraída de [2]	10
2.2	La Figura (a) muestra el tipo de conectividad 0-3, en la que las inclusiones se distribuyen de forma dispersa, sin interconexión entre ellas. La Figura (b) representa la conectividad 1-3, en la que las fibras piezoeléctricas se orientan todas en una misma dirección. Por último, en la Figura (c) se observa el tipo de conectividad 2-2, en la que tanto el material piezoeléctrico como la matriz comparten una conectividad bidimensional. Figura extraída	
	de [3]	11
2.3	Figuras de mérito según los esfuerzos a los que se somete a la pieza y la forma de la misma. Figura extraída de [5]	13
3.1	Tipología de las celdas empleadas en este trabajo como RVE. Figura extraída de [6]	18

3.2	Esquema del análisis local-global. Figura extraída de [6]	19
3.3	Ejemplo de discretización de dominio para aplicar el MEF	21
3.4	RVE para fibra circular, orientada según a_1	22
3.5	RVE para fibra cuadrada, orientada según a_1	23
3.6	RVE para inclusión esférica	23
3.7	RVE para inclusión hexaédrica	24
3.8	Elemento empleado para el modelado de materiales piezocompuestos [7]	24
3.9	Mallados para $v_f = 0.111$ de las cuatro morfologías de inclusiones contempladas en este trabajo. Para las fibras circular y cuadrada, el mallado empleado ha sido adaptativo. En la matriz, los elementos son menores conforme se acercan a la fibra; y en la fibra, se van reduciendo hacia el centro. Por otro lado, para las inclusiones esférica y hexaédrica, la matriz se ha mallado con elementos con forma de prisma triangulas, de tamaño constante en el BVE. Ambas inclusiones se mallan con elementos cúbicos	25
3.10	Esquema de los cambios que introducir sobre la matriz de propiedades para ajustarla a la definida por Ansys [8]	26
3 11	A la izquierda TBDATA según el criterio IEEE: y a la derecha TBDATA según la definición	20
0.11	de la matriz de Ansys	26
4.1	La figura (a) muestra la distribución de deformaciones ε_{11} para $v_f = 0.111$. Por otro lado, la figura (b) representa los desplazamientos resultantes según x	30
4.2	La figura (a) muestra la distribución de tensiones σ_{11} (a), y la figura (b), la de σ_{22} (b). Ambas distribuciones han sido calculadas para $v_f = 0.111$	31
4.3	En la Figura (a), se presenta la distribución de deformaciones ε_{33} para $v_f = 0.111$; y en la Figura (b), los desplazamientos resultantes según z	32
4.4	La figura (a) muestra la distribución de tensiones σ_{11} para $v_f = 0.111$; y la figura (b) muestra la distribución de tensiones σ_{22} para el mismo valor de v_f	32
4.5	Distribución de la deformación ε_{23} para un valor de fracción volumétrica de fibra $v_f = 0.111$	32
4.6	Distribución de la tensión σ_{23} en el volumen representativo para $v_f = 0.111$	33
4.7	Distribución de la deformación ε_{12} en el plano xy para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$	34
4.8	Distribución de la tensión σ_{12} en el volumen representativo para una fracción volumétrica de $v_f = 0.111$	34
4.9	Distribución del campo eléctrico E_3 para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$	35
4.10	Distribuciones de tensiones σ_{11} (a) y desplazamientos eléctricos D_3 (b) para $v_f = 0.111$	35
4.11	Distribución del campo eléctrico E_2 para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$	36
4.12	La figura (a) representa la distribución de tensiones σ_{23} , y la figura (b), los desplazamientos eléctricos D_3 para $v_f = 0.111$	36
4.13	Comparación de coeficientes elásticos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger <i>et al.</i> [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT y solución teórica de Chan [10] para los mismos materiales que los anteriores	37
4.14	Comparación de coeficientes piezoeléctricos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger <i>et al.</i> [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT y solución teórica de Chan [10] para los mismos materiales que los anteriores	37
4.15	Comparación de coeficientes dieléctricos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger <i>et al.</i> [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT v solución teórica de Chan. [10] para los mismos materiales que los anteriores	38
4.16	Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	39
		50

4.17	Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	39
4.18	Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	40
4.19	Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	40
4.20	Gráficas comparativas de figuras de mérito K_p y K_t entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	41
4.21	Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{13} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	43
4.22	Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	43
4.23	Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	44
4.24	Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	44
4.25	Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	45
4.26	Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	45
4.27	Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	46
4.28	Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz au- xética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	46
4.29	Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	47
4.30	Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	47
4.31	Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	48
4.32	Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	48

4.33	Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	49
4.34	Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	49
4.35	Gráficas comparativas de figuras de mérito K_i y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	50
4.36	Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{13} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	50
4.37	Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	51
4.38	Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	51
4.39	Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN	52
4.40	Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética	-
	para inclusiones piezoelectricas hexaedricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezo- eléctricas de KNN	52

Índice de Tablas

2.1	Propiedades de los constituyentes del piezocompuesto para la validación del modelo misromocónico: matriz polimórico y fibro PZT 5. Propiedades extreídas de 101	11
22	Propiedades de los constituyentes del piezocompuesto: matriz de polietileno y fibra KNN	14
		10
4.1	Fracciones volumétricas empleadas para la obtención de resultados	29
4.2	Condiciones de contorno a aplicar, relacionadas con los resultados que proporcionan y	
	los coeficientes que se van a calcular con ellos	30
4.3	Resultados de la CC1	31
4.4	Resultados de la CC2	31
4.5	Resultados obtenidos para la condición de contorno CC3	33
4.6	Valores promedio de la deformación $\overline{\epsilon}_{12}$ y la tensión $\overline{\sigma}_{12}$ obtenidos para diferentes	
	fracciones volumétricas de fibra v_f en la condición de contorno CC4	33
4.7	Resultados obtenidos para la condición de contorno CC5	35
4.8	Resultados obtenidos para la condición de contorno CC6	36

Notación

PZT	Titanato circonato de plomo
KNN	Niobiato de sodio y potasio
CC	Condición de contorno
RVE	Elemento de volumen representativo
V_{RVE}	Volumen representativo del elemento
v_f	Fracción volumétrica de fibra
a_i	Semilongitud del RVE en dirección i
$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	Coeficiente dieléctrico relativo
σ	Matriz de tensiones
ε	Matriz de deformaciones
ϕ	Potencial eléctrico
<i>u</i> _i	Vector de desplazamientos
С	Matriz de coeficientes elásticos
S	Matriz de flexibilidad
e	Matriz de coeficientes piezoeléctricos
d	Matriz de coeficientes piezoeléctricos
ϵ^{ε}	Matriz de coeficientes dieléctricos bajo deformación
	constante
ϵ^{σ}	Matriz de coeficientes dieléctricos bajo tensión constante
D	Matriz de desplazamientos eléctricos
E	Matriz de campo eléctrico
C_{ij}^{eff}	Coeficientes elásticos efectivos
$e_{ij}^{e_{ff}}$	Coeficientes piezoeléctricos efectivos
ϵ_{ii}^{eff}	Coeficientes dieléctricos efectivos
Ĕ	Módulo de Young
G	Módulo de cizalladura
Κ	Módulo de compresibilidad
K_p	Factor de acoplamiento planar
K_t	Factor de acoplamiento electromecánico
<i>8</i> ₃₁	Coeficiente de voltaje piezoeléctrico al aplicar tensión
	según la dirección 1
833	Coeficiente de voltaje piezoeléctrico al aplicar tensión
	según la dirección 3
V	Coeficiente de Poisson
γ_{ij}	Deformación tangencial en el plano <i>ij</i>

1 Introducción

 \mathbf{E}^n el contexto actual de una creciente demanda energética, los avances en el sector de los "materiales inteligentes" son cada vez más relevantes. Es por esto que los materiales piezoeléctricos han ganado popularidad, siendo objeto de numerosos estudios y artículos (como los expuestos en el Boletín vt nº3 del Ministerio de Ciencia e Innovación [11] o por E. L. Pradeesh *et al.* [12]).

En el presente trabajo, se analizarán numéricamente las propiedades de piezocompuestos libres de plomo. Se obtendrán sus propiedades según la influencia de la morfología de la fibra, así como de la auxeticidad de la matriz, en el comportamiento del compuesto. A continuación, se ahonda en la motivación y los objetivos concretos, para finalmente especificar cómo se pretende alcanzarlos.

1.1 Motivación

Los materiales compuestos han demostrado ser fundamentales en múltiples aplicaciones industriales debido a su capacidad para combinar las propiedades de dos o más materiales, creando uno con características optimizadas. Este enfoque permite, por ejemplo, aligerar el peso de estructuras aeronáuticas, como es el caso del uso de compuestos de matriz polimérica, descritos en [1], o fabricar materiales de construcción tan resistentes y competitivos como el hormigón armado. En general, los materiales compuestos se forman a partir de una matriz, que constituye la mayor proporción del material, y una fibra o inclusión que aporta las propiedades mecánicas deseadas. Este esquema se muestra en la Figura 1.1. En los últimos años, con las nuevas técnicas de fabricación aditiva, viene creciendo el desarrollo y el empleo los llamados compuestos piezoeléctrico ([13]). Los piezocompuestos están constituidos por una fase activa piezoeléctrica y una fase no activa que actúa como soporte de aquélla, y que condiciona las propiedades del sistema compuesto. Éstos permiten ampliar las aplicaciones de estos materiales (e.g., actuadores o sensores) a muchos más sectores tecnológicos como como la industria aeroespacial, automotriz, electrónica o biomédica. Este tipo de compuestos serán los estudiados en este trabajo.

La piezoelectricidad, fue descubierta por Pierre y Jacques Curie en 1880 [2]. En ese momento, el fenómeno fue principalmente estudiado en materiales que lo presentaban de forma natural; concretamente, el cristal de cuarzo. Pudieron observar que, ante una deformación mecánica, este se polariza de forma proporcional a la carga aplicada, originando un campo eléctrico. Esto se conoce como efecto piezoeléctrico directo. Más tarde, Gabriel Lippmann comprobó que el fenómeno ocurre también de forma inversa en los mismos cristales de cuarzo. Este nuevo descubrimiento demostraba que, al aplicar un campo eléctrico, se generaba una deformación. Así, se definió también el efecto



Figura 1.1 Esquema de un material compuesto. En él, se aprecian la matriz, el refuerzo y la interfase. La interfase es la zona de unión matriz-refuerzo, que en este trabajo se considera nula al suponerse adherencia perfecta entre la matriz y la fibra. Figura extraída de [1].



Figura 1.2 La Figura (a) ejemplifica el efecto piezoeléctrico directo. En él, se aplica una deformación que da como resultado un campo eléctrico. Análogamente, la Figura (b) explica el efecto piezoeléctrico inverso. En este, como resultado de la aplicación de un campo eléctrico, se obtiene una deformación mecánica. Figuras extraídas de [2].

piezoeléctrico inverso. Estos dos efectos se sintetizan en la Figura 1.2.

El efecto piezoeléctrico, como detallan Etienne Balmes y Arnaud Daraemaeker [2], en los cristales naturalmente piezoeléctricos, ocurre como consecuencia de la distorsión de la estructura cristalina. Al aplicar una deformación sobre esta estructura, se distorsiona creando dipolos eléctricos. Como consecuencia de ellos, se genera un campo eléctrico. Esto ocurre en cristales no ferroeléctricos, como los de cuarzo. Tras su descubrimiento, se comenzaron a plantear sus usos y aplicaciones. Estos incluyen no solo a la ingeniería, como podría pensarse. Muchos otros ámbitos, como el de la Medicina, se pueden beneficiar del estudio y uso de este tipo de materiales. Un ejemplo de ello es la imagino-logía médica por ultrasonido de pulso-eco, una técnica novedosa y poco invasiva de diagnóstico [10].

Sin embargo, los materiales piezoeléctricos por naturaleza (cristales no ferroeléctricos), no lo son de forma muy acusada. Es por ello que lo más común es emplear cristales ferroeléctricos, cerámicas o polímeros a los que se ha inducido la piezoelectricidad. Para hacerlos, se usa polvo de materiales ferroeléctricos que se somete a una sinterización, en la que se llega a la temperatura de Curie. Tras esto, la estructura interna queda conformada por granos de forma aleatoria, que se reordenarán al someterse a una deformación. Esto se muestra en la Figura 1.3. Los granos se organizan en dominios, que se ordenan al aplicar deformación. Esto provoca la polarización necesaria para obtener el efecto piezoeléctrico.



Figura 1.3 Orientación de los granos de un material ferroeléctrico, agrupados en dominios, previa a la aplicación de un campo eléctrico. Tras ella, todos toman la misma orientación. Figura extraída de [2].

Desde su descubrimiento, los materiales piezoeléctricos se han utilizado en una amplia variedad de dispositivos, que van desde mecheros, donde la deformación de la piedra piezoeléctrica genera una diferencia de potencial que produce una chispa [11], hasta sensores en sistemas de airbags. En general, los dos usos más comunes son como sensores y como actuadores. Según el fin que se persiga, se emplea un tipo de piezoeléctrico u otro. Debido a su alta rigidez y ductilidad, los materiales piezocerámicos suelen estar presentes en actuadores. El elevado módulo de elasticidad que presentan permite un fácil acoplamiento a la estructura. Por el contrario, para los sensores, es conveniente que el material elegido no añada rigidez a la estructura que se pretende monitorear. Es por ello que para este uso, se emplean habitualmente piezopolímeros. Estos se presentan en la mayoría de ocasiones en láminas.

Un campo sobre el que ha habido un gran desarrollo en los últimos años es el uso de piezoeléctricos como colectores de energía (también llamados *energy harvesting*, denominación que se empleará de este punto en adelante). Numerosos artículos han ahondado en este prometedor campo, como el llevado a cabo por E. L. Pradeesh *et al.* [12]. Como se mencionaba al comienzo de este capítulo, introducir nuevas formas de producción de energía es crucial. Considerando que los materiales piezoeléctricos tranforman deformaciones mecánicas en carga eléctrica, resulta muy interesante explorar esto como fuente energética. Los enery harvesting comenzaron empleando la idea de transformar energía mecánica en eléctrica para cargar pequeños dispositivos. Tras estos primeros dispositivos, gracias al avance de la tecnología, se han podido desarrollar otros de mayor capacidad.

A pesar de sus numerosas ventajas, muchos de los materiales piezoeléctricos más comunes contienen plomo, lo que ha generado preocupación en los últimos años. En particular, el titanato circonato de plomo, $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT, por sus siglas en inglés), ha sido uno de los más utilizados debido a sus elevados coeficientes piezoeléctricos. Como se muestra en la Figura 1.5, el PZT presenta el mayor coeficiente piezoeléctrico d_{33} entre los materiales más empleados. No obstante, la toxicidad del plo-



- (c)
- Figura 1.4 Las Figuras (a) y (b) corresponden a un mechero y un airbag, ambos con actuadores piezoeléctricos. En el caso del mechero, la deformación de la piedra genera una diferencia de potencial que provoca una chispa; y el airbag es activado al deformarse el piezoeléctrico del interior. Respecto a la Figura (c), se trata de sensores piezoeléctricos. Estos dispositivos se emplean para medir deformaciones mediante el campo eléctrico.

mo ha impulsado la búsqueda de alternativas más seguras, como se discute en varios estudios ([14], entre otros). En este trabajo, se abordará el uso de dichas alternativas, analizando específicamente las propiedades de una de ellas: el niobiato de sodio y potasio, (KNN). Este material, libre de sustancias nocivas, ha sido estudiado con éxito previamente, como en el trabajo de Liao Qiao *et al.* [15].

Otra propiedad que se utiliza para mejorar las prestaciones de los piezocompuestos es la auxeticidad. Aunque este fenómeno no es el foco principal de este trabajo, su inclusión en los estudios permitirá analizar su influencia en las propiedades mecánicas de los materiales. Los materiales auxéticos se caracterizan por presentar un coeficiente de Poisson negativo (v < 0), lo que significa que, al ser sometidos a una tracción uniaxial, en lugar de contraerse lateralmente, se expanden. Este comportamiento inusual se debe a su estructura interna, que suele estar formada por geometrías reentrantes o patrones estructurales que permiten la expansión lateral bajo tracción, como se puede observar en la Figura 1.6.

Los materiales auxéticos han atraído un interés creciente debido a las ventajas que presentan



Figura 1.5 Comparación de coeficiente piezoeléctrico d_{33} entre algunos de los materiales piezoeléctricos más empleados. Figura extraída de [3].



Figura 1.6 Estructura no auxética (hexagonal cell), frente a auxética (inverted hexagonal cell). En la no auxética, al comprimir según h_2 la celda hexagonal, en la dirección h_1 se produce un alargamiento. Sin embargo, al hacer lo mismo en la estructura auxética, la distancia h_1 se reducirá. Figura extraída de [4].

en diversas aplicaciones. Por ejemplo, su capacidad para expandirse lateralmente al estirarse los hace útiles en áreas donde se requiere una mayor absorción de energía, mayor resistencia al corte, o una mejora en el comportamiento frente a fracturas. En el contexto de los piezocompuestos, el uso de una matriz auxética podría ofrecer mejoras en la transferencia de tensiones y deformaciones, optimizando así las respuestas piezoeléctricas. Para obtener una comprensión más profunda de estos materiales y sus aplicaciones, se recomienda la lectura de trabajos como el de Jagdish A Krishnas-wamy *et al.* [4], que explora a fondo las propiedades y el comportamiento de los materiales auxéticos.

En conclusión, la motivación de este estudio es el gran interés de los compuestos piezoeléctricos libres de plomo. La toxicidad de este material pone de manifiesto la necesidad de buscar alternativas, que pretenden ser estudiadas en este trabajo.

1.2 Objetivos

Una vez concluida la motivación de este proyecto, se pasa a definir los objetivos concretos que se pretenden alcanzar. En esta sección, se presentará cada uno de ellos, así como las tareas concretas para alcanzarlos.

Modelado y análisis de piezocompuestos en Ansys

El primer objetivo es poder modelar los compuestos piezoeléctricos a estudiar. Para ello, han de llevarse a cabo los siguientes pasos:

- Definición del volumen a modelar. En este trabajo, se hace uso del elemento de volumen representativo (RVE por sus siglas en inglés). Este volumen se modela empleando el software Ansys; concretamente, su módulo Mechanical APDL.
- Definición del piezocompuesto empleado en Ansys. Para ello, más adelante se especificarán las propiedades a analizar.
- Realización del análisis numérico del RVE empleando el Método de los Elementos Finitos.
- Validación de los resultados comparando los obtenidos con otros ya contrastados. Para ello, se hace uso del artículo de Berger *et al* [9].
- Obtención de propiedades electromecánicas. Empleando las ecuaciones de comportamiento de los piezocompuestos, se calculan las propiedades del material estudiado.

Análisis de datos obtenidos

Una vez obtenidas las propiedades electromecánicas mediante el análisis numérico, han de analizarse. Para ello, mediante gráficas, se compararán los resultados según:

- Morfología de la fibra y conectividad
- Auxeticidad de la matriz

En ambos casos, además de las propiedades electromecánicas más relevantes, se hará uso de las figuras de mérito. Estas figuras tienen como objetivo cuantificar la idoneidad de cada piezoeléctrico según su aplicación. Una vez calculadas las figuras de todos los resultados, se presentan en forma de gráfica con el fin de analizarlos.

1.3 Organización del documento

Este documento se organiza en 5 capítulos, incluyendo al final del mismo dos anexos con códigos. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos, con el fin de facilitar al lector la comprensión y uso de este trabajo.

• **Capítulo 1. Introducción** En este capítulo se presentarán los objetivos y la motivación detrás del trabajo. Se introducirá el contexto de los materiales compuestos, y en particular, de los piezocompuestos, que serán el foco de este estudio. Además, se explicará la relevancia del análisis de estos materiales en la ingeniería y se establecerán las bases para los estudios posteriores.

- Capítulo 2. Comportamiento de los compuestos piezoeléctricos Este capítulo desarrollará las ecuaciones constitutivas que rigen el comportamiento de los piezocompuestos estudiados. Se expondrán las hipótesis asumidas y se detallarán las propiedades elásticas y piezoeléctricas de los materiales empleados. Asimismo, se caracterizarán los materiales utilizados a lo largo del estudio, proporcionando las constantes relevantes para el análisis.
- Capítulo 3. Modelización micromecánica de compuestos piezoeléctricos En este capítulo se describirá el Método del Elemento de Volumen Representativo (RVE), que constituye la base del análisis numérico realizado en este trabajo. Se explicará cómo se ha modelizado el comportamiento de los piezocompuestos empleando este método y se detallarán las consideraciones adoptadas para representar adecuadamente las inclusiones piezoeléctricas en la matriz.
- Capítulo 4. Resultados Este capítulo se centrará en la presentación y análisis de los resultados obtenidos. Los datos se mostrarán en forma de tablas y gráficas, acompañados de discusiones y conclusiones preliminares que faciliten su interpretación. Además, se validarán los resultados comparándolos con estudios previos en la literatura, destacando los factores clave que influyen en las propiedades de los materiales estudiados.
- Capítulo 5. Conclusiones finales y resumen Por último, en este capítulo se sintetizarán las conclusiones del trabajo y se presentará un resumen de las más importantes. A partir de los resultados, se propondrán futuras líneas de investigación orientadas a optimizar las propiedades de los piezocompuestos y a explorar nuevas configuraciones y materiales con los que mejorar sus prestaciones.

2 Comportamiento de los compuestos piezoeléctricos

En este capítulo se definen las ecuaciones tenidas en cuenta en todo el documento, así como las propiedades de los diferentes materiales empleados. También se explicarán de forma detallada los métodos empleados en el trabajo para el análisis de resultados.

La notación en la que se basa esta ha sido extraída de incluir referencia de E.C Nelli Silva *et al.* [16].

2.1 Acoplamiento y conectividad

Tal y como se explicó anteriormente, para el estudio de los piezocompuestos libres de plomo se buscan alternativas al PZT no solo mediante los materiales, sino también con las diferentes configuraciones del material compuesto. Es interesante notar cómo para diferentes aplicaciones resulta más adecuado un tipo de piezoeléctrico u otro, variando el acoplamientos y la conectividad de los mismos.

En primer lugar, se analiza el acoplamiento. Este hace referencia al sentido en el que se aplica el esfuerzo, y viene representado en la Figura 2.1. Aplicando la fuerza en el mismo sentido que la polarización, se obtiene un acoplamiento 33. Si, al contrario, la fuerza se aplica de forma perpendicular, es tipo 31. Estos últimos tienen coeficientes de acoplamiento menores que los tipo 33, por lo que en principio serían menos recomendables. Sin embargo, la manera de aplicación de la carga hace que la deformación sea mayor, compensando así su menor coeficiente. Esto los hace ideales para aplicaciones donde la energía de entrada es pequeña; ya que pueden generar mayor potencia con menores entradas. Sin embargo, si la entrada es mayor, un acoplamiento 33 será el idóneo. Estos razonamientos habrá que tenerlos en cuenta al analizar los resultados presentados en este trabajo, ya que las propiedades adecuadas para unas aplicaciones no lo son para otras.

Respecto a la conectividad, esta refleja el modo en que las inclusiones están presentes en la matriz. En la Figura 2.2 se muestran los tres tipos más comunes que hay. Estos son los siguientes:

- **Conectividad 0-3**. Las inclusiones piezoeléctricas se encuentran embebidas en la matriz de forma dispersa, sin interconexión entre ellas (conectividad 0). La matriz no piezoeléctrica es continua, presentando una conectividad 3.
- **Conectividad 1-3**. Las fibra piezoeléctricas se ordenan en columnas, todas orientadas en la misma dirección (conectividad 1). Por su parte, la matriz continúa presentando conectividad 3.



Figura 2.1 Tipos de acoplamiento de piezoeléctricos. El acoplamiento 33 consiste en la aplicación de la fuerza en el mismo sentido que la polarización. El acoplamiento 31, por su parte, implica que la fuerza que deforma el material y la polarización tienen sentidos perpendiculares. Figura extraída de [2].

Tal como describen Cañamero *et al.* en [14], esta conectividad permite que la matriz transmita la carga a la fibra, confiriéndole esto un mayor acoplamiento electromecánico respecto a la conectividad 0-3.

• **Conectividad 2-2**. En este caso, tanto el material piezoeléctrico como la matriz no piezoeléctrica presentan una conectividad bidimensional (o de tipo 2). Ambos materiales se presentan en láminas o capas intercaladas, de manera que no hay conectividad en la capa perpendicular al plano.

2.2 Ecuaciones constitutivas

Es importante fijar la notación y la forma de las ecuaciones, ya que al consultar la literatura existente, es común ver variaciones en la forma de expresar unas mismas ecuaciones. También es muy esclarecedor de cara a la comprensión de los procesos empleados en este trabajo.

En adelante, se considerará que los materiales piezoeléctricos tienen un comportamiento lineal ante cambios en los campo mecánico o eléctricos. No se considerarán los cambios de temperatura y campo magnético. Con todo esto, las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos que relacionan la deformación con el campo eléctrico son las siguientes:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = C^E_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = e_{ikl} \varepsilon_{kl} + \epsilon^{\varepsilon}_{ik} E_k \end{cases}$$
(2.1)



Figura 2.2 La Figura (a) muestra el tipo de conectividad 0-3, en la que las inclusiones se distribuyen de forma dispersa, sin interconexión entre ellas. La Figura (b) representa la conectividad 1-3, en la que las fibras piezoeléctricas se orientan todas en una misma dirección. Por último, en la Figura (c) se observa el tipo de conectividad 2-2, en la que tanto el material piezoeléctrico como la matriz comparten una conectividad bidimensional. Figura extraída de [3].

Donde σ_{ij} y ε_{ij} son las tensiones y deformaciones elásticas, respectivamente, c_{ikjl} los coeficientes elásticos; D_i representa los desplazamientos eléctricos, E_k el campo eléctrico, e_{ijk} son los coeficientes piezoeléctricos y $\epsilon_{ik}^{\varepsilon}$, los coeficientes de permisividad dieléctrica. El superíndice de este último cobrará relevancia cuando se describa la otra forma de expresar las ecuaciones constitutivas.

El valor de ϵ está relacionado con la carga que puede almacenar el material ([17]). Además, normalmente su valor se expresa de forma unitaria. Para ello, se divide entre el valor de ϵ_0 , que es la carga que los electrodos pueden almacenar en el vacío. Su valor numérico es $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$.

Para mayor comodidad, se puede hacer uso de la notación de Voigt para expresar las ecuaciones 2.1.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \\ \boldsymbol{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}^{\boldsymbol{E}} & -\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{T}} \\ \boldsymbol{e} & \boldsymbol{\epsilon}^{\boldsymbol{\varepsilon}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{E} \end{bmatrix}$$
(2.2)

Debe tenerse en cuenta que el superíndice T indica que la matriz está traspuesta. La notación de Voigt se puede expresar también a la inversa, que será necesario para representar las figuras de mérito.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}^{\boldsymbol{E}} & \boldsymbol{d} \\ \boldsymbol{d}^{\boldsymbol{T}} & \boldsymbol{\epsilon}^{\boldsymbol{\sigma}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \\ \boldsymbol{E} \end{bmatrix}$$
(2.3)

En el caso de la ecuación 2.3, S es la matriz de flexibilidad, y d la matriz de coeficientes piezoeléctricos. Esta última matriz relaciona directamente la energía mecánica aplicada con el desplazamiento eléctrico generado, o viceversa. Estos valores inversos serán especialmente útiles para el cálculo de las figuras de mérito; y se relacionan con los primeros mediante una serie de expresiones.

$$\boldsymbol{S}^{E} = (\boldsymbol{C}^{E})^{-1} \tag{2.4}$$

$$\epsilon^{\sigma} = \epsilon^{\varepsilon} + \boldsymbol{d}\boldsymbol{e}^{T} \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{e}\boldsymbol{S}^E \tag{2.6}$$

Todas las expresiones anteriormente indicadas son válidas para cualquier material piezoeléctrico. Para el caso tratado en este trabajo, todos los materiales son transversalmente isótropos. Esto implica la existencia de un eje de simetría por el que pasan infinitos planos de simetría elástica. En ellos, solo 11 constantes bastan para definirlos.

$$\boldsymbol{C}^{E} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$
(2.7)

$$\boldsymbol{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0\\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0\\ e_{13} & e_{13} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(2.8)

$$\epsilon^{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0\\ 0 & \epsilon_{11} & 0\\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix}$$
(2.9)

$$\boldsymbol{S}^{E} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}$$
(2.10)
$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{13} & d_{13} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 Prestaciones de los piezocompuestos

El principal objetivo de los estudios de este trabajo es la caracterización de piezocompuestos para analizar sus propiedades. E. L- Pradeesh *et al.* [12] hace referencia un concepto crucial de los piezoeléctricos, como es el coeficiente de acoplamiento electromecánico. Este establece la proporción de energía mecánica que pasa a energía eléctrica. Cuanto mayor sea, mejor será el rendimiento. En este trabajo, el acoplamiento se definirá mediante figuras de mérito, definidas en la norma EN 50324-2 [5].

Mediante el uso de figuras de mérito se cuantifica la idoneidad de cada piezoeléctrico según la aplicación. Dentro de estas, hay dos tipos de figuras: K y g. Mientras K relaciona directamente la energía de entrada con la de salida, no pudiendo su valor superar la unidad; g representa el campo eléctrico creado ante una deformación unitaria. De forma general, serían:

$$K^2 = \frac{\text{energía de salida}}{\text{energía de entrada}}$$
(2.12)

$$g = \frac{\text{campo eléctrico salida}}{\text{deformación unitaria de entrada}}$$
(2.13)

Como resulta evidente, el valor de *K* nunca podrá ser superior a la unidad. Para cerámicas piezoeléctricas presenta unos valores de entre 0.3 y 0.75, según la carga aplicada (Mustafa Kurt

		æ			1			1
Transverse length	Ŷ	C	53	ε ₃₃ '				
mode		f_r, f_a	16	\mathbf{s}_{11}^{E}	21	$\mathbf{s}_{11}^{\mathbf{D}}$		
			37	k ₃₁	45	d ₃₁	46	g31
	6							
Radial mode	٩	CT	53	ϵ_{33}^{T}	55	$\epsilon_{33}^{\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $		
		f_r,f_a	38,41	k _p	26	σ^{E}	25	$\mathbf{s_{12}}^{\mathrm{E}}$
	0							
Thickness	Ŷ	\mathbf{f}_{m}						
extension mode		f_r,f_a	42	k,	55	ε ₃₃ ^S		
			19	c33 ^D	24	c33 ^E	28	$\mathbf{s_{13}}^{\mathrm{E}}$
	6			1		1		1
Longitudinal	÷	f _r , f _a	43	k ₃₃	47	d ₃₃	48	g ₃₃
length mode			17	s33 ^D	22	s33 ^E		1
		\mathbf{C}^{T}	53	$\epsilon_{33}{}^T$				
	→ →			ĺ				
Thickness shear	es i	f _r , f _m	44	k ₁₅	49	d ₁₅	50	g15
mode			18	855 ^D	23	855 ^E	20	c 55
		C^T	54	ϵ_{11}^{T}	56	$\epsilon_{11}^{\ \ S}$	20	c55 ^E
	6			1				

Figura 2.3 Figuras de mérito según los esfuerzos a los que se somete a la pieza y la forma de la misma. Figura extraída de [5].

[17]). En sistemas piezoeléctricos bien diseñados, este factor puede llegar a tomar un valor de 0.9. Respecto a g, resulta de gran utilidad en el diseño de sensores, al relacionar el campo eléctrico con la deformación. Es decir, es una medida de la sensibilidad, ya que un valor alto de g implica que, ante una deformación pequeña, el campo eléctrico es alto.

Además, según el tipo de esfuerzo al que se someta al material para obtener energía, se definen los diferentes tipos de figuras de mérito. Para ello, se tiene en cuenta el sentido de la deformación y del campo eléctrico. Los diferentes modos se representan en la Figura 2.3.

Las figuras de mérito que resultan de interés en este trabajo son K_t y g_{33} , que hacen referencia a un campo eléctrico y a una deformación en dirección 3; y K_p y g_{31} , que se refieren a un campo eléctrico en dirección 3 y una deformación en dirección 1. De este modo, se cubre el caso de esfuerzo perpendicular a la pieza y de esfuerzo cortante. Estas figuras serán muy útiles para poder comparar de forma clara la respuesta de los diferentes casos contemplados en el trabajo.

$$K_p = \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{33}^{\varepsilon}}{\epsilon_{33}^{\sigma}} \frac{C_{33}^D}{C_{33}^E}}$$
(2.14)

$$K_t = \sqrt{1 - \frac{C_{33}^E}{C_{33}^D}} \tag{2.15}$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^{\sigma}} \tag{2.16}$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^{\sigma}} \tag{2.17}$$

2.4 Compuestos piezoeléctricos a estudiar

A continuación, se presentan las propiedades de los compuestos piezoeléctricos estudiados en este proyecto. Para ello, en primer lugar se definirá el piezocompuesto empleado para la validación del modelo micromecánico, con fibras de $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT) y matriz polimérica. Tras esto, se detallarán las propiedades del piezocompuesto libre de plomo a estudios: fibra de $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ (KNN) en matriz de polietileno.

Fibra PZT y matriz polimérica

La validación del modelo micromecánico se hará comparando los resultados obtenidos por Berger *et al.* [9] con los obtenidos mediante el modelo micromecánico empleado en este trabajo. Para ello, se debe emplear el mismo material que se emplea en el artículo. Las propiedades de este compuesto han sido extraída de Berger *et al.* [9], y se presentan en la Tabla 2.1.

Fibra de KNN y matriz de polietileno

A continuación, se presentarán las propiedades del material que es objeto principal de este proyecto. Como se mencionó en el Capítulo 4, se harán estudios en matriz auxética y no auxética. Es por esto que se definen las propiedades de la matriz con coeficientes de Poisson tanto positivos como negativos. Las propiedades de la matriz se extraen de J A Krishaswamy *et al.* [4]. Así, se pueden determinar en función del coeficiente de Poisson (v) y el módulo de Young (E).

$$\lambda_m = \frac{E_m v_m}{(1 + v_m)(1 - 2v_m)}$$
(2.18)

$$\mu_m = \frac{E_m}{2(1+\mathbf{v}_m)} \tag{2.19}$$

Con estos valores, se pueden calcular los coeficientes elásticos.

$$C_{11} = \lambda_m + 2\mu_m \tag{2.20}$$

$$C_{13} = \lambda_m \tag{2.21}$$

$$C_{33} = \lambda_m + 2\mu_m \tag{2.22}$$

$$C_{44} = \mu_m \tag{2.23}$$

Respecto a la fibra de KNN, las propiedades son las empleadas en Liao Qiao *et al.* [15]. Los coeficientes dieléctricos y piezoeléctricos aparecen en este mismo artículo. De esta forma, se obtiene una tabla análoga a la anterior, presentada en la Tabla 2.2.

 Tabla 2.1
 Propiedades de los constituyentes del piezocompuesto para la validación del modelo micromecánico: matriz polimérica y fibra PZT-5. Propiedades extraídas de [9].

	$C_{11} (10^{10})$	$C_{12} (10^{10})$	$C_{13} (10^{10})$	$C_{33} (10^{10})$	$C_{44} (10^{10})$	$C_{66} (10^{10})$	e ₁₅	<i>e</i> ₃₁	e ₃₃	$\epsilon_{11} (10^{-9})$	$\epsilon_{33} (10^{-9})$
PZT-5	12.1	7.54	7.52	11.1	2.11	2.28	12.3	-5.4	15.8	8.11	7.35
Polímero	0.386	0.257	0.257	0.386	0.064	0.064	-	-	-	0.07965	0.07965
	$C_{11} (10^8)$	$C_{12} (10^8)$	$C_{13} (10^8)$	C_{33} (10 ⁸)	C_{44} (10 ⁸)	C_{66} (10 ⁸)	e ₁₅	e ₃₁	e ₃₃	$\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_0}$	$\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0}$
-------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------------------------	------------------------------------
KNN	1362	862	659	985	228	250	15.6	-11.2	15.9	1100	975
$Polietileno^{v=0.2}$	1.1111	0.27778	0.27778	1.1111	0.41667	0.41667	-	-	-	2.3	2.3
$Polietileno^{v=-0.32}$	1.1836	-0.28694	-0.28694	1.1836	0.73529	0.73529	-	-	-	2.3	2.3

 Tabla 2.2
 Propiedades de los constituyentes del piezocompuesto: matriz de polietileno y fibra KNN.

Con estos datos, quedarían definidas las propiedades de los materiales y las ecuaciones empleadas en este trabajo.

3 Modelización micromecánica de compuestos piezoeléctricos

En este capítulo se presentarán las ideas principales tenidas en cuenta para la modelización micromecánica de los piezocompuestos a estudiar en este trabajo. En primer lugar, se explicará el concepto de Elemento de Volumen Representativo o RVE (por sus siglas en inglés). Tras esto, se definirá el concepto de homogenización numérica y condiciones de contorno periódicas. Por último, se explicará el Método de los Elementos Finitos, y la implementación del RVE mediante el software Ansys.

3.1 Concepto de Elemento de Volumen Representativo o RVE

El RVE es un método empleado en el estudio de materiales compuestos cuyo fin es simplificar el análisis numérico de los mismos. En él, se busca obtener un volumen representativo o celda unitaria de las propiedades de la microestructura del material a estudiar. El método del elemento de volumen representativo (RVE) se emplea para elaborar modelos micromecánicos de un material heterogéneo que permitan obtener las propiedades de dicho material a partir de un elemento de volumen representativo o celda unitaria que contiene las características principales de la microestructura del material. El concepto de RVE fue definido por Hill [18] como una muestra de material heterogéneo que cumpliera las siguientes consideraciones:

- Ser representativo de todo el compuesto, por lo que tendrá que ser global o estadísticamente homogéneo.
- Contener inclusiones lo suficientemente pequeñas y en cantidad adecuada para que las propiedades de los constituyentes sean independientes de los valores superficiales de tensión y desplazamiento.

Para una buena elección del RVE se debe alcanzar una solución de compromiso entre un volumen que represente correctamente las propiedades del material, y un volumen que pueda ser analizado numéricamente. La elaboración de un RVE es un proceso crítico ya que con dicho elemento se está reemplazando un material heterogéneo con un material homogéneo equivalente. Este hecho implica que el volumen representado debe ser lo suficientemente grande como para representar la microestructura sin introducir propiedades macroscópicas no existentes, y a la vez lo suficientemente pequeño como para ser analizado analíticamente o numéricamente.

Respecto a un material compuesto, un RVE representa dicho material mediante un elemento diferencial del mismo, el cual debe tener las mismas propiedades y fracción de volumen que el



Figura 3.1 Tipología de las celdas empleadas en este trabajo como RVE. Figura extraída de [6]. compuesto.

Teniendo esto en cuenta, para este trabajo, se han supuesto compuestos periódicos, de manera que se pueden caracterizar haciendo uso de una celda de tamaño unitario como la mostrada en la Figura 3.1. Además, las fibras se orientarán siempre según la dirección y_1 .

Una vez estudiado el volumen mediante las técnicas pertinentes, estas se extrapolan al compuesto completo. Para ello, se hace uso de los métodos de homogeneización numérica.

3.2 Homogeneización y condiciones de contorno periódicas

Dado que los materiales compuestos tienen carácter heterogéneo, sus propiedades no son las mismas a lo largo de todo su volumen. Esto complica enormemente cualquier análisis, haciendo necesario el uso de métodos como el de la homogeneización.

La homogeneización consiste en la obtención de unas propiedades homogéneas partiendo de un material compuesto; es decir, heterogéneo. Estas propiedades toman el nombre de "propiedades efectivas del material". Para poder obtenerlas, deben cambiarse las variables del problema electromecánico acoplado. Al hacerlo, la ecuación de Voigt 2.2 queda como se expresa en la expresión 3.1.

$$\begin{bmatrix} \overline{\boldsymbol{\sigma}} \\ \overline{\boldsymbol{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}^{eff^{E}} & -\boldsymbol{e}^{eff^{T}} \\ \boldsymbol{e}^{eff} & e^{eff^{\varepsilon}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ \overline{\boldsymbol{E}} \end{bmatrix}$$
(3.1)

Donde C^{eff} , e^{eff} y ϵ^{eff} son coeficientes efectivos y $\overline{\sigma}$, \overline{D} , $\overline{\epsilon}$ y \overline{E} son valores medios. En la expressión 3.2 se muestran todos los coeficientes a obtener.



Figura 3.2 Esquema del análisis local-global. Figura extraída de [6].

$$\begin{bmatrix} \overline{\sigma}_{11} \\ \overline{\sigma}_{22} \\ \overline{\sigma}_{33} \\ \overline{\sigma}_{23} \\ \overline{\sigma}_{31} \\ \overline{D}_{1} \\ \overline{D}_{2} \\ \overline{D}_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{eff^{E}} & C_{12}^{eff^{E}} & C_{13}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13}^{eff} \\ C_{12}^{eff^{E}} & C_{11}^{eff^{E}} & C_{13}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13}^{eff} \\ C_{13}^{eff^{E}} & C_{13}^{eff^{E}} & C_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33}^{eff} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & -e_{15}^{eff} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^{eff^{E}} & 0 & -e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^{eff^{E}} & 0 & -e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^{eff^{E}} & 0 & e_{11}^{eff^{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & e_{11}^{eff^{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & e_{11}^{eff^{E}} & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & e_{13}^{eff^{E}} \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{11}^{eff^{E}} \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{11}^{eff^{E}} \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & e_{33}^{eff^{E}} & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & 0 \\ e_{13}^{eff^{E}} & e_{13}^{eff^{E}} & 0 \\ e_{15}^{eff^{E}} & e_{13}^{ef$$

Para predecir las propiedades efectivas de un material compuesto a partir de las propiedades de sus constituyentes, se emplean las llamadas técnicas de homogeneización. Estas técnicas ofrecen una alternativa o complemento a la determinación experimental de las propiedades y se basan en un enfoque multiescala del material. Este enfoque se divide en dos escalas: una microscópica, que considera las inhomogeneidades del material, y una macroscópica, en la que el material se asume como homogéneo.

En este trabajo, la metodología empleada será la homogeneización numérica. Esta implica un análisis local-global del material sobre el elemento de volumen representativo o RVE. Para este análisis, se contemplan dos etapas: local y global. Cada una de ellas puede ser tratada como un problema independiente.

- Análisis local Se toma el punto macroscópico x de la Figura 3.2. Mediante el análisis global, se puede modelar un RVE de la microestructura en ese punto. Con este volumen representativo, y mediante la aplicación de condiciones de contorno adecuadas, se puede resolver el problema elástico en todos los puntos de y (escala microscópica). De esta forma, se pueden conocer las propiedades efectivas en todos los puntos microscópicos del material.
- Análisis global Una vez conocidas las propiedades efectivas en cada uno de los puntos del material, se puede aplicar un análisis global para considerar todo el compuesto como homogéneo.

Para poder obtener los resultados del análisis local-global, han de resolverse las ecuaciones presentadas en el Capítulo 2. Dado que para la homogeneización numérica se tienen en cuenta valores medios de la tensión y la deformación, se consideran definiciones como ecuaciones 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.

$$\overline{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}} \sigma_{ij} \, dV \tag{3.3}$$

$$\overline{\varepsilon_{ij}} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}} \varepsilon_{ij} dV$$
(3.4)

$$\overline{E}_{i} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}} E_{i} dV$$
(3.5)

$$\overline{D_i} = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}} D_i \, dV \tag{3.6}$$

Estos valores medios se consideran constantes a lo largo de todo el volumen del RVE, siempre que sean puntos alejados de la frontera. Sin embargo, presentarán variaciones con respecto a los valores concretos. Estas perturbaciones se suponen también periódicas. Por lo tanto los valores finales de tensión y deformación incluirán un término de su valor medio y otro de la perturbación periódica.

$$\boldsymbol{\sigma}_i = \overline{\boldsymbol{\sigma}_i}(\boldsymbol{y}) + \boldsymbol{\sigma}_i^p(\boldsymbol{x}) \tag{3.7}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \overline{\boldsymbol{\varepsilon}_i}(\boldsymbol{y}) + \boldsymbol{\varepsilon}_i^p(\boldsymbol{x}) \tag{3.8}$$

$$\boldsymbol{E}_{i} = \overline{\boldsymbol{E}_{i}}(\boldsymbol{y}) + \boldsymbol{E}_{i}^{p}(\boldsymbol{x})$$
(3.9)

$$\boldsymbol{D}_i = \overline{\boldsymbol{D}_i}(\boldsymbol{y}) + \boldsymbol{D}_i^p(\boldsymbol{x}) \tag{3.10}$$

Para cerrar el sistema y resolver estas ecuaciones, deben imponerse las condiciones de contorno. Considerando la periodicidad antes mencionada del material, que además queda patente en las Figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, estas condiciones serán también periódicas.

3.2.1 Condiciones de contorno periódicas

Para el caso que ocupa este trabajo, las condiciones de contorno se establecen imponiendo una deformación media y un campo eléctrico medio conocidos. Dada la periodicidad del material a emplear, las condiciones de contorno lo serán igualmente. Estas vienen determinadas por la forma expresada en la ecuación 3.11.

$$u_i = \overline{\varepsilon}_{ij} x_j + v_i \tag{3.11}$$

En esta expresión, $\overline{\varepsilon}_{ij}$ es la deformación media y v_i es la parte periódica de las componentes del desplazamiento dependiente del estado global de las cargas aplicado. Dada la periodicidad del RVE, en las caras opuestas del mismo, el valor de v_i será el mismo. Así, teniendo en cuenta la expresión 3.11, las condiciones de contorno a imponer son:

$$u_i^{K+} - u_i^{K-} = \overline{\varepsilon}_{ij} (x_j^{K+} - x_j^K)$$
(3.12)

$$\phi_i^{K+} - \phi_i^{K-} = \overline{E}_i (x_j^{K+} - x_j^K)$$
(3.13)



Figura 3.3 Ejemplo de discretización de dominio para aplicar el MEF.

En estas ecuaciones, los superíndices K+ y K- representan las dos caras opuestas del RVE, que tienen un vector normal paralelo al eje j. Por tanto, hay tres pares de caras en el volumen representativo.

La aplicación de estas condiciones de contorno (abreviadas CC) para la resolución de 3.1 conduce a la obtención de las propiedades efectivas del compuesto piezoeléctrico. Para ello, se presentan dos opciones: la resolución mediante la imposición de una deformación y campo eléctrico medios constantes o la imposición de tensión y desplazamientos eléctricos medios constante. Todas las definiciones de estos valores medios vienen dados por las expresiones 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. Para la elaboración de los estudios presentados en este trabajo, se ha resuelto el problema imponiendo una deformación media constante $\overline{\varepsilon}_i j$ y un campo eléctrico medio constante \overline{E}_i .

3.3 El Método de los Elementos Finitos e implementación mediante Ansys

A lo largo de los años, el campo del estudio de los materiales y las estructuras ha ido evolucionando a grandes pasos. Sin duda, uno de los avances que marcó la investigación y el desarrollo fue el desarrollo del Método de los Elementos Finitos (abreviado MEF). Este método, basado en la discretización de los elementos a estudiar, permite realizar complejos análisis que, manualmente, hubieran sido impensables.

El MEF es un método numérico aplicado en el campo de los medios continuos. Hace uso de la discretización de los elementos que componen el modelo a estudiar, y, aplicando las condiciones de contorno adecuadas, lo resuelve. Para ello, divide el medio continuo, llamado dominio, en un número finito de subdominios. Estos subdominios toman el nombre de elementos. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de discretización en subdominios de una pieza, para la aplicación del MEF. Los elementos se unen entre sí mediante nodos, que los relacionan mediante *funciones de interpolación*. Mediante estas funciones, y teniendo en cuenta la ley de comportamiento del material o materiales empleados, se obtienen las soluciones nodales. Estas soluciones permiten obtener el resto de resultados del dominio completo. En este trabajo, el MEF se aplica haciendo uso del software Ansys, concretamente, su módulo Mechanical APDL.

Sin embargo, el modelado en Ansys no es algo sencillo. Además, cuanto mayor sea este, mayor capacidad de computación será necesaria para resolverlo. Por lo tanto, la decisión del modelo a usar es básica para un buen resultado: será aquella que no comprometa ni la fiabilidad de los resultados



Figura 3.4 RVE para fibra circular, orientada según a_1 .

ni la capacidad computacional disponible. Para este caso, el modelo micromecánico empleado es el Método del Elemento de Volumen Representativo, o RVE. Además, para optimizar al máximo el cálculo computacional, tal como sugieren Berger *et al.* [9], se empleará también el concepto de homogeneización numérica.

Los resultados obtenidos de este software son tensiones, deformaciones y desplazamientos eléctricos. En las secciones siguientes, se describirá cómo se analizan estos valores.

3.4 Modelización del RVE e implementación numérica

Para el estudio que se realiza en este trabajo, se analizan cuatro tipos de morfología de fibra: fibra circular, fibra cuadrada, inclusión esférica e inclusión hexaédrica. Se muestran a continuación los RVE tenidos en cuenta para cada uno de los casos.

Fibra circular

Para este tipo de fibra, cuya conectividad es 1-3, el RVE tenido en cuenta es el mostrado en la Figura 3.4. Con esto, el diámetro de la fibra se calcula según la expresión 3.14. En ella, v_f es el porcentaje volumétrico de fibra; es decir, la proporción del volumen ocupado por la fibra o la inclusión.

$$d_{\text{fibra circular}} = \sqrt{\frac{16v_f a_1 a_2}{\pi}} \tag{3.14}$$

Fibra cuadrada

En el caso de la fibra cuadrada, el RVE empleado es similar al de la fibra circular. Su RVE se presenta en la Figura 3.5. Análogamente, el lado de esta inclusión se calcula según la expresión 3.15.

$$l_{\rm fibra\ cuadrada} = \sqrt{4v_f a_1 a_2} \tag{3.15}$$

Inclusión esférica

La inclusión esférica presenta una conectividad de tipo 0-3; y su RVE es del tipo mostrado en la



Figura 3.5 RVE para fibra cuadrada, orientada según a_1 .



Figura 3.6 RVE para inclusión esférica.

Figura 3.6. El diámetro de la inclusión se calcula según la expresión 3.16.

$$d_{\text{inclusion esférica}} = \sqrt[3]{\frac{48v_f a_1 a_2 a_3}{\pi}}$$
(3.16)

Inclusión hexaédrica

Para la inclusión hexaédrica, con conectividad 0-3, el RVE es el presentado en la Figura 3.7. El lado de esta inclusión se calcula como refleja la expresión 3.17.

$$d_{\text{inclusión hexaédrica}} = \sqrt[3]{8v_f a_1 a_2 a_3}$$
(3.17)

3.4.1 Modelado del RVE en Ansys

Una vez definidos los volúmenes representativos a tener en cuenta, han de modelarse en Ansys. Para ello, ha de adoptarse una solución de compromiso entre un número suficiente de elementos,



Figura 3.7 RVE para inclusión hexaédrica.



Figura 3.8 Elemento empleado para el modelado de materiales piezocompuestos [7].

y la optimización de la capacidad computacional. Una malla excesivamente refinada conlleva un alto coste computacional, ya que acarrea el incremento de ecuaciones a resolver. Teniendo esto en cuenta, a continuación se presenta el elemento seleccionado para modelar el RVE. Los diferentes elementos posibles se asocian a diferentes tipologías estructurales, tales como barras, placas... Para el caso de este estudio, se ha seleccionado el elemento SOLID226 (Figura 3.8).

Como se observa en la Figura 3.8, este elemento posee 30 nodos, con 5 grados de libertad por cada uno, y está diseñado para problemas de campos acoplados. Además, permite el uso del potencial eléctrico como uno de los grados de libertad, haciéndolo idóneo para los materiales piezoeléctricos. Todo esto se define en el manual de Ansys [7].

El mallado se ha realizado de manera que se obtuvieran mallas idénticas para caras opuestas. Esto es imprescindible para poder aplicar las condiciones de contorno periódicas, una de las bases del análisis. Los tamaños de malla para este caso se han mantenido constantes para todas las fracciones volumétricas de fibra ensayadas. Además, se ha empleado un mallado adaptativo, en el que el programa ajusta la densidad de la malla automáticamente a las divisiones.

Para el modelado de fibra circular e inclusiones esférica y hexaédrica se han empleado siempre 8 divisiones para la matriz y 10 para la fibra o inclusión. Sin embargo, al aplicar estas a la fibra cuadrada, el tiempo computacional era excesivo. Así, para esta morfología se eligieron 6 divisiones para la matriz y 8 para la fibra, tras comprobar que el resultado no difiere en exceso del obtenido con el otro mallado.



Figura 3.9 Mallados para $v_f = 0.111$ de las cuatro morfologías de inclusiones contempladas en este trabajo. Para las fibras circular y cuadrada, el mallado empleado ha sido adaptativo. En la matriz, los elementos son menores conforme se acercan a la fibra; y en la fibra, se van reduciendo hacia el centro. Por otro lado, para las inclusiones esférica y hexaédrica, la matriz se ha mallado con elementos con forma de prisma triangulas, de tamaño constante en el RVE. Ambas inclusiones se mallan con elementos cúbicos..

3.4.2 Definición de materiales en Ansys

La definición de materiales en Ansys es, a priori, inmediata. Como se determinó en el Capítulo 2, al trabajar con compuestos isótropos, quedan definidos por 11 propiedades. Por lo tanto, se podría pensar que con introducir estos valores es suficiente.



Figura 3.10 Esquema de los cambios que introducir sobre la matriz de propiedades para ajustarla a la definida por Ansys [8].

ш.

TB,ANEL,2	TB,ANEL,2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f	TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f	TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA,12,c33f	TBDATA,12,c33f
TBDATA,16,c44f	TBDATA,16,c66f
TBDATA,19,c44f	TBDATA,19,c44f
TBDATA,21,c66f	TBDATA,21,c44f
(a)	(b)

Figura 3.11 A la izquierda, TBDATA según el criterio IEEE; y a la derecha, TBDATA según la definición de la matriz de Ansys.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la definición de la matriz de coordenadas de Ansys ([19]), para piezoeléctricos no sigue el mismo orden que se ha definido en este documento. El cambio queda claro en la Figura 3.10. Este cambio tiene una consecuencia directa sobre la forma de introducir las propiedades en la matriz de coeficientes. En la Figura 3.11 se muestran las dos tablas de propiedades anelásticas, una siguiendo el criterio IEEE (Figura (a)), y la otra, el de Ansys (Figura (b)).

Teniendo esto en cuenta, se pueden definir sin problema los materiales tanto de la matriz como de la fibra para resolver el modelo previamente definido.

3.4.3 Definición de condiciones de contorno y análisis de resultados

Dado que se está resolviendo el problema aplicando técnicas de homogeneización numérica, las ecuaciones a resolver son las expresadas por 3.2. Para su resolución, deben aplicarse las condiciones de contorno, de manera que el problema quede cerrado. En este caso, se aplican valores medios de deformación y campo eléctrico, siendo coherente con lo expuesto en el apartado de Homogeneización numérica. De este modo, se han determinado seis grupos de condiciones de contorno que permiten determinar los 11 coeficientes de la ecuación 3.2. Tras la resolución numérica, se recalculan los valores de las condiciones de contorno. Así, se verifica cómo de fiable ha resultado el cálculo.

Las condiciones de contorno consisten en imposición de o bien deformación unitaria o bien campo eléctrico unitario. A continuación, se define cada grupo de CC, así como los resultados que se obtienen de su aplicación. Por último, se define cómo obtener los coeficientes que serán objeto de análisis a partir de estos resultados.

Condición de contorno 1

Esta condición consiste en la aplicación de una deformación unitaria; es decir, $\overline{\varepsilon}_{11} = 1$. El resto de componentes ($\overline{\varepsilon}_{22}, \overline{\varepsilon}_{33}, \overline{\varepsilon}_{23}, \overline{\varepsilon}_{31}, \overline{\varepsilon}_{12}, \overline{E}_1, \overline{E}_2 \text{ y } \overline{E}_3$) tienen valor nulo. La aplicación de esta primera condición de contorno da como resultado $\overline{\varepsilon}_{11}, \overline{\sigma}_{11}$ y $\overline{\sigma}_{22}$.

Con estos resultados, se pueden calcular los coeficientes elásticos efectivos C_{11}^{eff} y C_{12}^{eff} . Para ello, se hace uso de las ecuaciones 3.18 y 3.19.

$$C_{11}^{eff} = \overline{\sigma}_{11} / \overline{\varepsilon}_{11} \tag{3.18}$$

$$C_{12}^{eff} = \overline{\sigma}_{12}/\overline{\varepsilon}_{11} \tag{3.19}$$

Condición de contorno 2

La segunda condición de contorno consiste en la aplicación de $\overline{\epsilon}_{33} = 1$, y el resto nulas. Se obtienen $\overline{\epsilon}_{33}$, $\overline{\sigma}_{11}$ y $\overline{\sigma}_{33}$.

En este caso, se pueden calcular los coeficientes elásticos efectivos C_{13} y C_{33} , operando de la siguiente forma:

$$C_{13}^{eff} = \overline{\sigma}_{11} / \overline{\varepsilon}_{33} \tag{3.20}$$

$$C_{33}^{eff} = \overline{\sigma}_{33}/\overline{\varepsilon}_{33} \tag{3.21}$$

Condición de contorno 3

Para aplicar la tercera condición de contorno, debe imponerse $\overline{\epsilon}_{23} = 1$, y el resto nulas. Como resultado de ello, se tiene $\overline{\epsilon}_{23}$ y $\overline{\sigma}_{23}$.

En este caso, se calcula un único coeficiente efectivo: C_{44}^{eff} . Para ello:

$$C_{44}^{eff} = \overline{\sigma}_{23}/\overline{\varepsilon}_{23} \tag{3.22}$$

Condición de contorno 4

Esta condición es la última que se aplica en deformación, haciendo $\overline{\epsilon}_{12} = 1$. Tras ello, la tensión media obtenida es $\overline{\sigma}_{12}$.

El coeficiente efectivo a calcular es C_{66}^{eff} . Para ello, se resuelve la ecuación 3.23.

$$C_{66}^{eff} = \overline{\sigma}_{12}/\overline{\varepsilon}_{12} \tag{3.23}$$

Condición de contorno 5

Para estas dos últimas condiciones, se impone potencial eléctrico, en este caso haciendo que $\overline{E}_3 = 1$. Aplicando esta condición de contorno, que involucra ya el campo eléctrico, se obtienen \overline{E}_3 , $\overline{\sigma}_{11}$ y \overline{D}_3 .

Como resultado de estos tres valores, se calculan tres coeficientes efectivos: e_{13}^{eff} , e_{33}^{eff} y ϵ_{33}^{eff} .

$$e_{13}^{eff} = -\overline{\sigma}_{11}/\overline{E}_3 \tag{3.24}$$

$$e_{33}^{eff} = -\overline{\sigma}_{33}/\overline{E}_3 \tag{3.25}$$

$$\epsilon_{33}^{eff} = \overline{D}_3 / \overline{E}_3 \tag{3.26}$$

Condición de contorno 6

Por último, se impone $\overline{E}_2 = 1$. Como resultado, se tiene \overline{E}_2 , \overline{D}_2 y $\overline{\sigma}_{23}$.

Finalmente, se calculan los dos últimos coeficientes eléctricos y dieléctricos que restan: e_{15}^{eff} y ε_{11}^{eff} .

$$e_{15}^{eff} = -\overline{\sigma}_{23}/\overline{E}_2 \tag{3.27}$$

$$\epsilon_{11}^{eff} = \overline{D}_2 / \overline{E}_2 \tag{3.28}$$

4 Resultados

E n el presente capítulo, se expondrán los resultados obtenidos mediante la implementación de los métodos explicados anteriormente.

En primer lugar, se presentan los resultados de la validación del modelo micromecánico empleados. A continuación, se analizará la influencia tanto de la morfología de la fibra como del uso de matrices auxéticas.

4.1 Validación del modelo para el cálculo numérico

Aunque ya se hayan explicado de manera detallada los métodos del volumen representativo y la homogeneización numérica, implementados mediante el MEF, resta validar su ajuste a la realidad. No debe perderse de vista que se está trabajando con modelos, por lo que hay que comprobar la validez de los mismos. En este caso, se toman los datos obtenidos por Berger *et al.* [9], mediante un análisis numérico, así como los expuestos por Chan y Unsworth(1989) [10], consistentes en una solución teórica. Sin embargo, el cálculo de una solución teórica para este tipo de materiales es un problema complejo. Por ello solo se obtiene para 3 coeficientes: C_{33} , e_{33} y ϵ_{33} .

Las soluciones se obtienen para diferentes fracciones volumétricas de fibra. Se consideran las expresadas en la Tabla 4.1, tanto para la validación como para la obtención del resto de resultados. Por otro lado, las propiedades que se tendrán en cuenta son C_{11} , C_{13} , C_{33} , e_{13} , e_{33} , ϵ_{11} y ϵ_{33} , al ser consideradas las de mayor relevancia.

Para poder hacer la validación del RVE, debe emplearse uno igual al propuesto por Berger *et al.* [9]. Esto es, un piezocompuesto de fibra cilíndrica. Al igual que en el artículo, se emplea una matriz polimérica con fibras piezocerámicas PZT-5(Tabla 2.1), con conectividad 1-3. Estas fibras se distribuyen de forma homogénea en el material paralelas al eje y. Es por tanto un RVE como el previamente presentado en la Figura 3.4. Los diferentes mallados para este modelo se muestran en la Figura **??**, siendo RVE es como el de la Figura 3.4. Las dimensiones del volumen representativo son las siguientes:

 Tabla 4.1
 Fracciones volumétricas empleadas para la obtención de resultados.

vf_1	vf_2	vf_3	vf_4	vf_5	vf_6
0.111	0.222	0.333	0.444	0.555	0.666

	Condición de contorno	Resultado obtenido	Coeficiente a calcular
CC1	$\overline{\varepsilon}_{11} = 1$	$\overline{\varepsilon}_{11}, \overline{\sigma}_{11}$ y $\overline{\sigma}_{22}$	C_{11}^{eff} y C_{12}^{eff}
<i>CC</i> 2	$\overline{\varepsilon}_{33} = 1$	$\overline{\epsilon}_{33}, \overline{\sigma}_{11}$ y $\overline{\sigma}_{33}$	C_{13}^{eff} y C_{33}^{eff}
CC3	$\overline{\varepsilon}_{23} = 1$	$\overline{arepsilon}_{23}$ y $\overline{oldsymbol{\sigma}}_{23}$	C_{44}^{eff}
CC4	$\overline{\varepsilon}_{12} = 1$	$\overline{m{arepsilon}}_{12}$ y $\overline{m{\sigma}}_{12}$	C_{66}^{eff}
<i>CC</i> 5	$\overline{E}_3 = 1$	$\overline{E}_3, \overline{\sigma}_{11}$ y \overline{D}_3	$e_{13}^{eff}, e_{33}^{eff}$ y ϵ_{33}^{eff}
<i>CC</i> 6	$\overline{E}_2 = 1$	$\overline{E}_3, \overline{\sigma}_{23}$ y \overline{D}_2	e_{15}^{eff} y ϵ_{11}^{eff}

Tabla 4.2 Condiciones de contorno a aplicar, relacionadas con los resultados que proporcionan y
los coeficientes que se van a calcular con ellos.



Figura 4.1 La figura (a) muestra la distribución de deformaciones ε_{11} para $v_f = 0.111$. Por otro lado, la figura (b) representa los desplazamientos resultantes según x.

$$a_1 = 1$$
 $a_2 = 1$ $a_3 = 1$

Se supone una adherencia perfecta entre la fibra y la matriz. Los resultados fueron obtenidos para diferentes fracciones volumétricas de fibra; al igual que las propuestas en este trabajo (Tabla 4.1). Sobre este modelo, se aplican las condiciones de contorno definidas en capítulos anteriores. Así, se obtendrán los coeficientes efectivos del compuesto piezoeléctrico.

4.1.1 Resultados para las condiciones de contorno

Como se expuso en el Capítulo 3, las condiciones de contorno se organizan en seis grupos: cuatro referidas a la deformación y dos al campo eléctrico. Como recordatorio, se presentan de nuevo en la Tabla 4.2.

Aplicación de la CC1

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados para esta condición de contorno. Para comprobar que se han aplicado correctamente las condiciones, se presenta la Figura 4.1. En ella, se observan desplazamientos iguales pero de signo contrario en las caras laterales del volumen representativo. Asimismo, en la Tabla 4.3 se exponen los resultados obtenidos tras el cálculo numérico. Estos se muestran gráficamente en la Figura 4.2, que presenta las distribuciones de tensiones σ_{11} y σ_{22} .

Aplicación de la CC2

En este caso, la deformación ε_{33} y los desplazamientos según z quedan como se muestra en la Figura 4.3. Mediante la aplicación de esta condición de contorno, se han obtenido los resultados de

v_f	$\overline{\epsilon}_{11}$	$\overline{\sigma}_{11}$	$\overline{\sigma}_{22}$
0.111	0.99269E+00	0.44400E+10	0.28503E+10
0.222	0.99747E+00	0.52728E+10	0.32076E+10
0.333	0.10001E+01	0.64278E+10	0.36070E+10
0.444	0.10014E+01	0.81247E+10	0.40636E+10
0.555	0.10028E+01	0.10846E+11	0.46425E+10
0.666	0.10056E+01	0.16076E+11	0.57951E+10

 Tabla 4.3 Resultados de la CC1.



Figura 4.2 La figura (a) muestra la distribución de tensiones σ_{11} (a), y la figura (b), la de σ_{22} (b). Ambas distribuciones han sido calculadas para $v_f = 0.111$.

v_f	$\overline{\epsilon}_{33}$	$\overline{\sigma}_{11}$	$\overline{\sigma}_{33}$
0.111	0.10000E+01	0.29202E+10	0.98557E+10
0.222	0.10000E+01	0.33687E+10	0.15927E+11
0.333	0.10000E+01	0.39597E+10	0.22107E+11
0.444	0.10000E+01	0.47826E+10	0.28464E+11
0.555	0.10000E+01	0.60482E+10	0.35160E+11
0.666	0.10000E+01	0.84919E+10	0.42756E+11

 Tabla 4.4 Resultados de la CC2.

la Tabla 4.4. Estos resultados se presentan gráficamente en la Figura 4.4, donde se pueden observar las distribuciones de tensiones σ_{11} y σ_{33} .

Aplicación de la CC3

En este caso, la condición de contorno CC3 está diseñada para simular una deformación por cizalladura en el plano yz, como se puede ver en la Figura 4.5. A partir de esta configuración, se obtienen los resultados numéricos que se presentan en la Tabla 4.5. Para visualizar estos resultados, la Figura 4.6 muestra la distribución de tensiones σ_{23} obtenida para $v_f = 0.111$, correspondiente a la misma condición de contorno.

Aplicación de la CC4

La condición de contorno CC4 corresponde a la segunda condición que simula una deformación de cizalladura, aplicada esta vez en el plano xy. La distribución de la deformación resultante, ε_{12} , para una fracción volumétrica de fibra $v_f = 0.111$, puede observarse en la Figura 4.7. Los resultados



Figura 4.3 En la Figura (a), se presenta la distribución de deformaciones ε_{33} para $v_f = 0.111$; y en la Figura (b), los desplazamientos resultantes según z.



Figura 4.4 La figura (a) muestra la distribución de tensiones σ_{11} para $v_f = 0.111$; y la figura (b) muestra la distribución de tensiones σ_{33} para el mismo valor de v_f .



Figura 4.5 Distribución de la deformación ε_{23} para un valor de fracción volumétrica de fibra $v_f = 0.111$.

v_f	$\overline{\epsilon}_{23}$	$\overline{\sigma}_{23}$
0.111	0.99917	0.79259E+09
0.222	0.99936	0.98705E+09
0.333	0.99963	0.12441E+10
0.444	1.0002	0.16075E+10
0.555	1.0016	0.21834E+10
0.666	1.0059	0.33338E+10

 Tabla 4.5
 Resultados obtenidos para la condición de contorno CC3.



Figura 4.6 Distribución de la tensión σ_{23} en el volumen representativo para $v_f = 0.111$.

Tabla 4.6 Valores promedio de la deformación $\overline{\epsilon}_{12}$ y la tensión $\overline{\sigma}_{12}$ obtenidos para diferentes fracciones volumétricas de fibra v_f en la condición de contorno CC4.

v_f	$\overline{\epsilon}_{12}$	$\overline{\sigma}_{12}$
0.111	0.98414	0.75208E+09
0.222	0.98724	0.87866E+09
0.333	0.98980	0.10298E+10
0.444	0.99205	0.12337E+10
0.555	0.99270	0.15535E+10
0.666	0.99694	0.22107E+10

numéricos obtenidos para diferentes fracciones volumétricas de fibra se presentan en la Tabla 4.6, donde se muestran los valores promedio de la deformación $\overline{\varepsilon}_{12}$ y la tensión $\overline{\sigma}_{12}$. Además, la Figura 4.8 muestra la distribución de las tensiones σ_{12} en el volumen representativo del material compuesto para $v_f = 0.111$.

Aplicación de la CC5

La CC5 corresponde a la primera condición de contorno relacionada con el campo eléctrico, aplicado en la dirección del eje z. La distribución de dicho campo eléctrico puede observarse en la Figura 4.9. Al aplicar esta condición, se obtuvieron los resultados que se detallan en la Tabla 4.7. Estos resultados se representan gráficamente en la Figura 4.10. En ella, se muestra la distribución de las



Figura 4.7 Distribución de la deformación ε_{12} en el plano *xy* para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$.



Figura 4.8 Distribución de la tensión σ_{12} en el volumen representativo para una fracción volumétrica de $v_f = 0.111$.

tensiones σ_{11} y el desplazamiento eléctrico D_3 para una fracción volumétrica de fibra $v_f = 0.111$.

Aplicación de la CC6

La CC6 representa la última condición de contorno, en la cual se aplica un campo eléctrico en la dirección y. La representación de dicho campo eléctrico se puede observar en la Figura 4.11. Los resultados obtenidos tras su aplicación se resumen en la Tabla 4.8. Finalmente, los resultados de las distribuciones gráficas para las tensiones σ_{23} y los desplazamientos eléctricos D_3 para $v_f = 0.111$ se muestran en la Figura 4.12.



Figura 4.9 Distribución del campo eléctrico E_3 para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$.

v_f	\overline{E}_3	$\overline{\sigma}_{11}$	$\overline{\sigma}_{33}$	\overline{D}_3
0.111	1.0000	-0.24454E-01	0.21935E+01	0.91924E-09
0.222	1.0000	-0.58286E-01	0.43797E+01	0.17584E-08
0.333	1.0000	-0.10247E+00	0.65581E+01	0.25970E-08
0.444	1.0000	-0.16368E+00	0.87234E+01	0.34346E-08
0.555	1.0000	-0.25749E+00	0.10864E+02	0.42704E-08
0.666	1.0000	-0.43875E+00	0.12937E+02	0.51012E-08

 Tabla 4.7
 Resultados obtenidos para la condición de contorno CC5.



Figura 4.10 Distribuciones de tensiones σ_{11} (a) y desplazamientos eléctricos D_3 (b) para $v_f = 0.111$.

4.1.2 Comparativa de resultados con Berger y solución teórica

Una vez obtenidos los resultados, se presentan y comentan las gráficas que comparan los coeficientes efectivos obtenidos mediante diferentes procedimientos. Para el caso de la validación, se comparan todos los coeficientes obtenidos (y no solo los contemplados en la Tabla ??), para asegurar completamente la validez del modelo. Se comienza con la comparación de los coeficientes elásticos efectivos (matriz *C*). Esta comparación es representada en la Figura 4.13. En ella, se puede



Figura 4.11 Distribución del campo eléctrico E_2 para una fracción volumétrica $v_f = 0.111$.

v_f	\overline{E}_2	\overline{D}_2	$\overline{\sigma}_{23}$
0.111	0.96969	0.87627E-10	0.79610E-03
0.222	0.96958	0.10133E-09	0.20943E-02
0.333	0.96935	0.11956E-09	0.42119E-02
0.444	0.96932	0.14553E-09	0.80329E-02
0.555	0.97014	0.18746E-09	0.15978E-01
0.666	0.97429	0.27571E-09	0.38450E-01

 Tabla 4.8
 Resultados obtenidos para la condición de contorno CC6.



Figura 4.12 La figura (a) representa la distribución de tensiones σ_{23} , y la figura (b), los desplazamientos eléctricos D_3 para $v_f = 0.111$.

observar de manera clara que los resultados del RVE propuesto en este trabajo se ajustan de manera significativa tanto a la solución teórica de Chan *et al.* [10] como a la propuesta por Berger *et al.* [9].

Tras los coeficientes elásticos, se comparan los piezoeléctricos efectivos (matriz e). Esta comparación es la expuesta en la Figura 4.14. En este caso, para ningún coeficiente se aprecia una diferencia



Figura 4.13 Comparación de coeficientes elásticos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger *et al.* [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT y solución teórica de Chan [10] para los mismos materiales que los anteriores.



Figura 4.14 Comparación de coeficientes piezoeléctricos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger *et al.* [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT y solución teórica de Chan [10] para los mismos materiales que los anteriores.

relevante. Por el contrario, en la comparación de e_{33} se puede comprobar, mediante la solución teórica, que los resultados son coherentes no solo con otro método numérico, sino también con uno analítico.

Por último, se analizan las comparativas de los coeficientes dieléctricos efectivos (matriz ϵ), en la Figura 4.15. Al igual que con los anteriores coeficientes, el resultado respalda el uso del método numérico en este trabajo. De hecho, para ϵ_{33} , esto viene avalado también por la gran coincidencia del resultado con la solución teórica.

Cabe recalcar que los resultados de C_{44} y ϵ_{11} son los que mayor discrepancia presentan respecto a la solución de Berger. Para fracciones volumétricas pequeñas esta es menor; viéndose incrementada al aumentar esta fracción. Como sugiere J. Cañamero [20], esto se debe al comportamiento del material en la interfase fibra-matriz, zona en la que se espera mayor gradiente de resultados. Por lo



Figura 4.15 Comparación de coeficientes dieléctricos efectivos entre RVE propuesto de matriz epoxy e inclusiones de PZT, solución de Berger *et al.* [9] para matriz epoxy e inclusiones de PZT y solución teórica de Chan [10] para los mismos materiales que los anteriores.

tanto, con un mallado más fino, seguramente los resultados serían más similares. Sin embargo, para el fin de este apartado, que es validar el modelo empleado para el análisis, la concordancia de los resultados es suficiente.

4.2 Análisis de la influencia de la morfología de la fibra

Una vez validado el modelo que proporciona los resultados, se emplea el mismo para analizar la influencia de la morfología de la fibra en los coeficientes de un material compuesto piezoeléctrico libre de plomo. En este caso, se emplea una matriz de polietileno con inclusiones de KNN.

Las morfologías de inclusión a analizar son: fibra circular (Figura 3.4), fibra cuadrada (Figura 3.5), inclusión esférica (Figura 3.6) e inclusión hexaédrica (Figura 3.7). Es decir, se estudian dos inclusiones de conectividad 1-3 (la fibra circular y la cuadrada), y otras dos de conectividad 0-3 (la inclusión esférica y la hexaédrica). Se han empleado los mallados previamente descritos para obtener los resultados para diferentes porcentajes volumétricos de fibra.

Cabe destacar que para las inclusiones esféricas, solo se puede alcanzar un $v_f = 0.444$. Para fracciones mayores, la inclusión sería mayor que la matriz, ya que, considerando la expresión 3.16, para $v_f = 0.555$:

$$d_{0.555} = \sqrt[3]{\frac{60.555111}{\pi}} = 2.0392 \tag{4.1}$$

El diámetro obtenido es superior a 2; es decir, superior a la medida del RVE. Para el resto de inclusiones (circular, cuadrada y hexaédrica), la fracción volumétrica de fibra llegará hasta $v_f = 0.666$.

Los modelos numéricos empleados son los descritos en el Capítulo 3, resueltos mediante el uso del módulo Mechanical APDL de Ansys. Los códigos empleados para esto se encuentra en el Apéndice A. Tras la obtención de resultados, se han generado rutinas de Matlab para la elaboración de gráficas comparativas entre las diferentes morfologías. Estas se han separado en cinco grupos:

- Gráficas comparativas de coeficientes efectivos elásticos. Figura 4.16.
- Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos. Figura 4.17.



Figura 4.16 Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.17 Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

- Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos. Figura 4.18.
- Gráficas comparativas de figuras de mérito g₃₁ y g₃₃. Figura 4.19.
- Gráficas comparativas de figuras de mérito K_p y K_t . Figura 4.20.

El análisis de las gráficas resultantes, se observan diferencias según los coeficientes efectivos analizados.

Coeficientes elásticos efectivos

Para el coeficiente elástico efectivo C_{11}^{eff} se observa una tendencia relativamente similar para las cuatro morfologías estudiadas. Todas incrementan su valor con el incremento de fracción volumétrica del material. Sin embargo, para C_{13}^{eff} y C_{33}^{eff} , hay claramente dos grupos diferenciados: las inclusiones de conectividad 1-3 (fibras circular y cuadrada); y las de conectividad 0-3 (esférica y hexaédrica). Para ambos coeficientes efectivos, las inclusiones 1-3 aumentan significativamente su valor con la fracción volumétrica de fibra. Sin embargo, las inclusiones 0-3 sufren un incremento mucho menor.



Figura 4.18 Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.19 Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

Cabe destacar igualmente la similitud de valores entre las inclusiones circular y cuadradas. Especialmente para C_{33}^{eff} , sus valores son casi idénticos.

Coeficientes piezoeléctricos efectivos

Para estos coeficientes efectivos se mantiene la tendencia de los coeficientes elásticos efectivos. Las diferencias entre los resultados de conectividad 1-3 y 0-3 se hacen patentes también para los coeficientes piezoeléctricos efectivos. Para e_{13}^{eff} , las inclusiones esféricas y hexaédricas mantienen valores que apenas varían, mientras que, por el contrario, las inclusiones circular y cuadrada presentan un descenso mucho más acusado. Además, los valores son muy similares hasta llegar a $v_f = 0.666$, punto en el que difieren más. Esto hace pensar que la morfología de la fibra cobra mayor relevancia a mayores fracciones volumétricas de fibra.



Figura 4.20 Gráficas comparativas de figuras de mérito K_p y K_t entre inclusiones piezoeléctricas circulares, cuadradas, esféricas y hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

Referente a e_{33}^{eff} , los valores de las inclusiones 1-3 son casi coincidentes, y mayores que los relativos a la conectividad 0-3. Sin embargo, es aquí donde hay más diferencia entre las inclusiones esférica y hexaédrica.

Coeficientes dieléctricos efectivos

Dentro de los coeficientes dieléctricos efectivos, se observa de nuevo un agrupamiento de resultados según la conectividad fibra-matriz. En el caso de ϵ_{11}^{eff} , las inclusiones hexaédrica y esférica son mayores que las circular y cuadrada. Además, para ambos tipos de conectividad (1-3 y 0-3), se observa una mayor diferencia de resultados a mayor fracción volumétrica de fibra. Para ϵ_{33}^{eff} , si bien se mantiene el agrupamiento según la conectividad, los mayores valores se presentan para las inclusiones 1-3.

Figuras de mérito g₃₁ y g₃₃

La comparación de figuras de mérito g_{31} y g_{33} refleja también dos tendencias claras en los resultados según la conectividad. En ambas figuras de mérito, los resultados de las inclusiones circular y cuadrada son similares, y sin presentar más variación al aumentar v_f . Los resultados de inclusiones esférica y hexaédrica muestran mayor diferencia; especialmente para g_{31} . En esta figura, para $v_f = 0.111$, los resultados presentan la mayor variación, que se va reduciendo hasta hacerse mínima.

Figuras de mérito K_p y K_t

Por último se tienen las gráficas comparativas de K_p y K_t . Para ambas figuras de méritos se observa una tendencia similar. En primer lugar, para K_p , los valores de las inclusiones circular y cuadrada son muy similares, presentando una ligera discrepancia para $v_f = 0.666$. En cambio, los de las inclusiones esféricas y hexaédricas, aún siendo más parecidos entre ellos que con las inclusiones de tipo 1-3, presentan valores diferentes. Para fracciones volumétricas de fibra pequeñas, hay una diferencia notoria entre las inclusiones esférica y hexaédrica. Esta se va reduciendo al aumentar v_f , pero sin llegar a obtener resultados tan coincidentes como los anteriores.

Por otro lado, para K_t se observan fenómenos similares. Los resultados de las inclusiones de tipo 1-3 son similares, y apenas varían con la fracción volumétrica de fibra. Sin embargo, las que presentan conectividad del tipo 0-3, presentan valores diferentes, y que sí cambian de forma significativa con v_f .

4.3 Análisis de la influencia de la inclusión de una matriz auxética

En este apartado, se exponen los resultados de la influencia de emplear un matriz auxética o no para un compuesto piezoeléctrico. Para ello, han de tenerse en cuenta dos tipos de matrices:

- Matriz no auxética. Es la empleada en el apartado anterior. Esta matriz es de polietileno, con un coeficiente de Poisson *nu* de valor 0.2.
- Matriz auxética. Al igual que la anterior, es una matriz de polietileno. Sin embargo, para modelar la auxeticidad, su coefiente de Poisson es negativo, con un valor nu = -0.32.

El análisis se hará para cada una de las morfologías de inclusiones tenidas en cuenta anteriormente: circular, cuadrada, esférica y hexaédrica.

Análisis de la influencia de la inclusión de matriz auxética para fibra circular

A continuación, se analiza la influencia del uso de matriz auxética para una fibra circular. En primer lugar, se analizan los resultados de los coeficientes elásticos efectivos, mostrados en la Figura 4.21. En ellos se observa que la mayor variación ocurre en C_{11}^{eff} y C_{13}^{eff} . Mientras para C_{11}^{eff} la matriz auxética presenta un mayor valor, para C_{13}^{eff} ocurre lo contrario. Sin embargo, para C_{33}^{eff} la auxeticidad de la matriz apenas tiene relevancia.

Respecto a los coeficientes piezoeléctricos efectivos (Figura 4.22), para e_{33}^{eff} , la auxeticidad de la matriz tiene una relevancia mínima. Para e_{13}^{eff} , en cambio, sí afecta esta matriz. Aunque no de forma muy acusada, el material con matriz auxética presenta un coeficiente e_{13}^{eff} ligeramente menos que el material con matriz auxética, especialmente a mayor fracción volumétrica de fibra.

Para los coeficientes dieléctricos efectivos no se observa ninguna relevancia de la auxeticidad de la matriz. Los resultados mostrados en la Figura 4.23 son prácticamente coincidentes.

Las comparativas de las figuras de mérito g_{31} y g_{33} se presentan en la Figura 4.24. Para g_{31} son similares pero de diferente signo. Esto se corresponde a los valores del coeficiente de Poisson empleados: uno positivo y otro negativo, a fin de modelar las matrices auxéticas y no auxéticas. En cambio, los valores de g_{33} apenas varían según la matriz.

Para las figuras de mérito K_p y K_t (Figura 4.25), se observan variaciones entre la matriz auxética y no auxética. Especialmente para K_p , sobre todo para v_f bajas. Si bien al subir la fracción volumétrica los resultados se igualan, cuando esta adopta valores bajos, la matriz auxética presenta acoplamientos sensiblemente menores que la no auxética. Por el contrario, los valores de K_t son mayores para la matriz auxética.

Análisis de la influencia de la inclusión de matriz auxética para fibra cuadrada

Para la fibra cuadrada se analizarán igualmente los coeficientes efectivos y las figuras de mérito. En primer lugar, para los coeficientes elásticos efectivos (Figura 4.26), se observa el mismo fenómeno que para la fibra circular. Los coeficientes C_{11}^{eff} y C_{13}^{eff} varían según la auxeticidad de la matriz, siendo mayores los coeficientes de la matriz auxética para C_{11}^{eff} y menores para C_{13}^{eff} . Sin embargo, C_{33}^{eff} no presenta variación.

Respecto a los coeficientes piezoeléctricos efectivos, de nuevo, ocurre lo mismo que para la fibra circular. La auxeticidad afecta a e_{13}^{eff} , siendo menores los coeficientes para la matriz auxética. Para



Figura 4.21 Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{13} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.22 Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

 e_{33}^{eff} , en cambio, no hay variación.

En los coeficientes dieléctricos efectivos no se observa influencia de la auxeticidad de la matriz en ninguno de los dos comparados.

La figura de mérito g_{31} presenta valores similares pero de signo contrario, debido, nuevamente, al coeficiente de Poisson empleado. Por su parte, g_{33} no presenta influencia notoria de la auxeticidad de la matriz.

Esta morfología de fibra presenta, para K_p , una gran influencia de la auxeticidad de la matriz. Los coeficientes de acoplamiento planar se reducen sensiblemente con una matriz auxética. Los valores se acercan más a los de la matriz no auxética al aumentar la fracción volumétrica de fibra, pero sin llegar a igualarse.

En conclusión, la influencia de la matriz auxética para fibras circulares y cuadradas presenta la misma forma.



Figura 4.23 Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.24 Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

Análisis de la influencia de la inclusión de matriz auxética para inclusión esférica

En este punto se analiza la influencia de una matriz auxética para inclusiones esféricas; es decir, con conectividad 0-3. En primer lugar, se estudian los coeficientes elásticos efectivos, representados en la Figura 4.31. Para ellos, se observa que C_{11}^{eff} y C_{33}^{eff} se comportan de manera similar. Ambos coeficientes son mayores cuando la matriz es auxética, incrementándose esta diferencia con la fracción volumétrica de fibra. Por su parte, C_{13}^{eff} presenta una gran diferencia entre los coeficiente para matriz auxética, siendo inferior el resultado para matriz auxética.

Respecto a los coeficientes piezoeléctricos efectivos (Figura 4.32), queda patente tanto en e_{13}^{eff} como en e_{33}^{eff} las diferencias que produce la auxeticidad de la matriz. Mientras que el coeficiente e_{13}^{eff} es menor cuando la matriz es auxética, incrementando las diferencias con v_f ; e_{33}^{eff} es mayor.



Figura 4.25 Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas circulares. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.26 Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

Para esta morfología de fibra, al igual que en las dos anteriores, los coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11}^{eff} y ϵ_{33}^{eff} , representados en la Figura 4.33, no varían con la auxeticidad de la matriz. Por otro lado, las figuras de mérito g_{31} y g_{33} sí que presentan variaciones. Estas comparaciones se presentan en la Figura 4.34. Los valores de g_{31} son mayores cuando la matriz es auxética. Es notorio recalcar que, en este caso, no son similares y de signo contrario, como ocurría para la conectividad 1-3. Por otra parte, los valores g_{33} son mayores cuando la matriz es no auxética.

Por último, se analizan las figuras de mérito K_p y K_t . Para la primera, los valores son mayores cuando la matriz es no auxética. Sin embargo, para K_t , el caso es el contrario.

Análisis de la influencia de la inclusión de matriz auxética para inclusión hexaédrica

En último lugar, se analiza la influencia de la auxeticidad de la matriz para inclusiones hexaédricas. Comenzando por los coeficientes elásticos efectivos, representados en la Figura 4.36. Estos, al igual que para la inclusión esférica, tienen un comportamiento similar entre C_{11}^{eff} y C_{33}^{eff} . Ambos presentan mayores valores cuando la matriz es auxética, y la diferencia entre un tipo y otro se



Figura 4.27 Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.28 Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

incrementa con v_f . Por otro lado, C_{13}^{eff} tiene un valor mucho menor cuando la matriz es auxética. Esta variación, además, es independiente de la fracción volumétrica de fibra.

En lo referente a los coeficientes piezoeléctricos efectivos (Figura 4.37), las diferencias también son análogas a las presentadas por la inclusión esférica. Los valores de e_{13}^{eff} son ligeramente inferiores cuando la matriz es auxética. Por el contrario, los de e_{33}^{eff} son mayores.

Referente a los coeficientes dieléctricos efectivos (Figura 4.38), al igual que las inclusiones anteriores, no presentan variación entre matrices auxéticas y no auxéticas. Para las figuras de mérito g, representadas en la Figura 4.39, el comportamiento es similar al de la inclusión esférica. Para g_{31} , los valores son mayores cuando la matriz es auxética. Se observa, no obstante, una excepción para $v_f = 0.111$, punto en el que g_{31} para la matriz auxética es muy inferior a la matriz no auxética.



Figura 4.29 Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.30 Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas cuadradas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

Esta diferencia puede deberse a varios factores, pero teniendo en cuenta los resultados de otras morfologías, puede suponerse que es un error o bien de cálculo o bien de mallado. La figura g_{33} muestra menores valores para una matriz auxética.

En último lugar, se estudian las figuras de mérito K_p y K_t , mostradas en la Figura 4.40. En este caso, se cumple una tendencia igual a la reflejada por la inclusión esférica. Para K_p , sus valores resultan mayores cuando la matriz es no auxética. En cambio, los valores de K_t se comportan de manera contraria, siendo mayores con matriz auxética.

De esta forma, podemos concluir que la influencia de una matriz auxética para configuraciones 0-3 sigue una misma tendencia.



Figura 4.31 Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.32 Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.33 Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.34 Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.35 Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas esféricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.36 Gráficas comparativas de coeficientes elásticos efectivos C_{11} , C_{13} y C_{13} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.


Figura 4.37 Gráficas comparativas de coeficientes piezoeléctricos efectivos e_{13} y e_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.38 Gráficas comparativas de coeficientes dieléctricos efectivos ϵ_{11} y ϵ_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.39 Gráficas comparativas de figuras de mérito g_{31} y g_{33} entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.



Figura 4.40 Gráficas comparativas de figuras de mérito K_t y K_p entre matriz auxética o no auxética para inclusiones piezoeléctricas hexaédricas. Matriz de polietileno e inclusiones piezoeléctricas de KNN.

5 Conclusiones finales y resumen

En este capítulo se exponen, de forma resumida, las tareas llevadas a cabo en el trabajo, con el fin de comparar con los objetivos iniciales. Asimismo, se exponen las conclusiones extraídas de los diversos estudios y se definen trabajos futuros que podrían salir de este.

5.1 Resumen y objetivos cumplidos

En este trabajo se han llevado a cabo dos estudios principales sobre un compuesto piezoeléctrico libre de plomo: un análisis de la influencia de la morfología de la fibra y otro de la influencia de la auxeticidad de la matriz. Para ello, en primer lugar, se han definido las ecuaciones y los materiales a emplear. Dentro de los materiales, cabe recalcar el uso de KNN, un material libre de plomo y, por tanto, más seguro. Se han expuesto las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctrico transversalmente isótropos, para tener una base sobre la que realizar los análisis.

Posteriormente, se han definido las técnicas empleadas para el modelo numérico. En primer lugar, se ha hecho uso del elemento de volumen representativo, o RVE. Este permite modelar materiales heterogéneos como homogéneos, facilitando el cálculo. Además, se emplean técnicas de homogeneización numérica, que permite el cálculo de propiedades efectivas del material. Todo esto, junto a la aplicación de condiciones de contorno periódicas, permite la resolución de las ecuaciones. Para ello se emplea el Método de los Elementos Finitos, implementado mediante el módulo Mechanical APDL de Ansys.

Una vez expuesta la metodología de cálculo, se han definido los RVE a emplear. Ha sido necesario definir cuatro, uno para cada una de las morfologías de inclusión empleadas: circular, cuadrada, esférica y hexaédrica. Para validar la metodología de cálculo, se ha llevado a cabo una verificación de la misma. Para ello, se han tomado como referencia un artículo previo de Berger *et al.* [9]; y empleando sus mismos materiales, se ha validado el modelo. Además, se ha comparado también con el cálculo teórico llevado a cabo por Chan *et al.* [10]. Tras esto, se ha concluido que la metología de cálculo y los modelos empleados son válidos.

Habiendo validado el modelo, se ha procedido a hacer los estudios. Cada uno ha arrojado conclusiones diferentes, que se analizan en el siguiente apartado. Por último, se hace una comparación de los objetivos cumplidos respecto a los esperados.

 Modelado y análisis de piezocompuestos en Ansys. En este punto, se buscaba obtener un modelo numérico adecuado para modelar piezocompuestos. Tras la validación del modelo con los resultados de Berger *et al.* [9] y Chan *et al.* [10], este objetivo se considera cumplido. • Análisis de datos obtenidos. Por último, se perseguía conseguir representar de forma clara las comparativas de los resultados obtenidos. El uso de figuras de mérito y las rutinas implementadas en Matlab han permitido cumplir igualmente este objetivo.

5.2 Conclusiones

Tras el análisis de los diferentes resultados arrojados tras la correcta aplicación de la metodología de cálculo, se ha llegado a varias conclusiones:

- Se ha comprobado la validez de la metodología de cálculo expuesta previamente en este trabajo. Esto podrá posteriormente aplicarse a otros compuestos piezoeléctricos periódicos.
- Respecto a la influencia de la morfología de la fibra, el estudio ha revelado similitudes entre los coeficientes efectivos y figuras de mérito según el tipo de conectividad. Para las inclusiones de conectividad 1-3 (fibras circular y cuadrada), no hay diferencias significativas entre los valores de ninguno de los coeficientes. Por su parte, para las de conectividad 0-3 ocurre algo similar: a la vista de las gráficas obtenidas, no hay ningún coeficiente ni figura de mérito que varíe de forma significativa entre inclusiones esféricas y hexaédricas. Se deduce entonces que, en la morfología de la fibra, tiene mayor relevancia el tipo de conectividad que el tipo de inclusión. De esta forma, en función del uso al que se vaya a someter el material, convendrá estudiar un tipo u otro. Esta cuantificación se ha facilitado gracias al uso de figuras de mérito, que permiten determinar la idoneidad de una material piezoeléctrico. Por ejemplo, si se busca obtener un material adecuado para un sensor cuya tensión se reciba según la dirección 1, sería interesante contemplar uno cuya conectividad sea 0-3. Según se muestra en la Figura 4.19, los valores de g_{31} son mayores para estos. Por el contrario, si la tensión se aplica según la dirección 3, sería más conveniente un material de conectividad 1-3. De esta forma, se puede cuantificar lo idóneo o no que es un material empleando solo las figuras de mérito.
- Los estudios de la influencia de la auxeticidad de la matriz desprenden una conclusión principal. En pocas ocasiones las diferencias entre los coeficientes efectivos y figuras de mérito al emplear una matriz auxética varían significativamente respecto a una no auxética, y cuando lo hacen, nunca es una diferencia tan acusada como la influencia de la morfología de la fibra.

En conclusión, la mayor influencia que se ha desprendido de los estudios realizados es la asociada a la conectividad de la inclusión, quedando la auxeticidad de la matriz en un segundo plano. Entre inclusiones de un mismo tipo de conectividad (es decir, comparando entre inclusiones circular y cuadrada por un lado y esférica y hexaédrica por otro), no se observan variaciones relevantes de las propiedades electromecánicas ni del acoplamiento.

5.3 Trabajos futuros

Este trabajo ha presentado la metodología de cálculo para un compuesto piezoeléctrico libre de plomo, así como su validación. Tras esta, se han hecho estudios sobre la influencia de la morfología de la fibra y la auxeticidad de la matriz. Sin embargo, el alcance de estos puede ser mucho mayor en un futuro, con la realización de otros estudios. Algunos podrían ser los siguientes:

• Estudio de la interfase fibra-matriz. En este trabajo, la interfase se ha considerado nula. Sin embargo, hacer estudios teniendo en cuenta su posible imperfección podría conducir a resultados más exactos y acordes al comportamiento real de los piezocompuestos.

- Estudio de un sistema auxético piezoeléctrico. Mientras en este trabajo se ha planteado el uso de matriz auxética, para el futuro sería interesante realizar un sistema auxético de material piezoeléctrico. Esto es, usar el piezoeléctrico para hacer un sistema de panales auxéticos, rellenos de aire. Esta aplicación, parecida a los *honeycomb* puede tener interesantes aplicaciones.
- Estudio incluyendo más fracciones volumétricas de fibra. En los estudios realizados se han contemplado fracciones volumétricas de fibra en intervalos de 0.111. Podría ser ilustrativo realizar estos mismos estudios para intervalos menores, especialmente cuando la fracción es baja, para obtener resultados más precisos.

Bibliografía

- B. A. Sabatel, "Análisis micromecánico de materiales compuestos con interfase inclusiónmatriz imperfecta mediante elemento de volumen representativo," Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior Ingeniería Sevilla, 2022.
- [2] E. Balmes and A. Deraemaeker, "Modeling structures with piezoelectric materials," *www.sdtools.com*, 2022.
- [3] F. Narita and M. Fox, "A review on piezoelectrics, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications," *Advanced Engineering Materials*, 2017.
- [4] J. A. K. et al, "Design of polymeric auxetic matrices for improved mechanical coupling in lead-free piezocomposites," *Smart Materials and Structures*, vol. 29, 2020.
- [5] AENOR, "Propiedades piezoeléctricas de materiales y componentes cerámicos. parte 2: Métodos de medición. baja potencia. (ratificada por aenor en agosto de 2002)," *EN 50324-2*, 2002.
- [6] A. C. Sánchez, "Modelización micromecánica de materiales compuestos: comparativa entre modelos analíticos y numéricos," Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior Ingeniería Sevilla, 2018.
- [7] ANSYS, *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. Ansys Inc., 2011, ch. 6. Element Library.
- [8] P. Dushat, Q. Li, and S. Ren, "Ansys simulation of piezoelectric patch for energy harvesting," Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering Department, University of New Haven.
- [9] H. Berger, S. Kari, U. Gabbert, R. Rodríguez-Ramos, R. Guinovart, J. A. Otero, and J. Bravo-Castillero, "An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites," *International Journal of Solids and Structures*, no. 42, 2005.
- [10] H. L. W. Chan and J. Unsworth, "Simple model for piezoelectric ceramic/polimer 1-3 composites used in ultrasonic transducer applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Controls*, vol. 36, no. 4, 1989.
- [11] Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, "Boletín vt nº 3," Ministerio de Ciencia e Innovación, Tech. Rep., 2010.

- [12] E. L. Pradeesh, S. Udhayakumar, M. G. Vasundhara, and G. K. Kalavathi, "A review on piezoelectric energy harvesting," *Microsystem Technologies*, 2022.
- [13] Francisco J Cañamero et al, "Piezoelectric performance of lead-free pdms/cnt/batio3 piezocomposites with imperfect interphases and cnt agglomerations," *Smart Materials and Structures*, 2023.
- [14] F. J. Cañamero, F. C. Buroni, and L. Rodríguez-Tembleque, "Connectivity patterns in lead-free piezocomposites: A critical analysis for 0-3 and 1-3 configurations," *Composite Structures*, no. 337, 2024.
- [15] L. Quiao, G. Li, H. Tao, J. Wu, Z. Xu, and F. Li, "Full characterization for material constants of a promising knn-based lead-free piezoelectric ceramic," *Ceramics International*, no. 46, 2020.
- [16] E. C. N. Silva, J. S. Fonseca, and N. Kikuchi, "Optimal design of piezoelectric microstructures," *Computational Mechanics*, no. 19, pp. 397–410, 1997.
- [17] M. Kurt, "Numerical calculation of homogenized properties of piezoelectric composites," Ph.D. dissertation, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middel East Technical University, 2022.
- [18] R. Hill, "Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles," J. Mech. Phys. Solids, no. 11, 1963.
- [19] ANSYS, Coupled-Field Analysis Guide. Ansys Inc., 2024, ch. 2.3.2.2. Piezoelectric Matrix.
- [20] F. J. C. Torres, "Modelización micromecánica de compuestos piezoeléctricos mediante mef," Ph.D. dissertation, Escuela Técnica Superior Ingeniería Sevilla, 2019.

Apéndice A Códigos de Ansys

A.1 Fibra circular PZT matriz epoxy CC1

FINISH /CLEAR !A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CIRCULAR pi=acos(-1) !Propiedades matriz c11m=0.386E+10 c12m=0.257E+10 c13m=0.257E+10 c33m=0.386E+10 c44m=0.064E+10 c66m=0.064E+10 k11m=9 k33m=9 !Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas) c11f=12.1E+10 c12f=7.54E+10 c13f=7.52E+10 c33f=11.1E+10 c44f=2.11E+10 c66f=2.28E+10 e15f=12.3 e31f=-5.4 e33f=15.8 k11f=916.38 k33f=830.51 !Geometría del RVE a1=0.5 a2=a1 a3=a1 *CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC1,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán los r

!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas *DO,vf,0.111,0.666,0.111 df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra !-----! PREPROCESO !-----/PREP7 VCLEAR, ALL VDELE, ALL, ,, 1 !Keypoints K,1,-a1 K,2,a1 K,3,0,-a2 K,4,0,a2 L,1,2 L,3,4 BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2 !Crea volumen rectangular. BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGH centro_x=0 centro_y=0 CYL4, centro_x, centro_y, df/2 ASBA,1,2,,,KEEP !Resta áreas. ASBA, área a la que se resta, área restada, SEPO, áreas ASBL, ALL, 1 !Elimina líneas de áreas ASBL,ALL,2 VEXT,ALL,,,0,0,a3,,,, ! Genera volúmenes extruyendo áreas. VEXT,AREA1,AREA2,PASOS EN L VGEN,2,ALL,,,0,0,-a3 !Genera volúmenes a partir de un patrón de otros volúmenes. VGEN, NUMMRG, KP !Une los KP coincidentes !A continuación se agrupan los volúmenes !Matriz FLST, 5, 8, 6, ORDE, 4 !Selecciona. FLST, FITEM,5,5 FITEM, 5, -8 FITEM, 5, 13 FITEM, 5, -16 VSEL,S,,,P51X CM, MATRIZ, VOLU ! Agrupa volúmenes ALLSEL

!Fibra VSEL, U, VOLU, , MATRIZ !Deseleccionar matriz CM, FIBRA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDADES, VA MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB, PIEZ, 1 ! Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA,12,c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP, PERZ, 2, k33f TB,PIEZ,2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA, 14, e15f TBDATA, 16, e15f TB, ANEL, 2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f TBDATA, 12, c33f TBDATA,16,c66f TBDATA, 19, c44f

```
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL,A,LOC,Z,-a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE,ALL,,,div/(a1/a3),,1,,,1,
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE,ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , , div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM, 2, 22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
```

FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 31 FITEM,2,33 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,66 FITEM,2,68 ACCAT, P51X MAT,1 VMESH, ALL ALLSEL FINISH !-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL,ALL **!**CONDICIONES DE CONTORNO !Caras a1 y -a1 NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos D,ALL,VOLT,O !VOLT=voltaje NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001 D,ALL,UX,a1 D,ALL,VOLT,O !Caras a2 y -a2 NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,O NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,O !Caras a3 y -a3 NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,0 NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,0 ALLSEL, ALL, ALL

SOLVE FINISH !-----! POSTPROCESO !-----/POST1 VSEL,R,LOC,X,0,a1 VSEL,R,LOC,Y,0,a2 VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados ALLSEL !A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente ETABLE,,VOLU, ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, fa SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de a *GET, TOTEPELX, SSUM, , ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXX0=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET, TOTSX ,SSUM,, ITEM, SXV *GET, TOTSY , SSUM, , ITEM, SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC1, txt, , APPEND !APPEND: este fichero se crea además *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.2 Fibra circular PZT matriz epoxy CC2

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C13 y C33 con FIBRA CIRCULAR
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz
c11m=0.386E+10
c12m=0.257E+10
c13m=0.257E+10
c33m=0.386E+10
c44m=0.064E+10
c66m=0.064E+10
k11m=9
k33m=9
!Propiedades fibra
c11f=12.1E+10
c12f=7.54E+10
c13f=7.52E+10
c33f=11.1E+10
c44f=2.11E+10
c66f=2.28E+10
e15f=12.3
e31f=-5.4
e33f=15.8
k11f=916.38
k33f=830.51
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC2,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán los r
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```

VCLEAR, ALL VDELE, ALL, ,, 1 !Keypoints K,1,-a1 K,2,a1 K,3,0,-a2 K,4,0,a2 L,1,2 L,3,4 BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2 !Crea volumen rectangular. BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGH centro_x=0 centro_y=0 CYL4,centro_x,centro_y,df/2 ASBA,1,2,,,KEEP !Resta áreas. ASBA, área a la que se resta, área restada, SEPO, áreas ASBL, ALL, 1 !Elimina líneas de áreas ASBL,ALL,2 VEXT,ALL,,,0,0,a3,,,, ! Genera volúmenes extruyendo áreas. VEXT,AREA1,AREA2,PASOS EN L VGEN,2,ALL,,,0,0,-a3 !Genera volúmenes a partir de un patrón de otros volúmenes. VGEN, NUMMRG, KP !Une los KP coincidentes !A continuación se agrupan los volúmenes !Matriz FLST, 5, 8, 6, ORDE, 4 !Selecciona. FLST, FITEM,5,5 FITEM,5,-8 FITEM, 5, 13 FITEM, 5, -16 VSEL,S,,,P51X CM, MATRIZ, VOLU ! Agrupa volúmenes ALLSEL !Fibra VSEL,U,VOLU,,MATRIZ !Deseleccionar matriz CM, FIBRA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDAD

MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA, 14,0 TBDATA, 16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m **!**FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP, PERZ, 2, k33f TB,PIEZ,2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA, 14, e15f TBDATA, 16, e15f TB, ANEL, 2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f TBDATA, 12, c33f TBDATA, 16, c66f TBDATA, 19, c44f TBDATA,21,c44f !MALLADO !FIBRA div=10 VSEL,S,VOLU,,FIBRA ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1, LSEL,S,LOC,Z,a3/2 LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE,ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , , div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM, 2, 22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

FINISH

!-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL, ALL !Condiciones de contorno !Aplicación en caras +a1 y -a1 nsel,s,loc,x,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,UX,O D,ALL,VOLT,0 nsel,s,loc,x,a1-0.001,a1+0.001 D,ALL,UX,O D,ALL,VOLT,0 !Aplicación en caras +a2 y -a2 nsel,s,loc,y,-a2-0.001,-a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,O nsel,s,loc,y,a2-0.001,a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,0 !Aplicación en caras +a3 y -a3 nsel,s,loc,z,-a3-0.001,-a3+0.001 D,ALL,UZ,-a3 D,ALL,VOLT,0 nsel,s,loc,z,a3-0.001,a3+0.001 D,ALL,UZ,a3 D,ALL,VOLT,O ALLSEL, ALL, ALL SOLVE FINISH !-----! POSTPROCESO !-----/POST1 VSEL,R,LOC,X,0,a1

VSEL,R,LOC,Y,0,a2 VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados ALLSEL ETABLE, ,VOLU, ETABLE, , EPEL, Z SMULT, EPELZV, VOLU, EPELZ, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET, TOTEPELZ , SSUM, , ITEM, EPELZV EPELZZO = TOTEPELZ/TOTVOL !Obtencion epsilon33 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Z SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SZV, VOLU, SZ, 1, 1, SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET, TOTSX , SSUM, , ITEM, SXV *GET,TOTSZ ,SSUM,,ITEM,SZV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SZZO = TOTSZ/TOTVOL!Obtencion sigma33 !-----!RVE calculo c13 y c33 !-----*VWRITE, vf, EPELzz0, Sxx0, Szz0 !Registro de resultados (4E12.5) FINISH *CFCLOSE *CFOPEN,resultado_fibra_circular_CC2,txt, ,APPEND *ENDDO *CFCLOSE

A.3 Fibra circular PZT matriz epoxy CC3

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C44 con FIBRA CIRCULAR
pi=acos(-1)
             !Definicion de variables
!Propiedades de la matriz [Pa; (F/m)/k0]
c11m=0.386E+10
c12m=0.257E+10
c13m=0.257E+10
c33m=0.386E+10
c44m=0.064E+10
c66m=0.064E+10
k11m=9
k33m=9
!Propiedades de la fibra [Pa;C/m2; (F/m)/k0]
c11f=12.1E+10
c12f=7.54E+10
c13f=7.52E+10
c33f=11.1E+10
c44f=2.11E+10
c66f=2.28E+10
e15f=12.3
e31f=-5.4
e33f=15.8
k11f=916.38
k33f=830.51
!Geometría del RVE
a1=0.5
        !Semilongitud en Eje X
a2=a1
         !Semilongitud en Eje Y
        !Semilongitud en Eje Z
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC3, txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán los re
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a2*a3/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
```

```
/PREP7
VCLEAR, ALL
VDELE, ALL, ,, 1
K,1,-a1
K,2, a1
K,3, 0, -a2
K,4, 0, a2
L,1,2
L,3,4
BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2
centro_x = 0
centro_y = 0
CYL4,centro_x,centro_y,df/2
ASBA,1,2,,,KEEP
ASBL,ALL,1
ASBL,ALL,2
VEXT,ALL, , ,0,0,a3,,,,
VGEN,2,ALL, , ,0,0,-a3
NUMMRG,KP
!A continuación se agrupan los volúmenes
!Matriz
FLST, 5, 8, 6, ORDE, 4
FITEM,5,5
FITEM,5,-8
FITEM, 5, 13
FITEM, 5, -16
VSEL,S, , ,P51X
CM, MATRIZ, VOLU
ALLSEL
!Fibra
VSEL, U, VOLU, , MATRIZ
CM, FIBRA, VOLU
ALLSEL
!Tipo de elemento
!-----
ET,2,SOLID226,1001
!Materiales
```

!MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB, PIEZ, 1 TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP, PERZ, 2, k33f TB, PIEZ, 2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA, 14, e15f TBDATA,16,e15f TB, ANEL, 2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f TBDATA, 12, c33f TBDATA,16,c66f TBDATA, 19, c44f TBDATA,21,c44f !MALLADO !FIBRA div = 10VSEL,S,VOLU,,FIBRA ASLV,S LSLA,S LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1, LSEL,S,LOC,Z,a3/2

```
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , , div/(a1/a3), ,1, , ,1,
MAT,2
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div = 8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE,ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
ALLSEL
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
ASLV,S
LSLA,S
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,0RDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,0RDE,2
FITEM, 2, 35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,0RDE,2
FITEM,2,71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
```

FITEM,2,68 ACCAT, P51X MAT,1 VMESH, ALL ALLSEL FINISH !-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL, ALL !Condiciones de contorno NSEL,S,LOC,X,O NSEL, R, LOC, Y, O NSEL,R,LOC,Z,O D,ALL,UX D,ALL,UY D,ALL,UZ ALLSEL,ALL !Aplicación en caras +a1 y -a1 nsel,s,loc,x,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,VOLT,O nsel,s,loc,x,a1-0.001,a1+0.001 D,ALL,VOLT,0 !Aplicación en caras +a2 y -a2 nsel,s,loc,y,-a2-0.001,-a2+0.001 D,ALL,VOLT,O nsel,s,loc,y,a2-0.001,a2+0.001 D,ALL,VOLT,0 !Aplicación en caras +a3 y -a3 nsel,s,loc,z,-a3-0.001,-a3+0.001 D,ALL,VOLT,O nsel,s,loc,z,a3-0.001,a3+0.001 D,ALL,VOLT,0 ALLSEL, ALL, ALL !-----!ARCHIVO CONDICIONES DE CONTORNO

```
!-----
! a1,a2,a3,epsi_X,epsi_Y,epsi_Z,gamma_XY,gamma_YZ,gamma_XZ
!-----
!!*use,ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0,1,0,0 !Cuarta columna: deformación unitaria ejes XY
!+! *use,ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0,0,1,0 !Cuarta columna: deformación unitaria ejes YZ
arg1 = a1
arg2 = a2
arg3 = a3
arg4 = 0
arg5 = 0
arg6 = 0
arg7 = 0
arg8 = 1
arg9 = 0
!-----
!-----
!+!*create,ceRVE
! ceRVE argument:
! a1,a2,a3,eps1,eps2,eps3,eps4,eps5,eps6
! a1,a2,a3,eps11,eps22,eps33,eps23,eps13,eps12
!
! /sOLU
! *use,ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0, 0,0,0.5
! SOLVE
! FINISH
! This macro applies CE to a periodic hexaedral RVE
! The RVE must be centred at (0,0,0) and
! a node must exist at (0,0,0)
!+!a1=arg1
!+!a2=arg2
!+!a3=arg3
! APPLIED STRAINS
eps11=arg4
eps22=arg5
eps33=arg6
!---Note: must enter epsij=1/2*gamma
eps12=arg9/2
eps13=arg8/2
eps23=arg7/2 ! (x-y in model)
!---Note: here recovers the other 1/2*gamma
eps21 = eps12
```

```
eps31 = eps13
eps32 = eps23
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
! DIR THEORY ANSYS MODEL
! 1 Z
! 2 X
! 3 Y
!_____
   CREATE COMPONENT SET: periodic corners, edges and sides
!
!-----
! select side +a1 and -a1 -----
nsel,s,loc,z,-a1-0.001,-a1+0.001
cm,a1n_nodes,node
nsel,s,loc,z,a1-0.001,a1+0.001
cm,a1p_nodes,node
! select side +a2 and -a2 -----
nsel,s,loc,x,-a2-0.001,-a2+0.001
cm,a2n_nodes,node
nsel,s,loc,x,a2-0.001,a2+0.001
cm,a2p_nodes,node
! select side +a3 and -a3 -----
nsel,s,loc,y,-a3-0.001,-a3+0.001
cm,a3n_nodes,node
nsel,s,loc,y,a3-0.001,a3+0.001
cm,a3p_nodes,node
! select edges a1 a2 -----
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a1n_a2n_nodes,node
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a1n_a2p_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a1p_a2n_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a1p_a2p_nodes,node
! select edges a1 a3 -----
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a3n_nodes
cm,a1n_a3n_nodes,node
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a3p_nodes
```

```
cm,a1n_a3p_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a3n_nodes
cm,a1p_a3n_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a3p_nodes
cm,a1p_a3p_nodes,node
! select edges a3 a2 -----
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a3n_a2n_nodes,node
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a3n_a2p_nodes,node
cmsel,s,a3p_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a3p_a2n_nodes,node
cmsel,s,a3p_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a3p_a2p_nodes,node
cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,a,a1n_a2p_nodes
cmsel,a,a1p_a2n_nodes
cmsel,a,a1p_a2p_nodes
cmsel,a,a1n_a3n_nodes
cmsel,a,a1n_a3p_nodes
cmsel,a,a1p_a3n_nodes
cmsel,a,a1p_a3p_nodes
cmsel,a,a3n_a2n_nodes
cmsel,a,a3n_a2p_nodes
cmsel,a,a3p_a2n_nodes
cmsel,a,a3p_a2p_nodes
cm,edges_nodes,node
! select corners a1 a2 a3 -----
nsel,ALL
aln_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3,-a1)
a1n_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3,-a1)
a1n_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3,-a1)
a1n_a2p_a3p_corner=node( a2, a3,-a1)
a1p_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3, a1)
a1p_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3, a1)
a1p_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3, a1)
a1p_a2p_a3p_corner=node( a2, a3, a1)
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
nsel,a,node,,a1n_a2n_a3p_corner
nsel,a,node,,a1n_a2p_a3n_corner
nsel,a,node,,a1n_a2p_a3p_corner
```

```
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
cm,corners_nodes,node
ALLSEL, ALL
NSEL,S,LOC,x,O
NSEL,R,LOC,Y,O
NSEL,R,LOC,Z,O
D,ALL,ALL
ALLSEL, ALL
CEDELE, ALL
ALLSEL, ALL
ceeq=0
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
Ţ
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a2n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a2n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(-x_,y_,z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 3-DIR (Y-DIR)
i
```

nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner

```
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a3n_nodes
 cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a3p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,-y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 1-DIR (Z-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_nodes
 cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a1p_nodes
```

```
get closest node from component neg_a2
!
pos_node=node(x_,y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 23-DIR (XY-DIR)
T
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a3n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
 *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a3p_a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(-x_,-y_,z_)
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
Т
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a3n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
```

```
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
   get x,y,z locations of current node in active coord system
 !
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a3p_a2n_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,-y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 31-DIR (YZ-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a3n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a3n_nodes
 cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if, i, ne, 1, then
  neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a1p_a3p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,-y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
```

```
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a3p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a3p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
 *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a1p_a3n_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,-y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 12-DIR (YZ-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
 *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
```

```
cmsel,s,a1p_a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
ļ
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
 cmsel,s,a1n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if, i, ne, 1, then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a1p_a2n_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION Corners
i
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
    get x,y,z locations of current node in active coord system
 !
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
```

```
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3p_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
nsel,s,node,,a1n_a2p_a3n_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
nsel,s,node,,a1n_a2p_a3p_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
```

ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z-

ALLSEL,ALL

```
!-----
!-----
SOLVE
FINISH
!-----
! Postprocesado
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
ESLV,R
ALLsel
ETABLE, ,VOLU,
ETABLE, ,EPEL,YZ
SMULT, EPELYZV, VOLU, EPELYZ, 1, 1,
SSUM
*GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU
*GET, TOTEPELYZ ,SSUM,, ITEM, EPELYZV
EPELYZO = TOTEPELYZ/TOTVOL
                    !Obtencion epsilon23
ETABLE, ,S,YZ
SMULT, SYZV, VOLU, SYZ, 1, 1,
SSUM
*GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU
*GET, TOTSYZ , SSUM, , ITEM, SYZV
SYZO = TOTSYZ/TOTVOL
                !Obtencion sigma23
!-----
!RVE calculo c44
!-----
```
A.4 Fibra circular PZT matriz epoxy CC4

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C66 con FIBRA CIRCULAR
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz
c11m=0.386E+10
c12m=0.257E+10
c13m=0.257E+10
c33m=0.386E+10
c44m=0.064E+10
c66m=0.064E+10
k11m=9
k33m=9
!Propiedades fibra
c11f=12.1E+10
c12f=7.54E+10
c13f=7.52E+10
c33f=11.1E+10
c44f=2.11E+10
c66f=2.28E+10
e15f=12.3
e31f=-5.4
e33f=15.8
k11f=916.38
k33f=830.51
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC4,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```

```
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA, 14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA, 12, c33m
TBDATA, 16, c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP, PERY, 2, k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA, 12, c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL,,, div,, 1,,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
```

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

```
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!Condiciones de contorno
NSEL,S,LOC,X,O
NSEL, R, LOC, Y, O
NSEL, R, LOC, Z, O
D,all,UX
D,all,UY
D,all,UZ
ALLSEL, ALL
!Aplicación en caras +a1 y -a1
nsel,s,loc,x,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,x,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,VOLT,O
!Aplicación en caras +a2 y -a2
nsel,s,loc,y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,VOLT,0
nsel,s,loc,y,a2-0.001,a2+0.001
D,ALL,VOLT,O
!Aplicación en caras +a3 y -a3
nsel,s,loc,z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
!-----
!ARCHIVO CONDICIONES DE CONTORNO
!-----
! a1,a2,a3,epsi_X,epsi_Y,epsi_Z,gamma_XY,gamma_YZ,gamma_XZ
!-----
arg1 = a1
arg2 = a2
arg3 = a3
```

```
arg4 = 0
arg5 = 0
arg6 = 0
arg7 = 1
arg8 = 0
arg9 = 0
! ceRVE argument:
! a1,a2,a3,eps1,eps2,eps3,eps4,eps5,eps6
! a1,a2,a3,eps11,eps22,eps33,eps23,eps13,eps12
!
! /sOLU
! *use,ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0, 0,0,0.5
! SOLVE
! FINISH
! This macro applies CE to a periodic hexaedral RVE
! The RVE must be centred at (0,0,0) and
! a node must exist at (0,0,0)
!+!a1=arg1
!+!a2=arg2
!+!a3=arg3
! APPLIED STRAINS
eps11=arg4
eps22=arg5
eps33=arg6
!---Note: must enter epsij=1/2*gamma
eps12=arg9/2
eps13=arg8/2
eps23=arg7/2 ! (x-y in model)
!---Note: here recovers the other 1/2*gamma
eps21 = eps12
eps31 = eps13
eps32 = eps23
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
! DIR THEORY ANSYS MODEL
! 1 Z
! 2 X
! 3 Y
!------
   CREATE COMPONENT SET: periodic corners, edges and sides
!
!-----
! select side +a1 and -a1 -----
nsel,s,loc,z,-a1-0.001,-a1+0.001
cm,a1n_nodes,node
nsel,s,loc,z,a1-0.001,a1+0.001
```

```
cm,a1p_nodes,node
! select side +a2 and -a2 -----
nsel,s,loc,x,-a2-0.001,-a2+0.001
cm,a2n_nodes,node
nsel,s,loc,x,a2-0.001,a2+0.001
cm,a2p_nodes,node
! select side +a3 and -a3 -----
nsel,s,loc,y,-a3-0.001,-a3+0.001
cm,a3n_nodes,node
nsel,s,loc,y,a3-0.001,a3+0.001
cm,a3p_nodes,node
! select edges a1 a2 -----
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a1n_a2n_nodes,node
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a1n_a2p_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a1p_a2n_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a1p_a2p_nodes,node
! select edges a1 a3 -----
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a3n_nodes
cm,a1n_a3n_nodes,node
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,r,a3p_nodes
cm,a1n_a3p_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a3n_nodes
cm,a1p_a3n_nodes,node
cmsel,s,a1p_nodes
cmsel,r,a3p_nodes
cm,a1p_a3p_nodes,node
! select edges a3 a2 -----
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a3n_a2n_nodes,node
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
```

cm,a3n_a2p_nodes,node
cmsel,s,a3p_nodes

```
cmsel,r,a2n_nodes
cm,a3p_a2n_nodes,node
cmsel,s,a3p_nodes
cmsel,r,a2p_nodes
cm,a3p_a2p_nodes,node
cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,a,a1n_a2p_nodes
cmsel,a,a1p_a2n_nodes
cmsel,a,a1p_a2p_nodes
cmsel,a,a1n_a3n_nodes
cmsel,a,a1n_a3p_nodes
cmsel,a,a1p_a3n_nodes
cmsel,a,a1p_a3p_nodes
cmsel,a,a3n_a2n_nodes
cmsel,a,a3n_a2p_nodes
cmsel,a,a3p_a2n_nodes
cmsel,a,a3p_a2p_nodes
cm,edges_nodes,node
! select corners a1 a2 a3 -----
nsel,ALL
aln_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3,-a1)
a1n_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3,-a1)
a1n_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3,-a1)
a1n_a2p_a3p_corner=node( a2, a3,-a1)
a1p_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3, a1)
a1p_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3, a1)
a1p_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3, a1)
a1p_a2p_a3p_corner=node( a2, a3, a1)
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
nsel,a,node,,a1n_a2n_a3p_corner
nsel,a,node,,a1n_a2p_a3n_corner
nsel,a,node,,a1n_a2p_a3p_corner
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
cm, corners_nodes, node
ALLSEL, ALL
NSEL,S,LOC,x,O
NSEL,R,LOC,Y,O
NSEL,R,LOC,Z,O
D,ALL,ALL
ALLSEL, ALL
CEDELE, ALL
ALLSEL, ALL
ceeq=0
```

```
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
i
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a2n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
 cmsel,s,a2n_nodes
 cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(-x_,y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 3-DIR (Y-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a3n_nodes
 cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
   get x,y,z locations of current node in active coord system
 !
 x_=nx(neg_node)
```

```
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a3p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,-y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 1-DIR (Z-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_nodes
cmsel,u,edges_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
   get x,y,z locations of current node in active coord system
 !
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a1p_nodes
!
  get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 23-DIR (XY-DIR)
L
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
```

```
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
 cmsel,s,a3n_a2n_nodes
 cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a3p_a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,-y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
i
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a3n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
 cmsel,s,a3n_a2p_nodes
 cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a3p_a2n_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,-y_,z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
```

```
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(-eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 31-DIR (YZ-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a3n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a3n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
 *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a1p_a3p_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
Ţ
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a3p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a3p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
 *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
```

```
x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a1p_a3n_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(x_,-y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 12-DIR (YZ-DIR)
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
*do,i,1,num_nodes,1
 cmsel,s,a1n_a2n_nodes
cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
 *if, i, ne, 1, then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
 cmsel,s,a1p_a2p_nodes
! get closest node from component neg_a2
 pos_node=node(-x_,y_,-z_)
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
 ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
!
pos_node=
neg_node=
cmsel,s,a1n_a2p_nodes
cmsel,u,corners_nodes
*get,num_nodes,node,0,count,max
```

```
*do,i,1,num_nodes,1
cmsel,s,a1n_a2p_nodes
 cmsel,u,corners_nodes
! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
*if,i,ne,1,then
 neg_node=ndnext(neg_node)
 *else
  *get,neg_node,node,0,num,min
 *endif
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
 x_=nx(neg_node)
 y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
cmsel,s,a1p_a2n_nodes
! get closest node from component neg_a2
pos_node=node(-x_,y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
*enddo
! PERIODIC BOUNDARY CONDITION Corners
I.
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
nsel,s,node,,a1n_a2n_a3p_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
 z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
```

```
ceeq=ceeq+1
```

```
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y-
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z-
nsel,s,node,,a1n_a2p_a3n_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
   get x,y,z locations of current node in active coord system
!
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y-
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z-
nsel,s,node,,a1n_a2p_a3p_corner
*get,neg_node,node,0,num,min
   get x,y,z locations of current node in active coord system
!
x_=nx(neg_node)
y_=ny(neg_node)
z_=nz(neg_node)
nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner
pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y-
ceeq=ceeq+1
ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z-
ALLSEL, ALL
!-----
!-----
```

```
SOLVE
```

```
!-----
! Postprocesado
!-----
/POST1
```

VSEL,R,LOC,X,0,a1 VSEL,R,LOC,Y,0,a2 VPLOT ESLV,R allsel ETABLE, ,VOLU, ETABLE, ,EPEL,XY SMULT, EPELXYV, VOLU, EPELXY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET,TOTEPELXY ,SSUM,,ITEM,EPELXYV EPELXYO = TOTEPELXY/TOTVOL !Obtencion epsilon12 ETABLE, ,S,XY SMULT, SXYV, VOLU, SXY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM,, ITEM, VOLU *GET,TOTSXY ,SSUM,,ITEM,SXYV SXYO = TOTSXY/TOTVOL!Obtencion sigma12 !-----!RVE calculo C66 !-----*VWRITE, vf, EPELxy0, Sxy0 !Registro de resultados (F10.3,2E12.5) FINISH *CFCLOSE *CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC4, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE

A.5 Fibra circular PZT matriz epoxy CC5

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener e31, e33 y K33 con FIBRA CIRCU
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz
c11m=0.386E+10
c12m=0.257E+10
c13m=0.257E+10
c33m=0.386E+10
c44m=0.064E+10
c66m=0.064E+10
k11m=9
k33m=9
!Propiedades fibra
c11f=12.1E+10
c12f=7.54E+10
c13f=7.52E+10
c33f=11.1E+10
c44f=2.11E+10
c66f=2.28E+10
e15f=12.3
e31f=-5.4
e33f=15.8
k11f=916.38
k33f=830.51
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC5,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```

```
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA, 14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA, 12, c33m
TBDATA, 16, c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP,PERY,2,k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA, 12, c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL,,, div,, 1,,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
```

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

```
!----
      _____
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!Condiciones de contorno
nsel,s,loc,x,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,O
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,x,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,O
D,ALL,VOLT,0
!Aplicación en caras +a2 y -a2
nsel,s,loc,y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
nsel,s,loc,y,a2-0.001,a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
!Aplicación en caras +a3 y -a3
nsel,s,loc,z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,-2*a3
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! Postprocesado
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
```

```
ESLV,R
allsel
ETABLE, ,VOLU,
ETABLE, , EF, Z
SMULT, EFZV, VOLU, EFZ, 1, 1,
SSUM
*GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU
*GET,TOTEFZ,SSUM,,ITEM,EFZV
EFZZO = TOTEFZ/TOTVOL
                    !Obtencion E3
ETABLE, ,VOLU,
ETABLE, ,S,X
ETABLE, ,S,Z
ETABLE, ,D,Z
SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1,
SMULT, SZV, VOLU, SZ, 1, 1,
SMULT, DZV, VOLU, DZ, 1, 1,
SSUM
*GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU
*GET, TOTSX , SSUM, , ITEM, SXV
*GET,TOTSZ ,SSUM,,ITEM,SZV
*GET,TOTDZ ,SSUM,,ITEM,DZV
SXXO = -1*TOTSX/TOTVOL
                     !Obtencion sigma11
SZZO = -1*TOTSZ/TOTVOL
                     !Obtencion sigma33
DZZO = 1*TOTDZ/TOTVOL
                    !Obtencion D3
!-----
!RVE calculo e13, e33 y k33
!-----
*VWRITE,vf,EFzz0,Sxx0,Szz0,Dzz0 !Registro de resultados
(5E12.5)
FINISH
*CFCLOSE
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC5, txt, , APPEND
*ENDDO
*CFCLOSE
```

A.6 Fibra circular PZT matriz epoxy CC6

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener K11 y e15 con FIBRA CIRCULAR
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz
c11m=0.386E+10
c12m=0.257E+10
c13m=0.257E+10
c33m=0.386E+10
c44m=0.064E+10
c66m=0.064E+10
k11m=9
k33m=9
!Propiedades fibra
c11f=12.1E+10
c12f=7.54E+10
c13f=7.52E+10
c33f=11.1E+10
c44f=2.11E+10
c66f=2.28E+10
e15f=12.3
e31f=-5.4
e33f=15.8
k11f=916.38
k33f=830.51
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC6,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```

```
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA, 14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA, 12, c33m
TBDATA, 16, c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP,PERY,2,k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA, 12, c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL,,, div,, 1,,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
```

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

```
!----
      _____
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!Condiciones de contorno
nsel,s,loc,x,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,O
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,x,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,O
D,ALL,VOLT,0
!Aplicación en caras +a2 y -a2
nsel,s,loc,y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
nsel,s,loc,y,a2-0.001,a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,-2*a2
!Aplicación en caras +a3 y -a3
nsel,s,loc,z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
nsel,s,loc,z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,0
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! Postprocesado
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
```

ESLV,R allsel ETABLE, ,VOLU, ETABLE, , EF, Y SMULT, EFYV, VOLU, EFY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET,TOTEFY,SSUM,,ITEM,EFYV EFYYO = TOTEFY/TOTVOL !Obtencion E2 ETABLE, ,VOLU, ETABLE, ,D,Y ETABLE, ,S,YZ SMULT, DYV , VOLU, DY, 1, 1, SMULT, SYZV, VOLU, SYZ, 1, 1, SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET, TOTDY , SSUM, , ITEM, DYV *GET, TOTSYZ , SSUM, , ITEM, SYZV DYYO = TOTDY/TOTVOL!Obtencion D2 -> k11 SYZO = -1*TOTSYZ/TOTVOL !Obtencion sigma23 -> e15 !-----!RVE calculo k11 y e15 !-----*VWRITE,vf,EFyy0,Dyy0,Syz0 !Registro de resultados (4E12.5) FINISH *CFCLOSE *CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC6, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE

A.7 Fibra circular KNN matriz polietileno CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CIRCULAR
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz (PE, nu=0.2, E=100E6)
c11m=1.1111E+8
c12m=2.7778E+7
c13m=2.7778E+7
c33m=1.1111E+8
c44m=4.1667E+7
c66m=4.1667E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas KNN)
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC1,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```

```
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA, 14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA, 12, c33m
TBDATA, 16, c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP,PERY,2,k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA, 12, c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL,,, div,, 1,,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
```

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
allsel
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

```
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!CONDICIONES DE CONTORNO
!Caras a1 y -a1
NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos
D,ALL,VOLT,0 !VOLT=voltaje
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
```

VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados ALLSEL !A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente se div ETABLE,,VOLU, ETABLE, , EPEL, X ! Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, factor a SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de atribut *GET, TOTEPELX, SSUM, , ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXX0=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET, TOTSX , SSUM, , ITEM, SXV *GET,TOTSY ,SSUM,,ITEM,SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_circular_CC1, txt, , APPEND ! APPEND: este fichero se crea además del q *ENDDO

*CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.8 Fibra circular KNN matriz polietileno auxética CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CIRCULAR y
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz (PE, nu=-0.32, E=100E6)
c11m=1.1836E+8
c12m=-2.8694E+7
c13m=-2.8694E+7
c33m=1.1836E+8
c44m=7.3529E+7
c66m=7.3529E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_circular_aux_CC1,txt !Crea un archivo sobre el que se escrib
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
df=sqrt(vf*16*a1*a2/pi) !Diámetro de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
```
VCLEAR, ALL VDELE, ALL, , , 1 !Keypoints K,1,-a1 K,2,a1 K,3,0,-a2 K,4,0,a2 L,1,2 L,3,4 BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2 !Crea volumen rectangular. BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGHT, DEP centro_x=0 centro_y=0 CYL4, centro_x, centro_y, df/2 ASBA,1,2,,,KEEP !Resta áreas. ASBA, área a la que se resta, área restada, SEPO, áreas a man ASBL, ALL, 1 !Elimina líneas de áreas ASBL, ALL, 2 VEXT,ALL,,,0,0,a3,,,, ! Genera volúmenes extruyendo áreas. VEXT,AREA1,AREA2,PASOS EN LOS QUE VGEN,2,ALL,,,0,0,-a3 !Genera volúmenes a partir de un patrón de otros volúmenes. VGEN, PASOS NUMMRG, KP !Une los KP coincidentes !A continuación se agrupan los volúmenes !Matriz FLST, 5, 8, 6, ORDE, 4 !Selecciona. FLST, FITEM,5,5 FITEM, 5, -8 FITEM, 5, 13 FITEM, 5, -16 VSEL,S,,,P51X CM, MATRIZ, VOLU ! Agrupa volúmenes ALLSEL !Fibra VSEL,U,VOLU,,MATRIZ !Deseleccionar matriz CM, FIBRA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDADES, VA

```
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA, 14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA, 12, c33m
TBDATA, 16, c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP,PERY,2,k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA, 12, c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=10
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL,,, div,, 1,,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
```

```
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=8
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ !S=nueva selección
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
ALLSEL
FLST,2,2,5,ORDE,2 !Selección
FITEM,2,22
FITEM, 2, -23
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 55
FITEM, 2, -56
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, -28
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM, 2, -62
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 35
FITEM, 2, -36
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM, 2, 71
FITEM, 2, -72
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,31
FITEM,2,33
ACCAT, P51X
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,66
FITEM,2,68
ACCAT, P51X
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
```

FINISH

```
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!CONDICIONES DE CONTORNO
!Caras a1 y -a1
NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos
D,ALL,VOLT,0 !VOLT=voltaje
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
```

VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados ALLSEL !A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente se div ETABLE,,VOLU, ETABLE, , EPEL, X ! Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, factor a SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de atribut *GET, TOTEPELX, SSUM, , ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXX0=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET, TOTSX , SSUM, , ITEM, SXV *GET,TOTSY ,SSUM,,ITEM,SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_circular_aux_CC1, txt, , APPEND ! APPEND: este fichero se crea además d *ENDDO

*CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.9 Fibra cuadrada KNN matriz polietileno CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CUADRADA
!Propiedades matriz (PE, nu=0.2, E=100E6)
c11m=1.1111E+8
c12m=2.7778E+7
c13m=2.7778E+7
c33m=1.1111E+8
c44m=4.1667E+7
c66m=4.1667E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas KNN)
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_cuadrada_CC1, txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán
!+!vf=0.111
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*DO,vf,0.111,0.666,0.111
l=sqrt(vf*4*a1*a2) !Lado de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
VCLEAR, ALL
```

VDELE,ALL,,,1 !Keypoints K,1,-a1 K,2,a1 K,3,0,-a2 K,4,0,a2 L,1,2 L,3,4 BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2 !Crea volumen rectangular. BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGHT, DEP BLC4,-1/2,-1/2,1,1 !Fibra ASBA,1,2,,,KEEP !Resta áreas. ASBA, área a la que se resta, área restada, SEPO, áreas a man ASBL, ALL, 1 !Elimina líneas de áreas ASBL,ALL,2 VEXT,ALL,,,0,0,a3,,,, ! Genera volúmenes extruyendo áreas. VEXT,AREA1,AREA2,PASOS EN LOS QUE VGEN,2,ALL,,,0,0,-a3 !Genera volúmenes a partir de un patrón de otros volúmenes. VGEN, PASOS NUMMRG, KP !Une los KP coincidentes !A continuación se agrupan los volúmenes !Matriz VSEL,S,VOLU,,5,8 VSEL, A, VOLU, ,13,16 CM, MATRIZ, VOLU ! Agrupa volúmenes ALLSEL !Fibra VSEL,U,VOLU,,MATRIZ !Deseleccionar matriz CM, FIBRA, VOLU ALLSEL !Acoplamiento de áreas FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,26 FITEM,2,29 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 4FITEM,2,13 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,31 FITEM, 2, -32 ACCAT, P51X

FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,15 FITEM, 2, -16 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,35 FITEM, 2, -36 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 19 FITEM, 2, -20 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,0RDE,2 FITEM,2,39 FITEM, 2, -40 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,23 FITEM, 2, -24ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,63 FITEM,2,66 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,43 FITEM,2,46 ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,69 FITEM, 2, -70 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,0RDE,2 FITEM, 2, 49 FITEM, 2, -50ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 74FITEM, 2, -75 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,54 FITEM, 2, -55 ACCAT, P51X

FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 79 FITEM, 2, -80 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,59 FITEM, 2, -60 ACCAT, P51X !Tipo de elemento ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDADES, VA MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA, 16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP,PERZ,2,k33f TB,PIEZ,2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA, 14, e15f TBDATA, 16, e15f TB, ANEL, 2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f

```
TBDATA, 12, c33f
TBDATA,16,c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
!FIBRA
div=8
VSEL,S,VOLU,,FIBRA
ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados
LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas
LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL,A,LOC,Z,-a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha
LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1,
MAT,2 !Asigna el tipo de material
VMESH, ALL
ALLSEL
!MATRIZ
div=6
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1,
LSEL,S,LOC,Z,a3/2
LSEL, A, LOC, Z, -a3/2
LESIZE,ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1,
ALLSEL
MAT,1
VMESH, ALL
ALLSEL
FINISH
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!CONDICIONES DE CONTORNO
!Caras a1 y -a1
NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos
D,ALL,VOLT,O !VOLT=voltaje
```

```
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
```

```
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL, S, LOC, Z, a3-0.001, a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados
ALLSEL
!A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente se div
ETABLE,,VOLU,
ETABLE,, EPEL, X ! Componentes deformación elástica
SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, factor a
SSUM
*GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n<sup>o</sup> elemento,atributo,tipo de atribut
*GET, TOTEPELX, SSUM,, ITEM, EPELXV !Obtener deformación total
EPELXXO=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11
ETABLE, ,S,X
ETABLE, ,S,Y
SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1,
SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1,
```

SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET,TOTSX ,SSUM,,ITEM,SXV *GET,TOTSY ,SSUM,,ITEM,SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL !Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_cuadrada_CC1, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.10 Fibra cuadrada KNN matriz polietileno auxética CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CUADRADA y matri
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz (PE, nu=-0.32, E=100E6)
c11m=1.1836E+8
c12m=-2.8694E+7
c13m=-2.8694E+7
c33m=1.1836E+8
c44m=7.3529E+7
c66m=7.3529E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas KNN)
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_cuadrada_aux_CC1,txt !Crea un archivo sobre el que se escribirán l
!A continuación, se crea un bucle para diferentes fracciones volumétricas
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
l=sqrt(vf*4*a1*a2) !Lado de la fibra
!_____
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
VCLEAR, ALL
```

VDELE, ALL,,,1 !Keypoints K,1,-a1 K,2,a1 K,3,0,-a2 K,4,0,a2 L,1,2 L,3,4 BLC4,-a1,-a2,2*a1,2*a2 !Crea volumen rectangular. BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGH BLC4,-1/2,-1/2,1,1 !Fibra ASBA,1,2,,,KEEP !Resta áreas. ASBA, área a la que se resta, área restada, SEPO, áreas ASBL, ALL, 1 !Elimina líneas de áreas ASBL,ALL,2 VEXT,ALL,,,0,0,a3,,,, ! Genera volúmenes extruyendo áreas. VEXT,AREA1,AREA2,PASOS EN L VGEN,2,ALL,,,0,0,-a3 !Genera volúmenes a partir de un patrón de otros volúmenes. VGEN, NUMMRG, KP ! Une los KP coincidentes !A continuación se agrupan los volúmenes !Matriz VSEL,S,VOLU,,5,8 VSEL, A, VOLU, ,13,16 CM, MATRIZ, VOLU ! Agrupa volúmenes ALLSEL !Fibra VSEL,U,VOLU,,MATRIZ !Deseleccionar matriz CM, FIBRA, VOLU ALLSEL !Acoplamiento de áreas FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,26 FITEM, 2, 29 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 4FITEM,2,13 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,31 FITEM, 2, -32 ACCAT, P51X

FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,15 FITEM, 2, -16 ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 35 FITEM, 2, -36 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,19 FITEM, 2, -20ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,39 FITEM, 2, -40 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 23 FITEM, 2, -24 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,63 FITEM, 2, 66 ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,43 FITEM,2,46 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,69 FITEM, 2, -70 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,0RDE,2 FITEM, 2, 49 FITEM, 2, -50 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,0RDE,2 FITEM, 2, 74 FITEM, 2, -75 ACCAT,P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,54 FITEM, 2, -55 ACCAT,P51X

FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM, 2, 79 FITEM, 2, -80 ACCAT, P51X FLST,2,2,5,ORDE,2 FITEM,2,59 FITEM, 2, -60 ACCAT, P51X !Tipo de elemento ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDAD MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA,16,c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP,PERZ,2,k33f TB,PIEZ,2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA,14,e15f TBDATA,16,e15f TB,ANEL,2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f

TBDATA, 12, c33f TBDATA, 16, c66f TBDATA, 19, c44f TBDATA,21,c44f !MALLADO **!**FIBRA div=10 VSEL,S,VOLU,,FIBRA ASLV,S !Selecciona las áreas contenidas en los volúmenes seleccionados LSLA,S !Selecciona las líneas contenidas en las áreas seleccionadas LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1, LSEL,S,LOC,Z,a3/2 LSEL,A,LOC,Z,-a3/2 !A=selección adicional a la que ya estaba hecha LESIZE, ALL, ,, div/(a1/a3),, 1,,, 1, MAT,2 !Asigna el tipo de material VMESH, ALL ALLSEL !MATRIZ div=8 VSEL,S,VOLU,,MATRIZ ASLV,S LSLA,S LESIZE, ALL, ,, div, ,1, ,, 1, LSEL,S,LOC,Z,a3/2 LSEL, A, LOC, Z, -a3/2 LESIZE, ALL, , ,div/(a1/a3), ,1, , ,1, ALLSEL MAT,1 VMESH, ALL ALLSEL FINISH !-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL, ALL !CONDICIONES DE CONTORNO !Caras a1 y -a1 NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos D,ALL,VOLT,0 !VOLT=voltaje NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001

```
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
!------
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados
ALLSEL
!A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente
ETABLE,,VOLU,
ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica
SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, fa
SSUM
*GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n<sup>o</sup> elemento,atributo,tipo de a
*GET, TOTEPELX, SSUM,, ITEM, EPELXV !Obtener deformación total
EPELXXO=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11
ETABLE, ,S,X
ETABLE, ,S,Y
SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1,
SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1,
```

SSUM

*GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU *GET,TOTSX ,SSUM,,ITEM,SXV *GET,TOTSY ,SSUM,,ITEM,SYV SXX0 = TOTSX/TOTVOL !Obtencion sigma11 SYY0 = TOTSY/TOTVOL !Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE,vf,EPELxx0,Sxx0,Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN,resultado_fibra_cuadrada_aux_CC1,txt, ,APPEND *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.11 Fibra esférica KNN matriz polietileno CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA ESFÉRICA (
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz (PE, nu=0.2, E=100E6)
c11m=1.1111E+8
c12m=2.7778E+7
c13m=2.7778E+7
c33m=1.1111E+8
c44m=4.1667E+7
c66m=4.1667E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas KNN)
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_esferica_03_CC1,txt
*DO,vf,0.111,0.444,0.111
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
d_f= (48*a1*a2*a3*vf/pi)**(1/3) !Diametro de la fibra
r_f = (6*a1*a2*a3*vf/pi)**(1/3) !Radio de la fibra
```

VCLEAR, ALL VDELE, ALL, , , 1 BLC4,0,0,a1,a2,a3 SPH4,0,0,r_f VPTN,all VDELE, 4, , ,1 NUMMRG, KP !MATRIZ !-----VSEL,S, , ,5 CM, MATRIZ, VOLU allsel !FIBRA !-----VSEL,S, , ,3 CM, PARTICULA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento !-----ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDADES, VA MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB, PIEZ, 1 ! Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m

```
!FIBRA
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12
MP, PERX, 2, k11f
MP, PERY, 2, k11f
MP,PERZ,2,k33f
TB,PIEZ,2
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA,14,e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA,12,c33f
TBDATA,16,c66f
TBDATA,19,c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
! Mallado fibra
!-----
div = 8
VSEL,S,VOLU,,PARTICULA
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE,ALL, , ,div, ,1, , ,1,
MAT,2
VMESH,all
allsel
MSHKEY,0
! Mallado Matriz
!-----
div=6
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
MAT,1
LESIZE,ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LESIZE,22, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,23, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,24, , ,div/2, ,1, , ,1,
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
VMESH,all
allsel
VSYMM,X,all, , , ,0,0
```

```
VSYMM,Y,all, , , ,0,0
VSYMM,Z,all, , , ,0,0
NUMMRG, NODE
NUMMRG, KP
FINISH
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL, ALL
!CONDICIONES DE CONTORNO
!Caras a1 y -a1
NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos
D,ALL,VOLT,O !VOLT=voltaje
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL, S, LOC, Y, -a2-0.001, -a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
```

```
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados
ALLSEL
!A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente
ETABLE,,VOLU,
ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica
SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, fa
SSUM
*GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n<sup>o</sup> elemento,atributo,tipo de a
*GET, TOTEPELX, SSUM,, ITEM, EPELXV !Obtener deformación total
EPELXXO=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11
ETABLE, ,S,X
ETABLE, ,S,Y
SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1,
SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1,
SSUM
*GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU
*GET,TOTSX ,SSUM,,ITEM,SXV
*GET, TOTSY , SSUM, , ITEM, SYV
SXXO = TOTSX/TOTVOL
                      !Obtencion sigma11
SYYO = TOTSY/TOTVOL
                      !Obtencion sigma22
!Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento
*VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0
(4E12.5)
FINISH
*CFCLOSE !Cierre archivo
*CFOPEN, resultado_fibra_esferica_03_CC1, txt, , APPEND
*ENDDO
*CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle
```

A.12 Fibra esférica KNN matriz polietileno auxética CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA ESFÉRICA (conect
pi=acos(-1)
!Propiedades matriz (PE, nu=-0.32, E=100E6)
c11m=1.1836E+8
c12m=-2.8694E+7
c13m=-2.8694E+7
c33m=1.1836E+8
c44m=7.3529E+7
c66m=7.3529E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_esferica_03_aux_CC1,txt
*D0,vf,0.111,0.444,0.111
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
d_f= (48*a1*a2*a3*vf/pi)**(1/3) !Diametro de la fibra
r_f = (6*a1*a2*a3*vf/pi)**(1/3) !Radio de la fibra
```

```
VCLEAR, ALL
VDELE, ALL, ,, 1
BLC4,0,0,a1,a2,a3
SPH4,0,0,r_f
VPTN,all
VDELE, 4, , ,1
NUMMRG, KP
!MATRIZ
!-----
VSEL,S, , ,5
CM, MATRIZ, VOLU
allsel
!FIBRA
!-----
VSEL,S, , ,3
CM, PARTICULA, VOLU
ALLSEL
!Tipo de elemento
!-----
ET,2,SOLID226,1001
!Materiales
!MATRIZ
EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDAD
MP, PERX, 1, k11m
MP, PERY, 1, k11m
MP, PERZ, 1, k33m
TB,PIEZ,1 !Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica
TBDATA,3,0
TBDATA,6,0
TBDATA,9,0
TBDATA,14,0
TBDATA,16,0
TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía
TBDATA,1,c11m,c12m,c13m
TBDATA,7,c11m,c13m
TBDATA,12,c33m
TBDATA,16,c66m
TBDATA, 19, c44m
TBDATA,21,c44m
```

!FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP,PERZ,2,k33f TB, PIEZ, 2 TBDATA,3,e31f TBDATA,6,e31f TBDATA,9,e33f TBDATA, 14, e15f TBDATA,16,e15f TB, ANEL, 2 TBDATA,1,c11f,c12f,c13f TBDATA,7,c11f,c13f TBDATA, 12, c33f TBDATA,16,c66f TBDATA, 19, c44f TBDATA,21,c44f !MALLADO ! Mallado fibra !----div = 8VSEL,S,VOLU,,PARTICULA ASLV,S LSLA,S LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1, MAT,2 VMESH,all allsel MSHKEY,0 ! Mallado Matriz !----div=6 VSEL,S,VOLU,,MATRIZ MAT,1 LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1, LESIZE,22, , ,div/2, ,1, , ,1, LESIZE,23, , ,div/2, ,1, , ,1, LESIZE,24, , ,div/2, ,1, , ,1, MSHKEY,0 MSHAPE, 1, 3d VMESH,all allsel VSYMM,X,all, , , ,0,0

VSYMM,Y,all, , , ,0,0 VSYMM,Z,all, , , ,0,0 NUMMRG,NODE NUMMRG, KP FINISH !-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL, ALL !CONDICIONES DE CONTORNO !Caras a1 y -a1 NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos D,ALL,VOLT,0 !VOLT=voltaje NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001 D,ALL,UX,a1 D,ALL,VOLT,0 !Caras a2 y -a2 NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,0 NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,0 !Caras a3 y -a3 NSEL, S, LOC, Z, -a3-0.001, -a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,O NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,0 ALLSEL SOLVE FINISH !-----! POSTPROCESO

!-----/POST1 VSEL,R,LOC,X,0,a1 VSEL,R,LOC,Y,0,a2 VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados ALLSEL !A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente se div ETABLE, , VOLU, ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, factor a SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de atribut *GET, TOTEPELX, SSUM,, ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXXO=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET,TOTSX ,SSUM,,ITEM,SXV *GET, TOTSY , SSUM, , ITEM, SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_esferica_03_aux_CC1, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.13 Fibra hexaédrica KNN matriz polietileno CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CUADRADA (
!Propiedades matriz (PE, nu=0.2, E=100E6)
c11m=1.1111E+8
c12m=2.7778E+7
c13m=2.7778E+7
c33m=1.1111E+8
c44m=4.1667E+7
c66m=4.1667E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra (inclusiones piezoeléctricas KNN)
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_cuad_03_CC1, txt
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
l= (8*vf*a1*a2*a3)**(1/3) !Lado de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
VCLEAR, ALL
VDELE, ALL, ,, 1
```

BLC4,0,0,a1,a2,a3 BLC4,0,0,1/2,1/2,1/2 VPTN,all NUMMRG, KP !MATRIZ !-----VSEL,S, , ,4 CM, MATRIZ, VOLU allsel **!**FIBRA !-----VSEL,S, , ,3 CM, PARTICULA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento !-----ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDADES, VA MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP, PERZ, 1, k33m TB, PIEZ, 1 ! Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA, 12, c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA, 19, c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP, PERY, 2, k11f MP, PERZ, 2, k33f TB, PIEZ, 2

```
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA,14,e15f
TBDATA,16,e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA,12,c33f
TBDATA,16,c66f
TBDATA,19,c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
! Mallado fibra
!-----
div = 8
VSEL,S,VOLU,,PARTICULA
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , , div, ,1, , ,1,
MAT,2
VMESH,all
allsel
MSHKEY,0
! Mallado Matriz
!-----
div=6
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
MAT,1
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LESIZE,22, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,23, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,24, , ,div/2, ,1, , ,1,
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
VMESH,all
allsel
VSYMM,X,all, , , ,0,0
VSYMM,Y,all, , , ,0,0
VSYMM,Z,all, , , ,0,0
NUMMRG, NODE
NUMMRG, KP
FINISH
```

!-----! SOLUCIÓN !-----/SOLU ANTYPE, STATIC CSYS,0 ALLSEL, ALL **!**CONDICIONES DE CONTORNO !Caras a1 y -a1 NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001 D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos D,ALL,VOLT,O !VOLT=voltaje NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001 D,ALL,UX,a1 D,ALL,VOLT,O !Caras a2 y -a2 NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,0 NSEL, S, LOC, Y, a2-0.001, a2+0.001 D,ALL,UY,O D,ALL,VOLT,O !Caras a3 y -a3 NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,O NSEL,S,LOC,Z,a3-0.001,a3+0.001 D,ALL,UZ,O D,ALL,VOLT,O ALLSEL, ALL, ALL SOLVE FINISH !-----! POSTPROCESO !-----/POST1 VSEL,R,LOC,X,0,a1 VSEL,R,LOC,Y,0,a2 VPLOT ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados

ALLSEL

!A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente ETABLE,,VOLU, ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, fa SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de a *GET, TOTEPELX, SSUM,, ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXX0=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET,TOTSX ,SSUM,,ITEM,SXV *GET, TOTSY , SSUM, , ITEM, SYV SXXO = TOTSX/TOTVOL!Obtencion sigma11 SYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_cuad_03_CC1, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

A.14 Fibra hexaédrica KNN matriz polietileno auxética CC1

```
FINISH
/CLEAR
!A continuación, se detalla el uso del MEF para obtener C11 y C22 con FIBRA CUADRADA (conect
!Propiedades matriz (PE, nu=-0.32, E=100E6)
c11m=1.1836E+8
c12m=-2.8694E+7
c13m=-2.8694E+7
c33m=1.1836E+8
c44m=7.3529E+7
c66m=7.3529E+7
k11m=2.3
k33m=2.3
!Propiedades fibra
c11f=13.62E+10
c12f=8.62+10
c13f=6.59E+10
c33f=9.85E+10
c44f=2.28E+10
c66f=2.5E+10
e15f=15.6
e31f=-11.2
e33f=15.9
k11f=1100
k33f=975
!Geometría del RVE
a1=0.5
a2=a1
a3=a1
*CFOPEN, resultado_fibra_cuad_03_aux_CC1, txt
*D0,vf,0.111,0.666,0.111
l= (8*vf*a1*a2*a3)**(1/3) !Lado de la fibra
!-----
! PREPROCESO
!-----
/PREP7
VCLEAR, ALL
VDELE, ALL, , , 1
```

BLC4,0,0,a1,a2,a3 BLC4,0,0,1/2,1/2,1/2 VPTN,all NUMMRG, KP !MATRIZ !-----VSEL,S, , ,4 CM, MATRIZ, VOLU allsel !FIBRA !-----VSEL,S, , ,3 CM, PARTICULA, VOLU ALLSEL !Tipo de elemento !-----ET,2,SOLID226,1001 !Materiales !MATRIZ EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 !Sistema de unidades para campo magnético. EMUNIT, TIPO DE UNIDAD MP, PERX, 1, k11m MP, PERY, 1, k11m MP,PERZ,1,k33m TB, PIEZ, 1 ! Activa la matriz para material properties (MP). PIEZ=matriz piezoeléctrica TBDATA,3,0 TBDATA,6,0 TBDATA,9,0 TBDATA,14,0 TBDATA,16,0 TB, ANEL, 1 ! ANEL=Anisotropía TBDATA,1,c11m,c12m,c13m TBDATA,7,c11m,c13m TBDATA,12,c33m TBDATA, 16, c66m TBDATA,19,c44m TBDATA,21,c44m !FIBRA EMUNIT, EPZRO, 8.85E-12 MP, PERX, 2, k11f MP,PERY,2,k11f MP,PERZ,2,k33f TB,PIEZ,2
```
TBDATA,3,e31f
TBDATA,6,e31f
TBDATA,9,e33f
TBDATA, 14, e15f
TBDATA, 16, e15f
TB, ANEL, 2
TBDATA,1,c11f,c12f,c13f
TBDATA,7,c11f,c13f
TBDATA,12,c33f
TBDATA, 16, c66f
TBDATA, 19, c44f
TBDATA,21,c44f
!MALLADO
! Mallado fibra
!-----
div = 8
VSEL,S,VOLU,,PARTICULA
ASLV,S
LSLA,S
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
MAT,2
VMESH,all
allsel
MSHKEY,0
! Mallado Matriz
!-----
div=6
VSEL,S,VOLU,,MATRIZ
MAT,1
LESIZE, ALL, , ,div, ,1, , ,1,
LESIZE,22, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,23, , ,div/2, ,1, , ,1,
LESIZE,24, , ,div/2, ,1, , ,1,
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3d
VMESH,all
allsel
VSYMM,X,all, , , ,0,0
VSYMM, Y, all, , , ,0,0
VSYMM,Z,all, , , ,0,0
NUMMRG, NODE
NUMMRG, KP
FINISH
```

```
!-----
! SOLUCIÓN
!-----
/SOLU
ANTYPE, STATIC
CSYS,0
ALLSEL,ALL
!CONDICIONES DE CONTORNO
!Caras a1 y -a1
NSEL,S,LOC,X,-a1-0.001,-a1+0.001
D,ALL,UX,-a1 !CDC sobre nodos
D,ALL,VOLT,0 !VOLT=voltaje
NSEL,S,LOC,X,a1-0.001,a1+0.001
D,ALL,UX,a1
D,ALL,VOLT,O
!Caras a2 y -a2
NSEL,S,LOC,Y,-a2-0.001,-a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Y,a2-0.001,a2+0.001
D,ALL,UY,O
D,ALL,VOLT,O
!Caras a3 y -a3
NSEL,S,LOC,Z,-a3-0.001,-a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,0
NSEL, S, LOC, Z, a3-0.001, a3+0.001
D,ALL,UZ,O
D,ALL,VOLT,O
ALLSEL, ALL, ALL
SOLVE
FINISH
!-----
! POSTPROCESO
!-----
/POST1
VSEL,R,LOC,X,0,a1
VSEL,R,LOC,Y,0,a2
VPLOT
ESLV, R !Selecciona los elementos asociados a los volúmenes seleccionados
```

ALLSEL

!A continuación, se opera multiplicando el volumen por epsilon, se suma, y finalmente se div ETABLE,,VOLU, ETABLE,, EPEL, X !Componentes deformación elástica SMULT, EPELXV, VOLU, EPELX, 1, 1, !SMULT, nombre_resultados, multiplicando1, multiplicando2, factor a SSUM *GET,TOTVOL,SSUM,,ITEM,VOLU !*GET,nombre_vble_1,entidad,n^o elemento,atributo,tipo de atribut *GET, TOTEPELX, SSUM, , ITEM, EPELXV !Obtener deformación total EPELXXO=TOTEPELX/TOTVOL !De aquí se obtiene epsilon11 ETABLE, ,S,X ETABLE, ,S,Y SMULT, SXV, VOLU, SX, 1, 1, SMULT, SYV, VOLU, SY, 1, 1, SSUM *GET, TOTVOL, SSUM, , ITEM, VOLU *GET, TOTSX , SSUM, , ITEM, SXV *GET, TOTSY , SSUM, , ITEM, SYV !Obtencion sigma11 SXXO = TOTSX/TOTVOLSYYO = TOTSY/TOTVOL!Obtencion sigma22 !Con estos datos, se puede calcular c11 y c12 de la matriz de comportamiento *VWRITE, vf, EPELxx0, Sxx0, Syy0 (4E12.5) FINISH *CFCLOSE !Cierre archivo *CFOPEN, resultado_fibra_cuad_03_aux_CC1, txt, , APPEND *ENDDO *CFCLOSE !Cierre definitivo del archivo, fuera del bucle

Apéndice B Códigos de Matlab

B.1 Verificación del modelo

clear all close all % COMPARATIVA RESULTADOS BERGER Y RVE C11_Berger=[0.111 4.47592e+009 0.222 5.26912e+009 0.333 6.51558e+009 0.444 8.15864e+009 0.555 1.08782e+010 0.666 1.6034e+010]; C12_Berger=[0.111 2.85714e+009 0.222 3.22286e+009 0.333 3.58857e+009 0.444 4.04571e+009 0.555 4.59429e+009 0.666 5.62286e+009]; C13_Berger=[0.111 2.89398e+009 0.222 3.32378e+009 0.333 3.89685e+009 0.444 4.69914e+009 0.555 5.95989e+009 0.666 8.36676e+009]; C33_Berger=[0.111 9.97151e+009 0.222 1.59544e+010 0.333 2.17949e+010 0.444 2.80627e+010 0.555 3.47578e+010 0.666 4.21652e+010]; C44_Berger=[0.111 7.80822e+008

```
0.222 9.17808e+008
0.333 1.15068e+009
0.444 1.42466e+009
0.555 1.83562e+009
0.666 2.46575e+009];
C66_Berger=[0.111 7.28324e+008
0.222 8.43931e+008
0.333 9.82659e+008
0.444 1.20231e+009
0.555 1.52601e+009
0.666 2.10405e+009];
e13_Berger=[0.111 -0.0243902
0.222 -0.0609756
0.333 -0.101045
0.444 -0.163763
0.555 -0.25784
0.666 - 0.439024];
vf=C66_Berger(:,1);
e15_Berger=[0.111 0.000792079
0.222 0.00217822
0.333 0.00455446
0.444 0.00871287
0.555 0.0180198
0.666 0.0433663];
e33_Berger=[0.111 2.149
0.222 4.29799
0.333 6.44699
0.444 8.59599
0.555 10.788
0.666 12.851];
k33_Berger=[0.111 8.42105e-010
0.222 1.66667e-009
0.333 2.50877e-009
0.444 3.35088e-009
0.555 4.22807e-009
0.666 5.07018e-009];
k11_Berger=[0.111 1.01156e-010
0.222 1.22832e-010
0.333 1.56069e-010
0.444 2.00867e-010
0.555 2.81792e-010
0.666 4.49422e-010];
```

resul_CC1_rve=[0.11100E+00 0.99269E+00 0.44400E+10 0.28503E+10

```
0.22200E+00 0.99747E+00 0.52728E+10 0.32076E+10
 0.33300E+00 0.10001E+01 0.64278E+10 0.36070E+10
 0.44400E+00 0.10014E+01 0.81247E+10 0.40636E+10
 0.55500E+00 0.10028E+01 0.10846E+11 0.46425E+10
 0.66600E+00 0.10056E+01 0.16076E+11 0.57951E+10];
resul_CC2_rve=[0.11100E+00 0.10000E+01 0.29202E+10 0.98557E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.33687E+10 0.15927E+11
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.39597E+10 0.22107E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.47826E+10 0.28464E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.60482E+10 0.35160E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.84919E+10 0.42756E+11];
resul_CC3_rve=[ 0.11100E+00 0.99917E+00 0.79259E+09
 0.22200E+00 0.99936E+00 0.98705E+09
 0.33300E+00 0.99963E+00 0.12441E+10
 0.44400E+00 0.10002E+01 0.16075E+10
 0.55500E+00 0.10016E+01 0.21834E+10
 0.66600E+00 0.10059E+01 0.33338E+10];
resul_CC4_rve=[ 0.111 0.99859E+00 0.75547E+09
0.222 0.99861E+00 0.87988E+09
0.333 0.99870E+00 0.10280E+10
0.444 0.99908E+00 0.12274E+10
0.555 0.10003E+01 0.15399E+10
0.666 0.10046E+01 0.21726E+10];
resul_CC5_rve=[0.11100E+00 0.10000E+01 -0.24454E-01 0.21935E+01 0.91924E-09
0.22200E+00 0.10000E+01 -0.58286E-01 0.43797E+01 0.17584E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.10247E+00 0.65581E+01 0.25970E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.16368E+00 0.87234E+01 0.34346E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.25749E+00 0.10864E+02 0.42704E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.43875E+00 0.12937E+02 0.51012E-08];
resul_CC6_rve=[ 0.11100E+00 0.96969E+00 0.87627E-10 0.79610E-03
 0.22200E+00 0.96958E+00 0.10133E-09 0.20943E-02
 0.33300E+00 0.96935E+00 0.11956E-09 0.42119E-02
 0.44400E+00 0.96932E+00 0.14553E-09 0.80329E-02
 0.55500E+00 0.97014E+00 0.18746E-09 0.15978E-01
 0.66600E+00 0.97429E+00 0.27571E-09 0.38450E-01];
C11_rve=resul_CC1_rve(:,3);
C12_rve=resul_CC1_rve(:,4);
C13_rve=resul_CC2_rve(:,3);
C33_rve=resul_CC2_rve(:,4);
C44_rve=resul_CC3_rve(:,3);
C66_rve=resul_CC4_rve(:,3);
e13_rve=resul_CC5_rve(:,3);
e33_rve=resul_CC5_rve(:,4);
k33_rve=resul_CC5_rve(:,5);
```

```
k11_rve=resul_CC6_rve(:,3);
e15_rve=resul_CC6_rve(:,4);
%% Ahora, se complementa con la validación teórica
% PAPER CHAN 1989
%-----
%Propiedades de la PZT-7A [Pa; C/m2; (F/m)/k0]
k0 = 8.8541878176e-12; %C^2 /(N m^2);
%-----
c11=12.1E+10;
c12=7.54E+10;
c13=7.52E+10;
c33=11.1E+10;
c44=2.11E+10;
c66=2.28E+10;
e15=12.3;
e31=-5.4;
e33=15.8;
k11=916.38;
k33=830.51;
%-----
k11 = k11 * k0;
k33 = k33 * k0;
CC=[c11 c12 c13 0 0 0;
   c12 c11 c13 0 0 0;
   c13 c13 c33 0 0 0;
     0
       0 \quad 0 \quad c44 \quad 0 \quad 0;
     0
       0 \quad 0 \quad 0 \quad c44 \quad 0;
     0 0 0 0 0 c66];
ee=[0 0 0 0 e150;
    0 0 0 e15 0 0;
    e31 e31 e33 0 0 0];
kk=[k11 0 0;
    0 k11 0;
    0
      0 k33];
SS = inv(CC); dd = ee*SS; eps = kk + dd*ee';
MC2 = [CC - ee';
     ee kk];
MS2 = [SS dd';
     dd eps];
ME2 = [CC ee']
     ee -kk];
```

```
CC_p = CC; ee_p = ee; kk_p = kk;
SS_p = SS; dd_p = dd; eps_p = eps;
%Propiedades de la matriz Epoxy [Pa; C/m2; (F/m)/k0]
k0 = 8.8541878176e-12; %C^2 /(N m^2);
%-----
c11=0.386E+10;
c12=0.257E+10;
c13=0.257E+10;
c33=0.386E+10;
c44=0.064E+10;
c66=0.064E+10;
e15= 0.0;
e31= 0.0;
e33= 0.0;
k11=9;
k33=9;
%-----
k11 = k11 * k0;
k33 = k33 * k0;
CC=[c11 c12 c13 0 0 0;
   c12 c11 c13 0 0 0 ;
   c13 c13 c33 0 0 0;
       0 \quad 0 \quad c44 \quad 0 \quad 0;
    0
    0 0 0 0 c44 0;
    0 0 0 0 0 c66];
ee=[0 0 0 0 e15 0;
    0 0 0 e15 0 0;
    e31 e31 e33 0 0 0];
kk = [k11 \ 0 \ 0;
    0 k11 0 ;
      0 k33];
    0
SS = inv(CC); dd = ee*SS; eps = kk + dd*ee';
MC1 = [CC - ee';
    ee kk];
MS1 = [SS dd';
    dd eps];
ME1 = [CC ee']
    ee -kk];
CC_m = CC; ee_m = ee; kk_m = kk;
SS_m = SS; dd_m = dd; eps_m = eps;
%-----
% Paper Chan_1989
%-----
```

```
% d33_p=167e-12;
% S33_p=13.9e-12;
% S11_m=216e-12;
C11_p = CC_p(1,1);
C12_p = CC_p(1,2);
C13_p = CC_p(1,3);
C33_p = CC_p(3,3);
C11_m = CC_m(1,1);
C12_m = CC_m(1,2);
d33_p = dd_p(3,3);
S33_p = SS_p(3,3);
S11_m = SS_m(1,1);
e33_p = ee_p(3,3);
e31_p = ee_p(3,1);
eps33_p = eps_p(3,3);
eps11_m = eps_m(1,1);
k33_p = kk_p(3,3);
rho_p = 7600; % kg/m^3
rho_m = 1150; % kg/m^3
v=0.111:0.111:0.666;
C33_teo = [];
d33_teo = [];
eps33_teo = [];
k33_teo = [];
rho_teo = [];
e33_teo = [];
for i=1:max(size(v))
s_v = v(i) * S11_m + (1 - v(i)) * S33_p;
C_v = C11_p + C12_p + v(i)*(C11_m + C12_m)/(1 - v(i));
C33 = (1 - v(i))*C11_m + v(i)*(C33_p - 2*((C13_p - C12_m)^2)/C_v);
e33 = v(i)*( e33_p - 2*e31_p*(C13_p - C12_m)/C_v );
eps33= ( v(i)*eps33_p - v(i)*(1 - v(i))*(d33_p^2)/s_v + ( 1 - v(i) )*eps11_m );
k33= v(i)*( k33_p + 2*(e31_p^2)/C_v ) + ( 1 - v(i) )*eps11_m;
e33_teo = [e33_teo e33];
C33_teo = [C33_teo C33];
```

```
d33_teo
          = [d33_teo v(i)*S11_m*d33_p/s_v];
eps33_teo = [eps33_teo eps33];
k33_teo
        = [k33_teo k33];
rho_teo
          = [rho_teo ( v(i)*rho_p + (1-v(i))*rho_m) ];
%kt_teo
           = [kt_teo (1 - C33(i)/C33_D).^(1/2)];
end
e33_teo=(e33_teo)';
C33_teo=(C33_teo)';
k33_teo=(k33_teo)';
%%
figure(1)
plot(vf,C11_Berger(:,2),'-o');hold on;
plot(vf,C11_rve,'-sq');
axis square;
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.2e11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11} [ N/m<sup>2</sup>]');
hold off;
figure(2)
plot(vf,C12_Berger(:,2),'-o');hold on;
plot(vf,C12_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0.2e10 0.7e10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{12} [ N/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(3)
plot(vf,C13_Berger(:,2),'-o');hold on;
plot(vf,C13_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0.2e10 0.1e11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13} [ N/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(4)
plot(vf,C33_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,C33_rve,'-sq');hold on
plot(vf,C33_teo,'LineWidth',2.5)
axis square
legend('Berger et al 2005', 'RVE', 'Chan et al 1989')
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.5e11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33} [ N/m<sup>2</sup> ]');
```

```
hold off;
%%
figure(5)
plot(vf,C44_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,C44_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.04e11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{44} [ N/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
%%
figure(6)
plot(vf,C66_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,C66_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0.5e9 0.25e10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{66} [ N/m<sup>2</sup>]');
hold off;
figure(7)
plot(vf,e13_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,e13_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([-0.5 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13} [ C/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(8)
plot(vf,e33_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,e33_rve,'-sq');hold on
plot(vf,e33_teo,'LineWidth',2.5)
axis square
legend('Berger et al 2005', 'RVE', 'Chan et al 1989')
xlim([0 0.8]); ylim([0 15]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33} [ C/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(9)
plot(vf,k33_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,k33_rve,'-sq');hold on
plot(vf,k33_teo,'LineWidth',2.5)
axis square
legend('Berger et al 2005', 'RVE', 'Chan et al 1989')
xlim([0 0.8]); ylim([0 6e-9]);
```

```
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\in_{33} [ F/m ]');
hold off;
figure(10)
plot(vf,k11_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,k11_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([7.5e-11 5e-10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\in_{11} [ F/m ]');
hold off;
figure(11)
plot(vf,e15_Berger(:,2),'-o');hold on
plot(vf,e15_rve,'-sq')
axis square
legend('Berger et al 2005','RVE')
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.05]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{15} [ C/m^2 ]');
hold off;
```

B.2 Figuras de mérito para inclusiones circular, cuadrada y hexaédrica

```
function [K31,K33,Kt,Kp,g31,g33]=fig_merito(C11,C12,C13,C33,C44,C66,e13,e33,k33,k11,e1
%Entrada: C, e y per_eps
C_vf1=[C11(2,1) C12(2,1) C13(2,1) 0 0 0;C12(2,1) C11(2,1) C13(2,1) 0 0 0;C13(2,1) C13(2,1) C1
C_vf2=[C11(3,1) C12(3,1) C13(3,1) 0 0 0;C12(3,1) C11(3,1) C13(3,1) 0 0 0;C13(3,1) C13(4,1) C1
C_vf3=[C11(4,1) C12(4,1) C13(4,1) 0 0 0;C12(4,1) C11(4,1) C13(4,1) 0 0 0;C13(4,1) C13(4,1) C1
C_vf4=[C11(5,1) C12(5,1) C13(5,1) 0 0 0;C12(5,1) C11(5,1) C13(5,1) 0 0 0;C13(5,1) C13(5,1) C1
C_vf5=[C11(6,1) C12(6,1) C13(6,1) 0 0 0;C12(6,1) C11(6,1) C13(6,1) 0 0 0;C13(6,1) C13(6,1) C1
C_vf6=[C11(7,1) C12(7,1) C13(7,1) 0 0 0;C12(7,1) C11(7,1) C13(7,1) 0 0 0;C13(7,1) C13(7,1) C1
e_vf1=[0 0 0 0 e15(2,1) 0;0 0 0 e15(2,1) 0 0;e13(2,1) e13(2,1) e33(2,1) 0 0 0];
e_vf2=[0 0 0 0 e15(3,1) 0;0 0 0 e15(3,1) 0 0;e13(3,1) e13(3,1) e33(3,1) 0 0 0];
e_vf3=[0 0 0 0 e15(4,1) 0;0 0 0 e15(4,1) 0 0;e13(4,1) e13(4,1) e33(4,1) 0 0 0];
e_vf4=[0 0 0 0 e15(5,1) 0;0 0 0 e15(5,1) 0 0;e13(5,1) e13(5,1) e33(5,1) 0 0 0];
e_vf5=[0 0 0 0 e15(6,1) 0;0 0 0 e15(6,1) 0 0;e13(6,1) e13(6,1) e33(6,1) 0 0 0];
e_vf6=[0 0 0 0 e15(7,1) 0;0 0 0 e15(7,1) 0 0;e13(7,1) e13(7,1) e33(7,1) 0 0 0];
per_eps_vf1=[k11(2,1) 0 0;0 k11(2,1) 0;0 0 k33(2,1)];
per_eps_vf2=[k11(3,1) 0 0;0 k11(3,1) 0;0 0 k33(3,1)];
per_eps_vf3=[k11(4,1) 0 0;0 k11(4,1) 0;0 0 k33(4,1)];
per_eps_vf4=[k11(5,1) 0 0;0 k11(5,1) 0;0 0 k33(5,1)];
per_eps_vf5=[k11(6,1) 0 0;0 k11(6,1) 0;0 0 k33(6,1)];
per_eps_vf6=[k11(7,1) 0 0;0 k11(7,1) 0;0 0 k33(7,1)];
%Obtención de matriz S, per_sigma y d
S_vf1=C_vf1^{(-1)};
S_vf2=C_vf2^{(-1)};
S_vf3=C_vf3^(-1);
S_vf4=C_vf4^{(-1)};
S_vf5=C_vf5^{(-1)};
S_vf6=C_vf6^{(-1)};
d_vf1=e_vf1*S_vf1;
d_vf2=e_vf2*S_vf2;
d_vf3=e_vf3*S_vf3;
d_vf4=e_vf4*S_vf4;
d_vf5=e_vf5*S_vf5;
d_vf6=e_vf6*S_vf6;
per_sigma_vf1=per_eps_vf1+d_vf1*e_vf1';
per_sigma_vf2=per_eps_vf2+d_vf2*e_vf2';
per_sigma_vf3=per_eps_vf3+d_vf3*e_vf3';
per_sigma_vf4=per_eps_vf4+d_vf4*e_vf4';
per_sigma_vf5=per_eps_vf5+d_vf5*e_vf5';
per_sigma_vf6=per_eps_vf6+d_vf6*e_vf6';
C_D_vf1=C_vf1(3,3)+e_vf1(3,3)^2/per_eps_vf1(3,3);
C_D_vf2=C_vf2(3,3)+e_vf2(3,3)^2/per_eps_vf2(3,3);
C_D_vf3=C_vf3(3,3)+e_vf3(3,3)^2/per_eps_vf3(3,3);
```

```
C_D_vf4=C_vf4(3,3)+e_vf4(3,3)^2/per_eps_vf4(3,3);
C_D_vf5=C_vf5(3,3)+e_vf5(3,3)^2/per_eps_vf5(3,3);
C_D_vf6=C_vf6(3,3)+e_vf6(3,3)^2/per_eps_vf6(3,3);
%Ahora que ya he operado, vuelvo a unirlas con el %vf
K31=[0.111 d_vf1(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf1(3,3)*S_vf1(1,1)))
0.222 d_vf2(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf2(3,3)*S_vf2(1,1)))
 0.333 d_vf3(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf3(3,3)*S_vf3(1,1)))
 0.444 d_vf4(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf4(3,3)*S_vf4(1,1)))
 0.555 d_vf5(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf5(3,3)*S_vf5(1,1)))
 0.666 d_vf6(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf6(3,3)*S_vf6(1,1)))];
K33=[0.111 d_vf1(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf1(3,3)*S_vf1(3,3)))
 0.222 d_vf2(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf2(3,3)*S_vf2(3,3)))
 0.333 d_vf3(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf3(3,3)*S_vf3(3,3)))
 0.444 d_vf4(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf4(3,3)*S_vf4(3,3)))
 0.555 d_vf5(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf5(3,3)*S_vf5(3,3)))
 0.666 d_vf6(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf6(3,3)*S_vf6(3,3)))];
Kt=[0.111 sqrt(1- ( C_D_vf1/C_vf1(3,3) )^-1 )
 0.222 sqrt(1- ( C_D_vf2/C_vf2(3,3) )^-1 )
 0.333 sqrt(1- ( C_D_vf3/C_vf3(3,3) )^-1 )
 0.444 sqrt(1- ( C_D_vf4/C_vf4(3,3) )^-1 )
 0.555 sqrt(1- ( C_D_vf5/C_vf5(3,3) )^-1 )
 0.666 sqrt(1- ( C_D_vf6/C_vf6(3,3) )^-1 )];
Kp=[0.111 sqrt(1-per_eps_vf1(3,3)/per_sigma_vf1(3,3)*C_D_vf1/C_vf1(3,3))
 0.222 sqrt(1-per_eps_vf2(3,3)/per_sigma_vf2(3,3)*C_D_vf2/C_vf2(3,3))
 0.333 sqrt(1-per_eps_vf3(3,3)/per_sigma_vf3(3,3)*C_D_vf3/C_vf3(3,3))
 0.444 sqrt(1-per_eps_vf4(3,3)/per_sigma_vf4(3,3)*C_D_vf4/C_vf4(3,3))
 0.555 sqrt(1-per_eps_vf5(3,3)/per_sigma_vf5(3,3)*C_D_vf5/C_vf5(3,3))
 0.666 sqrt(1-per_eps_vf6(3,3)/per_sigma_vf6(3,3)*C_D_vf6/C_vf6(3,3))];
g31=[0.111 d_vf1(3,1)/per_sigma_vf1(3,3)
 0.222 d_vf2(3,1)/per_sigma_vf2(3,3)
 0.333 d_vf3(3,1)/per_sigma_vf3(3,3)
 0.444 d_vf4(3,1)/per_sigma_vf4(3,3)
 0.555 d_vf5(3,1)/per_sigma_vf5(3,3)
 0.666 d_vf6(3,1)/per_sigma_vf6(3,3)];
g33=[0.111 d_vf1(3,3)/per_sigma_vf1(3,3)
 0.222 d_vf2(3,3)/per_sigma_vf2(3,3)
 0.333 d_vf3(3,3)/per_sigma_vf3(3,3)
 0.444 d_vf4(3,3)/per_sigma_vf4(3,3)
 0.555 d_vf5(3,3)/per_sigma_vf5(3,3)
 0.666 d_vf6(3,3)/per_sigma_vf6(3,3)];
```

B.3 Figuras de mérito para inclusión esférica

```
function [K31,K33,Kt,Kp,g31,g33]=fig_merito_esf(C11,C12,C13,C33,C44,C66,e13,e33,k33,k1
%Entrada: C, e y per_eps
C_vf1=[C11(2,1) C12(2,1) C13(2,1) 0 0 0;C12(2,1) C11(2,1) C13(2,1) 0 0 0;C13(2,1) C13(2,1) C1
C_vf2=[C11(3,1) C12(3,1) C13(3,1) 0 0 0;C12(3,1) C11(3,1) C13(3,1) 0 0 0;C13(3,1) C13(3,1) C1
C_vf3=[C11(4,1) C12(4,1) C13(4,1) 0 0 0;C12(4,1) C11(4,1) C13(4,1) 0 0 0;C13(4,1) C13(4,1) C1
C_vf4=[C11(5,1) C12(5,1) C13(5,1) 0 0 0;C12(5,1) C11(5,1) C13(5,1) 0 0 0;C13(5,1) C13(5,1) C1
e_vf1=[0 0 0 0 e15(2,1) 0;0 0 0 e15(2,1) 0 0;e13(2,1) e13(2,1) e33(2,1) 0 0 0];
e_vf2=[0 0 0 0 e15(3,1) 0;0 0 0 e15(3,1) 0 0;e13(3,1) e13(3,1) e33(3,1) 0 0 0];
e_vf3=[0 0 0 0 e15(4,1) 0;0 0 0 e15(4,1) 0 0;e13(4,1) e13(4,1) e33(4,1) 0 0 0];
e_vf4=[0 0 0 0 e15(5,1) 0;0 0 0 e15(5,1) 0 0;e13(5,1) e13(5,1) e33(5,1) 0 0 0];
per_eps_vf1=[k11(2,1) 0 0;0 k11(2,1) 0;0 0 k33(2,1)];
per_eps_vf2=[k11(3,1) 0 0;0 k11(3,1) 0;0 0 k33(3,1)];
per_eps_vf3=[k11(4,1) 0 0;0 k11(4,1) 0;0 0 k33(4,1)];
per_eps_vf4=[k11(5,1) 0 0;0 k11(5,1) 0;0 0 k33(5,1)];
%Obtención de matriz S, per_sigma y d
S_vf1=C_vf1^{(-1)};
S_vf2=C_vf2^{(-1)};
S_vf3=C_vf3^{(-1)};
S_vf4=C_vf4^{(-1)};
d_vf1=e_vf1*S_vf1;
d_vf2=e_vf2*S_vf2;
d_vf3=e_vf3*S_vf3;
d_vf4=e_vf4*S_vf4;
per_sigma_vf1=per_eps_vf1+d_vf1*e_vf1';
per_sigma_vf2=per_eps_vf2+d_vf2*e_vf2';
per_sigma_vf3=per_eps_vf3+d_vf3*e_vf3';
per_sigma_vf4=per_eps_vf4+d_vf4*e_vf4';
C_D_vf1=C_vf1(3,3)+e_vf1(3,3)^2/per_eps_vf1(3,3);
C_D_vf2=C_vf2(3,3)+e_vf2(3,3)^2/per_eps_vf2(3,3);
C_D_vf3=C_vf3(3,3)+e_vf3(3,3)^2/per_eps_vf3(3,3);
C_D_vf4=C_vf4(3,3)+e_vf4(3,3)^2/per_eps_vf4(3,3);
%Ahora que ya he operado, vuelvo a unirlas con el %vf
K31=[0.111 d_vf1(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf1(3,3)*S_vf1(1,1)))
    0.222 d_vf2(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf2(3,3)*S_vf2(1,1)))
    0.333 d_vf3(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf3(3,3)*S_vf3(1,1)))
    0.444 d_vf4(3,1)/(sqrt(per_sigma_vf4(3,3)*S_vf4(1,1)))];
K33=[0.111 d_vf1(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf1(3,3)*S_vf1(3,3)))
     0.222 d_vf2(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf2(3,3)*S_vf2(3,3)))
     0.333 d_vf3(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf3(3,3)*S_vf3(3,3)))
```

```
0.444 d_vf4(3,3)/(sqrt(per_sigma_vf4(3,3)*S_vf4(3,3)))];
Kt=[0.111 sqrt(1- ( C_D_vf1/C_vf1(3,3) )^-1 )
0.222 sqrt(1- ( C_D_vf2/C_vf2(3,3) )^-1 )
0.333 sqrt(1- ( C_D_vf3/C_vf3(3,3) )^-1 )
0.444 sqrt(1- ( C_D_vf4/C_vf4(3,3) )^-1 )];
Kp=[0.111 sqrt(1-(per_eps_vf1(3,3)/per_sigma_vf1(3,3)*C_D_vf1/C_vf1(3,3)))
0.222 sqrt(1-per_eps_vf2(3,3)/per_sigma_vf2(3,3)*C_D_vf2/C_vf2(3,3))
0.333 sqrt(1-per_eps_vf3(3,3)/per_sigma_vf3(3,3)*C_D_vf3/C_vf3(3,3))
0.444 sqrt(1-per_eps_vf4(3,3)/per_sigma_vf4(3,3)*C_D_vf4/C_vf4(3,3))];
g31=[0.111 d_vf1(3,1)/per_sigma_vf1(3,3)
0.222 d_vf2(3,1)/per_sigma_vf2(3,3)
0.333 d_vf3(3,1)/per_sigma_vf3(3,3)
0.444 d_vf4(3,1)/per_sigma_vf4(3,3)];
g33=[0.111 d_vf1(3,3)/per_sigma_vf1(3,3)
0.222 d_vf2(3,3)/per_sigma_vf2(3,3)
0.333 d_vf3(3,3)/per_sigma_vf3(3,3)
0.444 d_vf4(3,3)/per_sigma_vf4(3,3)];
```

end

B.4 Comparativa para la influencia de la morfología de fibra

```
clear all
close all
clc
%Fibra circular 1-3
resul_CC1_cil=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99937E+00 0.13309E+09 0.33376E+08
 0.22200E+00 0.99970E+00 0.16311E+09 0.38996E+08
 0.33300E+00 0.10001E+01 0.20552E+09 0.44343E+08
 0.44400E+00 0.10009E+01 0.26932E+09 0.49060E+08
 0.55500E+00 0.10026E+01 0.37728E+09 0.52689E+08
 0.66600E+00 0.10079E+01 0.61684E+09 0.55012E+08];
resul_CC2_cil=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.41129E+08 0.39654E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.58383E+08 0.78234E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.81507E+08 0.11687E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.11468E+09 0.15561E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.16870E+09 0.19454E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.28581E+09 0.23409E+11];
resul_CC3_cil=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.98417E+00 0.34858E+09
 0.22200E+00 0.98463E+00 0.12382E+10
 0.33300E+00 0.98500E+00 0.25248E+10
 0.44400E+00 0.98554E+00 0.40150E+10
 0.55500E+00 0.98672E+00 0.55851E+10
 0.66600E+00 0.99031E+00 0.71748E+10];
resul_CC4_cil=[0 1 4.1667E+7
0.111 0.99873E+00 0.48615E+08
0.222 0.99879E+00 0.56605E+08
0.333 0.99893E+00 0.66529E+08
0.444 0.99939E+00 0.80290E+08
0.555 0.10008E+01 0.10259E+09
0.666 0.10059E+01 0.15076E+09];
resul_CC5_cil=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.22700E-02 0.29665E+01 0.11802E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.52036E-02 0.59323E+01 0.23399E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.91353E-02 0.88971E+01 0.34995E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.14775E-01 0.11860E+02 0.46587E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.23960E-01 0.14820E+02 0.58174E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.43871E-01 0.17769E+02 0.69743E-08];
resul_CC6_cil=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96969E+00 0.22341E-10 0.12703E-05
 0.22200E+00 0.96958E+00 0.25616E-10 0.69339E-05
```

```
0.33300E+00 0.96935E+00 0.29885E-10 0.18955E-04
 0.44400E+00 0.96933E+00 0.35963E-10 0.43548E-04
 0.55500E+00 0.97020E+00 0.45927E-10 0.10162E-03
 0.66600E+00 0.97452E+00 0.67625E-10 0.30944E-03];
vf=resul_CC1_cil(:,1);
C11_cil=resul_CC1_cil(:,3);
C12_cil=resul_CC1_cil(:,4);
C13_cil=resul_CC2_cil(:,3);
C33_cil=resul_CC2_cil(:,4);
C44_cil=resul_CC3_cil(:,3);
C66_cil=resul_CC4_cil(:,3);
e13_cil=resul_CC5_cil(:,3);
e33_cil=resul_CC5_cil(:,4);
k33_cil=resul_CC5_cil(:,5);
k11_cil=resul_CC6_cil(:,3);
e15_cil=resul_CC6_cil(:,4);
[K31_cil,K33_cil,Kt_cil,Kp_cil,g31_cil,g33_cil]=fig_merito(C11_cil,C12_cil,C13_cil,C33_cil,C
%Fibra cuadrada 1-3 1-3
resul_CC1_cuad=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99908E+00 0.13612E+09 0.31933E+08
 0.22200E+00 0.99931E+00 0.17070E+09 0.34983E+08
 0.33300E+00 0.99944E+00 0.21874E+09 0.36746E+08
 0.44400E+00 0.99952E+00 0.28694E+09 0.37467E+08
 0.55500E+00 0.99958E+00 0.38881E+09 0.37511E+08
 0.66600E+00 0.99963E+00 0.55655E+09 0.37150E+08];
resul_CC2_cuad=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.41879E+08 0.39661E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.60114E+08 0.78251E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.84245E+08 0.11690E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.11763E+09 0.15563E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.16698E+09 0.19453E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.24803E+09 0.23372E+11];
resul_CC3_cuad=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.97973E+00 0.36696E+09
 0.22200E+00 0.98062E+00 0.12899E+10
 0.33300E+00 0.98109E+00 0.25900E+10
 0.44400E+00 0.98136E+00 0.40642E+10
 0.55500E+00 0.98151E+00 0.55953E+10
 0.66600E+00 0.98158E+00 0.71288E+10];
resul_CC4_cuad=[0 1 4.1667E+7
 0.111 0.99876E+00 0.48732E+08
 0.222 0.99913E+00 0.56793E+08
 0.333 0.99938E+00 0.66675E+08
 0.444 0.99958E+00 0.79843E+08
 0.555 0.99972E+00 0.99044E+08
```

```
0.666 0.99983E+00 0.13048E+09];
```

```
resul_CC5_cuad=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.23976E-02 0.29663E+01 0.11802E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.54981E-02 0.59320E+01 0.23399E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.96012E-02 0.88967E+01 0.34994E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.15278E-01 0.11860E+02 0.46586E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.23669E-01 0.14820E+02 0.58175E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.37452E-01 0.17776E+02 0.69754E-08];
resul_CC6_cuad=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96126E+00 0.22400E-10 0.15324E-05
 0.22200E+00 0.96260E+00 0.25870E-10 0.67855E-05
 0.33300E+00 0.96337E+00 0.30230E-10 0.16968E-04
 0.44400E+00 0.96385E+00 0.36075E-10 0.35558E-04
 0.55500E+00 0.96412E+00 0.44559E-10 0.71553E-04
 0.66600E+00 0.96424E+00 0.58341E-10 0.15183E-03];
C11_cuad=resul_CC1_cuad(:,3);
C12_cuad=resul_CC1_cuad(:,4);
C13_cuad=resul_CC2_cuad(:,3);
C33_cuad=resul_CC2_cuad(:,4);
C44_cuad=resul_CC3_cuad(:,3);
C66_cuad=resul_CC4_cuad(:,3);
e13_cuad=resul_CC5_cuad(:,3);
e33_cuad=resul_CC5_cuad(:,4);
k33_cuad=resul_CC5_cuad(:,5);
k11_cuad=resul_CC6_cuad(:,3);
e15_cuad=resul_CC6_cuad(:,4);
[K31_cuad,K33_cuad,Kt_cuad,Kp_cuad,g31_cuad,g33_cuad]=fig_merito(C11_cuad,C12_cuad,C13_
%Inclusión esférica 0-3
resul_CC1_esf=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.14080E+09 0.33706E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.18408E+09 0.39056E+08
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.25211E+09 0.43473E+08
 0.44400E+00 0.99998E+00 0.38347E+09 0.46593E+08];
resul_CC2_esf=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.33717E+08 0.14079E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.39105E+08 0.18405E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.43610E+08 0.25201E+09
 0.44400E+00 0.10002E+01 0.47084E+08 0.38911E+09];
resul_CC3_esf=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.98903E+00 0.51431E+08
 0.22200E+00 0.98904E+00 0.62800E+08
 0.33300E+00 0.98900E+00 0.78433E+08
 0.44400E+00 0.98899E+00 0.10756E+09];
```

```
resul_CC4_esf=[0 1 4.1667E+7
 0.111 0.99994E+00 0.51246E+08
 0.222 0.10000E+01 0.62586E+08
 0.333 0.99995E+00 0.78289E+08
 0.444 0.99983E+00 0.10686E+09];
resul_CC5_esf=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.16422E-04 0.31888E-04 0.26053E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.58879E-04 0.93992E-04 0.34154E-10
 0.33300E+00 0.99999E+00 -0.14835E-03 0.25419E-03 0.47001E-10
 0.44400E+00 0.10001E+01 -0.42262E-03 0.84148E-03 0.73353E-10];
resul_CC6_esf=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97810E+00 0.25600E-10 0.13787E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.33690E-10 0.35593E-04
 0.33300E+00 0.97814E+00 0.46506E-10 0.70844E-04
 0.44400E+00 0.97815E+00 0.72770E-10 0.14905E-03];
vf_esf=resul_CC1_esf(:,1);
C11_esf=resul_CC1_esf(:,3);
C12_esf=resul_CC1_esf(:,4);
C13_esf=resul_CC2_esf(:,3);
C33_esf=resul_CC2_esf(:,4);
C44_esf=resul_CC3_esf(:,3);
C66_esf=resul_CC4_esf(:,3);
e13_esf=resul_CC5_esf(:,3);
e33_esf=resul_CC5_esf(:,4);
k33_esf=resul_CC5_esf(:,5);
k11_esf=resul_CC6_esf(:,3);
e15_esf=resul_CC6_esf(:,4);
[K31_esf,K33_esf,Kt_esf,Kp_esf,g31_esf,g33_esf]=fig_merito_esf(C11_esf,C12_esf,C13_esf,C33_e
%Inclusión hexaédrica 0-3
resul_CC1_cua=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99978E+00 0.14903E+09 0.31928E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.20229E+09 0.34782E+08
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.27624E+09 0.36150E+08
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.38060E+09 0.36527E+08
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.53639E+09 0.35967E+08
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.78701E+09 0.36504E+08];
resul_CC2_cua=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.99982E+00 0.32197E+08 0.14876E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.34910E+08 0.20220E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.36415E+08 0.27606E+09
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.37051E+08 0.38008E+09
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.36945E+08 0.53566E+09
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.38450E+08 0.78525E+09];
resul_CC3_cua=[0 1 4.1667E+7
```

```
0.11100E+00 0.98905E+00 0.52986E+08
 0.22200E+00 0.98906E+00 0.65055E+08
 0.33300E+00 0.98906E+00 0.79791E+08
 0.44400E+00 0.98906E+00 0.99704E+08
 0.55500E+00 0.98906E+00 0.12899E+09
 0.66600E+00 0.98906E+00 0.17618E+09];
resul_CC4_cua=[0 1 4.1667E+7
 0.111 0.99996E+00 0.52554E+08
 0.222 0.10000E+01 0.64709E+08
 0.333 0.10000E+01 0.79659E+08
 0.444 0.10000E+01 0.99669E+08
 0.555 0.10000E+01 0.12897E+09
 0.666 0.10000E+01 0.17623E+09];
resul_CC5_cua=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.99995E+00 -0.65165E-04 0.23677E-04 0.26952E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.85985E-04 0.14794E-03 0.35656E-10
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.18968E-03 0.32455E-03 0.47634E-10
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.38560E-03 0.65776E-03 0.64937E-10
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.78866E-03 0.13447E-02 0.91654E-10
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.16958E-02 0.28764E-02 0.13583E-09];
resul_CC6_cua=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97805E+00 0.26497E-10 0.25442E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.35182E-10 0.56907E-04
 0.33300E+00 0.97812E+00 0.47134E-10 0.11106E-03
 0.44400E+00 0.97812E+00 0.64360E-10 0.20376E-03
 0.55500E+00 0.97812E+00 0.90921E-10 0.38302E-03
 0.66600E+00 0.97812E+00 0.13479E-09 0.76668E-03];
C11_cua=resul_CC1_cua(:,3);
C12_cua=resul_CC1_cua(:,4);
C13_cua=resul_CC2_cua(:,3);
C33_cua=resul_CC2_cua(:,4);
C44_cua=resul_CC3_cua(:,3);
C66_cua=resul_CC4_cua(:,3);
e13_cua=resul_CC5_cua(:,3);
e33_cua=resul_CC5_cua(:,4);
k33_cua=resul_CC5_cua(:,5);
k11_cua=resul_CC6_cua(:,3);
e15_cua=resul_CC6_cua(:,4);
[K31_cua,K33_cua,Kt_cua,Kp_cua,g31_cua,g33_cua]=fig_merito(C11_cua,C12_cua,C13_cua,C33
%Figuras comparativas
figure(1)
subplot(1,3,1)
plot(vf,C11_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C11_cuad,'-sq');hold on;
```

```
plot(vf_esf,C11_esf,'-d');hold on;
```

```
plot(vf,C11_cua,'-*');
axis square;
legend('Fibra circular 1-3 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hex
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.8e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,2)
plot(vf,C13_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C13_cuad,'-sq');hold on;
plot(vf_esf,C13_esf,'-d');hold on;
plot(vf,C13_cua,'-*');
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.7]); ylim([-0.1e7 0.3e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13}^{eff} [ N/m<sup>2</sup>]');
hold off;
subplot(1,3,3)
plot(vf,C33_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C33_cuad,'-sq');hold on;
plot(vf_esf,C33_esf,'-d');hold on;
plot(vf,C33_cua,'-*');
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.7]); ylim([-10 0.3e11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(2)
subplot(1,2,1)
plot(vf,e13_cil,'-o');hold on;
plot(vf,e13_cuad,'-sq');hold on;
plot(vf_esf,e13_esf,'-d');hold on;
plot(vf,e13_cua,'-*');
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.7]); ylim([-0.05 0.005]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf,e33_cil,'-o');hold on;
semilogy(vf,e33_cuad,'-sq');hold on;
semilogy(vf_esf,e33_esf,'-d');hold on;
semilogy(vf,e33_cua,'-*');
```

```
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión h
xlim([0 0.7]); ylim([-3 22]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(3)
subplot(1,2,1)
plot(vf,k11_cil,'-o');hold on;
plot(vf,k11_cuad,'-sq');hold on;
plot(vf_esf,k11_esf,'-d');hold on;
plot(vf,k11_cua,'-*');
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión h
xlim([0 0.8]); ylim([0 1.5e-10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{11}^{eff} [ N/m<sup>2</sup>]');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf,k33_cil,'-o');hold on;
plot(vf,k33_cuad,'-sq');hold on;
plot(vf_esf,k33_esf,'-d');hold on;
plot(vf,k33_cua,'-*');hold on;
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión h
xlim([0 0.8]); ylim([-0.03E-8 0.75e-8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
%%
figure(4)
subplot(1,2,1)
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cil(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cuad(:,2),'-sq');hold on;
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kp_esf(:,2),'-d');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cua(:,2),'-*');hold on;
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión h
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.105]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{p}');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cil(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cuad(:,2),'-sq');hold on;
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kt_esf(:,2),'-d');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cua(:,2),'-*');hold on;
```

```
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.8]); ylim([-0.1 1]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{t}');
hold off;
figure(5)
subplot(1,2,1)
plot(vf(end-5:end),g31_cil(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g31_cuad(:,2),'-sq');hold on;
plot(vf_esf(end-3:end),g31_esf(:,2),'-d');hold on;
plot(vf(end-5:end),g31_cua(:,2),'-*');hold on;
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.8]); ylim([-0.065 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{31}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf(end-5:end),g33_cil(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g33_cuad(:,2),'-sq');hold on;
plot(vf_esf(end-3:end),g33_esf(:,2),'-d');hold on;
plot(vf(end-5:end),g33_cua(:,2),'-*');hold on;
axis square
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3', 'Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión hexaédr
xlim([0 0.8]); ylim([0 0.23]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{33}');
hold off;
```

B.5 Comparativa para la influencia de la auxeticidad de la matriz

```
clear all
close all
clc
%Fibra circular 1-3
resul_CC1_cil=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99937E+00 0.13309E+09 0.33376E+08
 0.22200E+00 0.99970E+00 0.16311E+09 0.38996E+08
 0.33300E+00 0.10001E+01 0.20552E+09 0.44343E+08
 0.44400E+00 0.10009E+01 0.26932E+09 0.49060E+08
 0.55500E+00 0.10026E+01 0.37728E+09 0.52689E+08
 0.66600E+00 0.10079E+01 0.61684E+09 0.55012E+08];
resul_CC2_cil=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.41129E+08 0.39654E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.58383E+08 0.78234E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.81507E+08 0.11687E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.11468E+09 0.15561E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.16870E+09 0.19454E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.28581E+09 0.23409E+11];
resul_CC3_cil=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.98417E+00 0.34858E+09
 0.22200E+00 0.98463E+00 0.12382E+10
 0.33300E+00 0.98500E+00 0.25248E+10
 0.44400E+00 0.98554E+00 0.40150E+10
 0.55500E+00 0.98672E+00 0.55851E+10
 0.66600E+00 0.99031E+00 0.71748E+10];
resul_CC4_cil=[0 1 4.1667E+7
0.111 0.99873E+00 0.48615E+08
0.222 0.99879E+00 0.56605E+08
0.333 0.99893E+00 0.66529E+08
0.444 0.99939E+00 0.70290E+08
0.555 0.10008E+01 0.10259E+09
0.666 0.10059E+01 0.15076E+09];
resul_CC5_cil=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.22700E-02 0.29665E+01 0.11802E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.52036E-02 0.59323E+01 0.23399E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.91353E-02 0.88971E+01 0.34995E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.14775E-01 0.11860E+02 0.46587E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.23960E-01 0.14820E+02 0.58174E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.43871E-01 0.17769E+02 0.69743E-08];
resul_CC6_cil=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96969E+00 0.22341E-10 0.12703E-05
 0.22200E+00 0.96958E+00 0.25616E-10 0.69339E-05
```

```
0.33300E+00 0.96935E+00 0.29885E-10 0.18955E-04
 0.44400E+00 0.96933E+00 0.35963E-10 0.43548E-04
 0.55500E+00 0.97020E+00 0.45927E-10 0.10162E-03
 0.66600E+00 0.97452E+00 0.67625E-10 0.30944E-03];
resul_CC1_cil_aux=[0 1 1.1836E+8 -2.8694E+7
 0.11100E+00 0.99925E+00 0.14481E+09 -0.25721E+08
 0.22200E+00 0.99951E+00 0.18008E+09 -0.23028E+08
 0.33300E+00 0.99984E+00 0.22874E+09 -0.20707E+08
 0.44400E+00 0.10005E+01 0.30044E+09 -0.18875E+08
 0.55500E+00 0.10022E+01 0.42002E+09 -0.17611E+08
 0.66600E+00 0.10075E+01 0.68233E+09 -0.16837E+08];
resul_CC2_cil_aux=[0 1 -2.8694E+7 1.1836E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.14442E+08 0.39632E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.39455E+07 0.78119E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.28639E+08 0.11667E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.64258E+08 0.15532E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.12279E+09 0.19420E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.25022E+09 0.23374E+11];
resul_CC3_cil_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.11100E+00 0.98430E+00 0.38885E+09
 0.22200E+00 0.98471E+00 0.12848E+10
 0.33300E+00 0.98505E+00 0.25756E+10
 0.44400E+00 0.98557E+00 0.40698E+10
 0.55500E+00 0.98673E+00 0.56460E+10
 0.66600E+00 0.99029E+00 0.72503E+10];
resul_CC4_cil_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.111 0.99892E+00 0.74295E+08
 0.222 0.99904E+00 0.97387E+08
 0.333 0.99923E+00 0.11422E+09
 0.444 0.99976E+00 0.13797E+09
 0.555 0.10013E+01 0.17667E+09
 0.666 0.10064E+01 0.26032E+09];
resul_CC5_cil_aux=[0 1 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.24211E-02 0.29669E+01 0.11801E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.55448E-02 0.59331E+01 0.23397E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.97396E-02 0.88983E+01 0.34991E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.15791E-01 0.11862E+02 0.46583E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.25734E-01 0.14821E+02 0.58168E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.47382E-01 0.17770E+02 0.69733E-08];
resul_CC6_cil_aux=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96969E+00 0.22346E-10 -0.16990E-05
 0.22200E+00 0.96958E+00 0.25626E-10 -0.14216E-05
 0.33300E+00 0.96935E+00 0.29901E-10 0.34726E-05
 0.44400E+00 0.96933E+00 0.35983E-10 0.18419E-04
```

```
0.55500E+00 0.97020E+00 0.45954E-10 0.62674E-04
 0.66600E+00 0.97452E+00 0.67662E-10 0.24860E-03];
vf=resul_CC1_cil(:,1);
C11_cil=resul_CC1_cil(:,3);
C12_cil=resul_CC1_cil(:,4);
C13_cil=resul_CC2_cil(:,3);
C33_cil=resul_CC2_cil(:,4);
C44_cil=resul_CC3_cil(:,3);
C66_cil=resul_CC4_cil(:,3);
e13_cil=resul_CC5_cil(:,3);
e33_cil=resul_CC5_cil(:,4);
k33_cil=resul_CC5_cil(:,5);
k11_cil=resul_CC6_cil(:,3);
e15_cil=resul_CC6_cil(:,4);
[K31_cil,K33_cil,Kt_cil,Kp_cil,g31_cil,g33_cil]=fig_merito(C11_cil,C12_cil,C13_cil,C33_
C11_cil_aux=resul_CC1_cil_aux(:,3);
C12_cil_aux=resul_CC1_cil_aux(:,4);
C13_cil_aux=resul_CC2_cil_aux(:,3);
C33_cil_aux=resul_CC2_cil_aux(:,4);
C44_cil_aux=resul_CC3_cil_aux(:,3);
C66_cil_aux=resul_CC4_cil_aux(:,3);
e13_cil_aux=resul_CC5_cil_aux(:,3);
e33_cil_aux=resul_CC5_cil_aux(:,4);
k33_cil_aux=resul_CC5_cil_aux(:,5);
k11_cil_aux=resul_CC6_cil_aux(:,3);
e15_cil_aux=resul_CC6_cil_aux(:,4);
[K31_cil_aux,K33_cil_aux,Kt_cil_aux,Kp_cil_aux,g31_cil_aux,g33_cil_aux]=fig_merito(C11_
%Fibra cuadrada 1-3 1-3
resul_CC1_cuad=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99908E+00 0.13612E+09 0.31933E+08
 0.22200E+00 0.99931E+00 0.17070E+09 0.34983E+08
 0.33300E+00 0.99944E+00 0.21874E+09 0.36746E+08
 0.44400E+00 0.99952E+00 0.28694E+09 0.37467E+08
 0.55500E+00 0.99958E+00 0.38881E+09 0.37511E+08
 0.66600E+00 0.99963E+00 0.55655E+09 0.37150E+08];
resul_CC2_cuad=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.41879E+08 0.39661E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.60114E+08 0.78251E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.84245E+08 0.11690E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.11763E+09 0.15563E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.16698E+09 0.19453E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.24803E+09 0.23372E+11];
resul_CC3_cuad=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.97973E+00 0.36696E+09
 0.22200E+00 0.98062E+00 0.12899E+10
 0.33300E+00 0.98109E+00 0.25900E+10
```

```
0.44400E+00 0.98136E+00 0.40642E+10
 0.55500E+00 0.98151E+00 0.55953E+10
 0.66600E+00 0.98158E+00 0.71288E+10];
resul_CC4_cuad=[0 1 4.1667E+7
0.111 0.99876E+00 0.48732E+08
0.222 0.99913E+00 0.56793E+08
 0.333 0.99938E+00 0.66675E+08
 0.444 0.99958E+00 0.79843E+08
 0.555 0.99972E+00 0.99044E+08
 0.666 0.99983E+00 0.13048E+09];
resul_CC5_cuad=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.23976E-02 0.29663E+01 0.11802E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.54981E-02 0.59320E+01 0.23399E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.96012E-02 0.88967E+01 0.34994E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.15278E-01 0.11860E+02 0.46586E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.23669E-01 0.14820E+02 0.58175E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.37452E-01 0.17776E+02 0.69754E-08];
resul_CC6_cuad=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96126E+00 0.22400E-10 0.15324E-05
 0.22200E+00 0.96260E+00 0.25870E-10 0.67855E-05
 0.33300E+00 0.96337E+00 0.30230E-10 0.16968E-04
 0.44400E+00 0.96385E+00 0.36075E-10 0.35558E-04
 0.55500E+00 0.96412E+00 0.44559E-10 0.71553E-04
 0.66600E+00 0.96424E+00 0.58341E-10 0.15183E-03];
resul_CC1_cuad_aux=[0 1 1.1836E+8 -2.8694E+7
 0.11100E+00 0.99887E+00 0.14824E+09 -0.26711E+08
 0.22200E+00 0.99918E+00 0.18802E+09 -0.25555E+08
 0.33300E+00 0.99936E+00 0.24141E+09 -0.25087E+08
 0.44400E+00 0.99949E+00 0.31534E+09 -0.25040E+08
 0.55500E+00 0.99958E+00 0.42432E+09 -0.25195E+08
 0.66600E+00 0.99964E+00 0.60298E+09 -0.25469E+08];
resul_CC2_cuad_aux=[0 1 -2.8694E+7 1.1836E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.13258E+08 0.39643E+10
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.65685E+07 0.78145E+10
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.32655E+08 0.11671E+11
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.68490E+08 0.15536E+11
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.12120E+09 0.19418E+11
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.20761E+09 0.23333E+11];
resul_CC3_cuad_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.11100E+00 0.98046E+00 0.40790E+09
 0.22200E+00 0.98104E+00 0.13372E+10
 0.33300E+00 0.98133E+00 0.26414E+10
 0.44400E+00 0.98150E+00 0.41190E+10
 0.55500E+00 0.98158E+00 0.56545E+10
```

```
0.66600E+00 0.98162E+00 0.71959E+10];
resul_CC4_cuad_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.111 0.99901E+00 0.74913E+08
 0.222 0.99929E+00 0.98607E+08
 0.333 0.99949E+00 0.11583E+09
 0.444 0.99962E+00 0.13894E+09
 0.555 0.99972E+00 0.17265E+09
 0.666 0.99980E+00 0.22777E+09];
resul_CC5_cuad_aux=[0 1 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.26222E-02 0.29667E+01 0.11801E-08
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.59905E-02 0.59327E+01 0.23396E-08
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.10422E-01 0.88977E+01 0.34990E-08
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.16510E-01 0.11861E+02 0.46582E-08
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.25466E-01 0.14822E+02 0.58168E-08
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.40146E-01 0.17777E+02 0.69745E-08];
resul_CC6_cuad_aux=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.96218E+00 0.22421E-10 -0.22768E-05
 0.22200E+00 0.96317E+00 0.25889E-10 -0.37608E-05
 0.33300E+00 0.96373E+00 0.30251E-10 -0.21911E-05
 0.44400E+00 0.96406E+00 0.36097E-10 0.51924E-05
 0.55500E+00 0.96424E+00 0.44587E-10 0.26003E-04
 0.66600E+00 0.96429E+00 0.58380E-10 0.74159E-04];
C11_cuad=resul_CC1_cuad(:,3);
C12_cuad=resul_CC1_cuad(:,4);
C13_cuad=resul_CC2_cuad(:,3);
C33_cuad=resul_CC2_cuad(:,4);
C44_cuad=resul_CC3_cuad(:,3);
C66_cuad=resul_CC4_cuad(:,3);
e13_cuad=resul_CC5_cuad(:,3);
e33_cuad=resul_CC5_cuad(:,4);
k33_cuad=resul_CC5_cuad(:,5);
k11_cuad=resul_CC6_cuad(:,3);
e15_cuad=resul_CC6_cuad(:,4);
[K31_cuad,K33_cuad,Kt_cuad,Kp_cuad,g31_cuad,g33_cuad]=fig_merito(C11_cuad,C12_cuad,C13_
C11_cuad_aux=resul_CC1_cuad_aux(:,3);
C12_cuad_aux=resul_CC1_cuad_aux(:,4);
C13_cuad_aux=resul_CC2_cuad_aux(:,3);
C33_cuad_aux=resul_CC2_cuad_aux(:,4);
C44_cuad_aux=resul_CC3_cuad_aux(:,3);
C66_cuad_aux=resul_CC4_cuad_aux(:,3);
e13_cuad_aux=resul_CC5_cuad_aux(:,3);
e33_cuad_aux=resul_CC5_cuad_aux(:,4);
k33_cuad_aux=resul_CC5_cuad_aux(:,5);
k11_cuad_aux=resul_CC6_cuad_aux(:,3);
e15_cuad_aux=resul_CC6_cuad_aux(:,4);
[K31_cuad_aux,K33_cuad_aux,Kt_cuad_aux,Kp_cuad_aux,g31_cuad_aux,g33_cuad_aux]=fig_meri
```

```
%Inclusión esférica 1-3
resul_CC1_esf=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.14080E+09 0.33706E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.18408E+09 0.39056E+08
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.25211E+09 0.43473E+08
 0.44400E+00 0.99998E+00 0.38347E+09 0.46593E+08];
resul_CC2_esf=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.33717E+08 0.14079E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.39105E+08 0.18405E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.43610E+08 0.25201E+09
 0.44400E+00 0.10002E+01 0.47084E+08 0.38911E+09];
resul_CC3_esf=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.98903E+00 0.51431E+08
 0.22200E+00 0.98904E+00 0.62800E+08
 0.33300E+00 0.98900E+00 0.78433E+08
 0.44400E+00 0.98899E+00 0.10756E+09];
resul_CC4_esf=[0 1 4.1667E+7
 0.111 0.99994E+00 0.51246E+08
 0.222 0.10000E+01 0.62586E+08
 0.333 0.99995E+00 0.78289E+08
 0.444 0.99983E+00 0.10686E+09];
resul_CC5_esf=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.16422E-04 0.31888E-04 0.26053E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.58879E-04 0.93992E-04 0.34154E-10
 0.33300E+00 0.99999E+00 -0.14835E-03 0.25419E-03 0.47001E-10
 0.44400E+00 0.10001E+01 -0.42262E-03 0.84148E-03 0.73353E-10];
resul_CC6_esf=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97810E+00 0.25600E-10 0.13787E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.33690E-10 0.35593E-04
 0.33300E+00 0.97814E+00 0.46506E-10 0.70844E-04
 0.44400E+00 0.97815E+00 0.72770E-10 0.14905E-03];
resul_CC1_esf_aux=[0 1 1.1836E+8 -2.8694E+7
 0.11100E+00 0.10000E+01 0.15627E+09 -0.25524E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.20894E+09 -0.23007E+08
 0.33300E+00 0.99999E+00 0.28848E+09 -0.21168E+08
 0.44400E+00 0.99988E+00 0.43708E+09 -0.19978E+08];
resul_CC2_esf_aux=[0 1 -2.8694E+7 1.1836E+8
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.25497E+08 0.15624E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.22916E+08 0.20886E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.20937E+08 0.28830E+09
 0.44400E+00 0.10001E+01 -0.19275E+08 0.44340E+09];
```

```
resul_CC3_esf_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.11100E+00 0.98904E+00 0.78805E+08
 0.22200E+00 0.98905E+00 0.10804E+09
 0.33300E+00 0.98902E+00 0.13503E+09
 0.44400E+00 0.98905E+00 0.18548E+09];
resul_CC4_esf_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.111 0.99996E+00 0.78989E+08
 0.222 0.10000E+01 0.10810E+09
 0.333 0.99997E+00 0.13507E+09
 0.444 0.99987E+00 0.18450E+09];
resul_CC5_esf_aux=[0 1 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.10000E+01 -0.24022E-04 0.46555E-04 0.26053E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.78146E-04 0.13182E-03 0.34154E-10
 0.33300E+00 0.99999E+00 -0.18743E-03 0.33363E-03 0.47001E-10
 0.44400E+00 0.10001E+01 -0.50761E-03 0.10281E-02 0.73353E-10];
resul_CC6_esf_aux=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97810E+00 0.25600E-10 0.11575E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.33690E-10 0.27733E-04
 0.33300E+00 0.97814E+00 0.46506E-10 0.53165E-04
 0.44400E+00 0.97815E+00 0.72770E-10 0.11317E-03];
vf_esf=resul_CC1_esf(:,1);
C11_esf=resul_CC1_esf(:,3);
C12_esf=resul_CC1_esf(:,4);
C13_esf=resul_CC2_esf(:,3);
C33_esf=resul_CC2_esf(:,4);
C44_esf=resul_CC3_esf(:,3);
C66_esf=resul_CC4_esf(:,3);
e13_esf=resul_CC5_esf(:,3);
e33_esf=resul_CC5_esf(:,4);
k33_esf=resul_CC5_esf(:,5);
k11_esf=resul_CC6_esf(:,3);
e15_esf=resul_CC6_esf(:,4);
[K31_esf,K33_esf,Kt_esf,Kp_esf,g31_esf,g33_esf]=fig_merito_esf(C11_esf,C12_esf,C13_esf
C11_esf_aux=resul_CC1_esf_aux(:,3);
C12_esf_aux=resul_CC1_esf_aux(:,4);
C13_esf_aux=resul_CC2_esf_aux(:,3);
C33_esf_aux=resul_CC2_esf_aux(:,4);
C44_esf_aux=resul_CC3_esf_aux(:,3);
C66_esf_aux=resul_CC4_esf_aux(:,3);
e13_esf_aux=resul_CC5_esf_aux(:,3);
e33_esf_aux=resul_CC5_esf_aux(:,4);
k33_esf_aux=resul_CC5_esf_aux(:,5);
k11_esf_aux=resul_CC6_esf_aux(:,3);
e15_esf_aux=resul_CC6_esf_aux(:,4);
[K31_esf_aux,K33_esf_aux,Kt_esf_aux,Kp_esf_aux,g31_esf_aux,g33_esf_aux]=fig_merito_esf
```

```
%Inclusión hexaédrica 0-3
resul_CC1_cua=[0 1 1.1111E+8 2.7778E+7
 0.11100E+00 0.99978E+00 0.14903E+09 0.31928E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.20229E+09 0.34782E+08
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.27624E+09 0.36150E+08
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.38060E+09 0.36527E+08
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.53639E+09 0.35967E+08
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.78701E+09 0.36504E+08];
resul_CC2_cua=[0 1 2.7778E+7 1.1111E+8
 0.11100E+00 0.99982E+00 0.32197E+08 0.14876E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.34910E+08 0.20220E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.36415E+08 0.27606E+09
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.37051E+08 0.38008E+09
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.36945E+08 0.53566E+09
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.38450E+08 0.78525E+09];
resul_CC3_cua=[0 1 4.1667E+7
 0.11100E+00 0.98905E+00 0.52986E+08
 0.22200E+00 0.98906E+00 0.65055E+08
 0.33300E+00 0.98906E+00 0.79791E+08
 0.44400E+00 0.98906E+00 0.99704E+08
 0.55500E+00 0.98906E+00 0.12899E+09
 0.66600E+00 0.98906E+00 0.17618E+09]:
resul_CC4_cua=[0 1 4.1667E+7
 0.111 0.99996E+00 0.52554E+08
 0.222 0.10000E+01 0.64709E+08
 0.333 0.10000E+01 0.79659E+08
 0.444 0.10000E+01 0.99669E+08
 0.555 0.10000E+01 0.12897E+09
 0.666 0.10000E+01 0.17623E+09];
resul_CC5_cua=[0 0.10000E+01 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.99995E+00 -0.65165E-04 0.23677E-04 0.26952E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.85985E-04 0.14794E-03 0.35656E-10
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.18968E-03 0.32455E-03 0.47634E-10
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.38560E-03 0.65776E-03 0.64937E-10
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.78866E-03 0.13447E-02 0.91654E-10
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.16958E-02 0.28764E-02 0.13583E-09];
resul_CC6_cua=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97805E+00 0.26497E-10 0.25442E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.35182E-10 0.56907E-04
 0.33300E+00 0.97812E+00 0.47134E-10 0.11106E-03
 0.44400E+00 0.97812E+00 0.64360E-10 0.20376E-03
 0.55500E+00 0.97812E+00 0.90921E-10 0.38302E-03
 0.66600E+00 0.97812E+00 0.13479E-09 0.76668E-03];
resul_CC1_cua_aux=[0 1 1.1836E+8 -2.8694E+7
```

```
0.11100E+00 0.99984E+00 0.16605E+09 -0.26853E+08
 0.22200E+00 0.10000E+01 0.22813E+09 -0.25558E+08
 0.33300E+00 0.10000E+01 0.31021E+09 -0.25147E+08
 0.44400E+00 0.10000E+01 0.42281E+09 -0.25102E+08
 0.55500E+00 0.10000E+01 0.58884E+09 -0.25438E+08
 0.66600E+00 0.10000E+01 0.85611E+09 -0.25205E+08];
resul_CC2_cua_aux=[0 1 -2.8694E+7 1.1836E+8
 0.11100E+00 0.99988E+00 -0.26484E+08 0.16568E+09
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.25348E+08 0.22798E+09
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.24749E+08 0.30992E+09
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.24383E+08 0.42204E+09
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.24139E+08 0.58790E+09
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.22719E+08 0.85398E+09];
resul_CC3_cua_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.11100E+00 0.98902E+00 0.91661E+08
 0.22200E+00 0.98906E+00 0.11279E+09
 0.33300E+00 0.98906E+00 0.13887E+09
 0.44400E+00 0.98906E+00 0.17387E+09
 0.55500E+00 0.98906E+00 0.22524E+09
 0.66600E+00 0.98906E+00 0.30768E+09];
resul_CC4_cua_aux=[0 1 7.3529E+7
 0.111 0.99993E+00 0.91622E+08
 0.222 0.10000E+01 0.11265E+09
 0.333 0.10000E+01 0.13880E+09
 0.444 0.10000E+01 0.17387E+09
 0.555 0.10000E+01 0.22520E+09
 0.666 0.10000E+01 0.30774E+09];
resul_CC5_cua_aux=[0 1 0 0 2.0365E-11
 0.11100E+00 0.99995E+00 -0.74512E-04 0.43426E-04 0.26952E-10
 0.22200E+00 0.10000E+01 -0.10677E-03 0.19024E-03 0.35656E-10
 0.33300E+00 0.10000E+01 -0.22498E-03 0.39395E-03 0.47634E-10
 0.44400E+00 0.10000E+01 -0.44151E-03 0.76436E-03 0.64937E-10
 0.55500E+00 0.10000E+01 -0.87944E-03 0.15141E-02 0.91654E-10
 0.66600E+00 0.10000E+01 -0.18613E-02 0.31757E-02 0.13583E-09];
resul_CC6_cua_aux=[0 1 2.0365E-11 0
 0.11100E+00 0.97805E+00 0.26497E-10 0.23593E-04
 0.22200E+00 0.97812E+00 0.35182E-10 0.49859E-04
 0.33300E+00 0.97812E+00 0.47134E-10 0.96126E-04
 0.44400E+00 0.97812E+00 0.64360E-10 0.17827E-03
 0.55500E+00 0.97812E+00 0.90921E-10 0.34533E-03
 0.66600E+00 0.97812E+00 0.13479E-09 0.71480E-03];
C11_cua=resul_CC1_cua(:,3);
C12_cua=resul_CC1_cua(:,4);
C13_cua=resul_CC2_cua(:,3);
```

```
C33_cua=resul_CC2_cua(:,4);
C44_cua=resul_CC3_cua(:,3);
C66_cua=resul_CC4_cua(:,3);
e13_cua=resul_CC5_cua(:,3);
e33_cua=resul_CC5_cua(:,4);
k33_cua=resul_CC5_cua(:,5);
k11_cua=resul_CC6_cua(:,3);
e15_cua=resul_CC6_cua(:,4);
[K31_cua,K33_cua,Kt_cua,Kp_cua,g31_cua,g33_cua]=fig_merito(C11_cua,C12_cua,C13_cua,C33_cua,C
C11_cua_aux=resul_CC1_cua_aux(:,3);
C12_cua_aux=resul_CC1_cua_aux(:,4);
C13_cua_aux=resul_CC2_cua_aux(:,3);
C33_cua_aux=resul_CC2_cua_aux(:,4);
C44_cua_aux=resul_CC3_cua_aux(:,3);
C66_cua_aux=resul_CC4_cua_aux(:,3);
e13_cua_aux=resul_CC5_cua_aux(:,3);
e33_cua_aux=resul_CC5_cua_aux(:,4);
k33_cua_aux=resul_CC5_cua_aux(:,5);
k11_cua_aux=resul_CC6_cua_aux(:,3);
e15_cua_aux=resul_CC6_cua_aux(:,4);
[K31_cua_aux,K33_cua_aux,Kt_cua_aux,Kp_cua_aux,g31_cua_aux,g33_cua_aux]=fig_merito(C11_cua_aux)
%Figuras comparativas
figure(1)
subplot(1,3,1)
plot(vf,C11_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C11_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.08E9 0.7E9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,2)
plot(vf,C13_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C13_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.45E8 0.3e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,3)
plot(vf,C33_cil,'-o');hold on;
plot(vf,C33_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 2.5e10]);
```

```
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(2)
subplot(1,2,1)
plot(vf,e13_cil,'-o');hold on;
plot(vf,e13_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.05 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf,e33_cil,'-o');hold on;
semilogy(vf,e33_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0 20]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33}^{eff} [ N/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(3)
subplot(1,2,1)
plot(vf,k11_cil,'-o');hold on;
plot(vf,k11_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.18E-10 0.71E-10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{11}^{eff} [ N/m<sup>2</sup>]');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf,k33_cil,'-o');hold on;
plot(vf,k33_cil_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.8E-8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(4)
subplot(1,2,1)
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cil(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cil_aux(:,2),'-sq');hold on;
```
```
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([1E-2 0.11]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{p}');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cil(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cil_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.813]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{t}');
hold off;
figure(5)
subplot(1,2,1)
plot(vf(end-5:end),g31_cil(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g31_cil_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3','Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.065 0.025]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{31}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf(end-5:end),g33_cil(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g33_cil_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra circular 1-3', 'Fibra circular 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.02 0.23]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{33}');
hold off;
%%
figure(6)
subplot(1,3,1)
plot(vf,C11_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,C11_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.9e8 0.7e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
```

```
subplot(1,3,2)
plot(vf,C13_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,C13_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.5e8 0.28e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,3)
plot(vf,C33_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,C33_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 2.5e10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(7)
subplot(1,2,1)
plot(vf,e13_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,e13_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.045 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf,e33_cuad,'-o');hold on;
semilogy(vf,e33_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 19]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(8)
subplot(1,2,1)
plot(vf,k11_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,k11_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([1.5E-11 0.062E-9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{11}^{eff} [ N/m<sup>2</sup>]');
```

```
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf,k33_cuad,'-o');hold on;
plot(vf,k33_cuad_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.72E-8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(9)
subplot(1,2,1)
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cuad(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cuad_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.013 0.1]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{p}');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cuad(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kt_cuad_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.813]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{t}');
hold off;
figure(10)
subplot(1,2,1)
plot(vf(end-5:end),g31_cuad(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g31_cuad_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.065 0.022]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{31}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf(end-5:end),g33_cuad(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g33_cuad_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Fibra cuadrada 1-3', 'Fibra cuadrada 1-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.02 0.24]);
```

```
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{33}');
hold off;
%%
figure(11)
subplot(1,3,1)
plot(vf_esf,C11_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,C11_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([1E8 0.5e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,2)
plot(vf_esf,C13_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,C13_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([-0.4E8 0.65E8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,3)
plot(vf_esf,C33_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,C33_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([1E8 4.7e8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(12)
subplot(1,2,1)
plot(vf_esf,e13_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,e13_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([-0.55E-3 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf_esf,e33_esf,'-o');hold on;
semilogy(vf_esf,e33_esf_aux,'-sq');hold on;
```

```
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0 1.2E-3]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(13)
subplot(1,2,1)
plot(vf_esf,k11_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,k11_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0.02E-9 0.077E-9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf_esf,k33_esf,'-o');hold on;
plot(vf_esf,k33_esf_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0.2E-10 0.75E-10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(14)
subplot(1,2,1)
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kp_esf(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kp_esf_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0 0.005]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{p}');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kt_esf(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf_esf(end-3:end),Kt_esf_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0 0.007]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{t}');
hold off;
figure(15)
```

```
subplot(1,2,1)
plot(vf_esf(end-3:end),g31_esf(:,2),'-o');hold on;
plot(vf_esf(end-3:end),g31_esf_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([-0.018 -0.004]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{31}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf_esf(end-3:end),g33_esf(:,2),'-o');hold on;
plot(vf_esf(end-3:end),g33_esf_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión esférica 0-3', 'Inclusión esférica 0-3 auxética')
xlim([0 0.5]); ylim([0.008 0.036]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{33}');
hold off;
%%
figure(16)
subplot(1,3,1)
plot(vf,C11_cua,'-o');hold on;
plot(vf,C11_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([1E8 0.9e9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,2)
plot(vf,C13_cua,'-o');hold on;
plot(vf,C13_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.4E8 0.5E8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,3,3)
plot(vf,C33_cua,'-o');hold on;
plot(vf,C33_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([1E8 10e8]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('C_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
```

```
hold off;
figure(17)
subplot(1,2,1)
plot(vf,e13_cua,'-o');hold on;
plot(vf,e13_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-2E-3 0]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{13}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
semilogy(vf,e33_cua,'-o');hold on;
semilogy(vf,e33_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3','Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 3.7E-3]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('e_{33}^{eff} [ N/m<sup>2</sup> ]');
hold off;
figure(18)
subplot(1,2,1)
plot(vf,k11_cua,'-o');hold on;
plot(vf,k11_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.02E-9 0.14E-9]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{11}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf,k33_cua,'-o');hold on;
plot(vf,k33_cua_aux,'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.2E-10 1.4E-10]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('\epsilon_{33}^{eff} [ N/m^2 ]');
hold off;
figure(19)
subplot(1,2,1)
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cua(:,2),'-o');hold on;
semilogy(vf(end-5:end),Kp_cua_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
```

```
xlim([0 0.7]); ylim([1.3E-3 0.0085]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{p}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf(end-5:end),Kt_cua(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),Kt_cua_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0 0.01]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('K_{t}');
hold off;
figure(20)
subplot(1,2,1)
plot(vf(end-5:end),g31_cua(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g31_cua_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([-0.0197 -0.0119]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{31}');
hold off;
subplot(1,2,2)
plot(vf(end-5:end),g33_cua(:,2),'-o');hold on;
plot(vf(end-5:end),g33_cua_aux(:,2),'-sq');hold on;
axis square;
legend('Inclusión hexaédrica 0-3', 'Inclusión hexaédrica 0-3 auxética')
xlim([0 0.7]); ylim([0.002 0.033]);
xlabel('Fracción volumétrica fibra');
ylabel('g_{33}');
hold off;
```