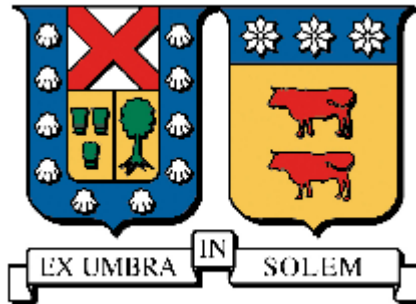


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



**ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO
DE LA INTERFASE SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN
MATERIAL COMPUESTO
DE ALUMINIO REFORZADO
CON NANOTUBOS DE CARBONO.**

ISMAEL CABRERA RIVAS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. LUIS PÉREZ P.
PROFESOR CORREFERENTE: DR ISMELI ALFONSO L.

DICIEMBRE - 2018

Resumen

El siguiente trabajo expone los resultados de la caracterización de las propiedades mecánicas (Módulo de Young y coeficiente de Poisson) de un material compuesto de una matriz metálica de aluminio reforzada con nanotubos de carbono (NTC) por medio del Método de Elementos Finitos (MEF). Para ello se simula un ensayo de compresión uniaxial a modelos que van desde 0.18 % a 2.25 % de refuerzo, afectos a la presencia de carburo de aluminio entre las fases del material.

El procedimiento a usar en este estudio consiste en modelar 89 Volúmenes Representativos Elementales (RVE por sus siglas en inglés) del material en estudio, creando 4 grupos de muestras según el espesor del carburo de aluminio presente en los refuerzos de éstas (1 [nm], 5 [nm], 10 [nm] y 15[nm]). Se idealiza en el proceso de modelado el conjunto del carburo más el refuerzo como un único material mediante la regla de las mezclas. Tanto la idealización del refuerzo como la elección de los RVE responde al requerimiento de reducir el costo computacional del problema. Posteriormente se simula un ensayo de compresión sobre los RVE usando MEF generando una deformación del 1 % para observar la fuerza de respuesta que éstos ofrecen.

Al aplicar MEF, se determinan las propiedades mecánicas del material compuesto acá presentado, obteniéndose los siguiente resultados: para el caso de la menor cantidad de refuerzo (0.18 %) con el carburo más grueso (15 [nm]) se obtuvo una disminución de la rigidez de un 0.11 % respecto del carburo más delgado (1 [nm]). Para el caso de la mayor cantidad de refuerzo (2.25 %), con el carburo más grueso (15 [nm]) se obtuvo una disminución de la rigidez del 0.94 % respecto del carburo más delgado (1 [nm]). Respecto del coeficiente de Poisson, los resultados no presentan patrón alguno, encontrándose su valores en el rango de 0.335 [-] a 0.35 [-].

Al aplicar la metodología expuesta en este trabajo se reduce el costo y el tiempo involucrados en estudiar un material respecto de hacerlo por medio de experimentos. En relación a los resultados, se puede observar que la influencia del espesor del carburo de aluminio es pequeña sobre la rigidez del material compuesto de matriz metálica, permitiendo una oportuna predicción y futura estandarización de sus propiedades.

Abstract

The following work exposes the results of the characterization of mechanical properties (Young Modulus and Poisson ratio) of a MMC (Metal Matrix Composite) with aluminum matrix reinforced with carbon nanotubes (CNT) using the Finite Elements Method (MEF). For that purpose a simulated compression test is accomplished to samples reinforced with 0.18 % to 2.25 % CNT, which experiences the presence of aluminum carbide into the material interlayer.

The procedure in this work is modeling 89 MMC Representative Volume Elements (RVE), creating 4 groups based on the thickness of the carbide layer between the aluminum matrix and the CNT reinforcement (1 [nm], 5 [nm], 10 [nm] y 15[nm]). On this modeling, the reinforcement and its carbide are conceptualized as an unique material using the mixture rule. These previous decisions are chosen to achieve lower computing complexity in order to make this problem computable. The simulation consists on emulate a compress test over each RVE using FEM applying an 1 % strain to get its reaction force.

By applying FEM some MMC properties are discovered, with the following results. In the 0.18 % reinforcement case, with thicker carbide layer (15 [nm]) Young Modulus lower its value about 0.11 % against the thinner layer (1 [nm]). In the 2.25 % reinforcement case, with thicker carbide layer (15 [nm]) Young Modulus lower its value about 0.94 % against the thinner layer (1 [nm]). The results don't show a pattern for Poisson ratio, its values are in [0.335 - 0.35] range.

By applying the previous method the costs and time involved on studying MMC properties are saved against the experimental way to do it. About results, the aluminum carbide layer thickness has little effect on MMC stiffness, making possible to predict and standarize its properties on the future.

Índice general

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivos principales	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Antecedentes generales	4
3.1. Aluminio	4
3.1.1. Aluminio y su obtención	4
3.1.2. Usos y propiedades del aluminio puro	6
3.1.3. Aleaciones de aluminio	7
3.1.4. Características de las aleaciones de aluminio y sus usos	8
3.2. Nanotubos de carbono	10
3.2.1. El carbono y su alotropía	10
3.2.2. Nanotubos y su clasificación	11
3.2.3. Propiedades de los nanotubos de carbono	12
3.2.4. Fabricación	13
3.2.5. Aplicaciones de los nanotubos de carbono	15
3.3. Fundición por presión o <i>Squeeze Casting</i>	17
3.3.1. Proceso de <i>Squeeze Casting</i>	17
3.3.2. Tipos de <i>Squeeze Casting</i>	18
3.3.3. Mojabilidad en el <i>Squeeze Casting</i>	20

3.3.4. Ventajas del <i>Squeeze Casting</i>	21
3.4. Materiales compuestos	25
3.4.1. Tipos de materiales y los materiales compuestos	25
3.4.2. Clasificaciones de los materiales compuestos	26
3.4.3. Regla de las mezclas	27
3.4.4. Refuerzo por fibras	29
3.4.5. Usos de los materiales compuestos	30
3.5. Determinación de las propiedades mecánicas de un material	32
3.6. Volumen representativo elemental	36
3.7. Método de elementos finitos	38
4. Metodología	41
4.1. El Problema a resolver	41
4.2. Procedimiento	42
4.3. Etapas del procedimiento	42
4.3.1. Análisis y determinación de las dimensiones de los RVE	42
4.3.2. Establecer las propiedades de los componentes del RVE	43
4.3.3. Modelado computacional de los RVE	45
4.3.4. Simulación numérica	49
4.3.5. Condiciones de contorno	49
4.3.6. Mallado	51
5. Resultados y Análisis	53
5.1. Resultados	53
5.2. Análisis de resultados	56
6. Conclusiones	64
A. Anexos A	66
A.1. Resumen de resultados	66
A.1.1. Tabla de resultados para RVE con 1 [nm] de Al_4C_3	67

A.1.2. Tabla de resultados para RVE con 5 [nm] de Al_4C_3	68
A.1.3. Tabla de resultados para RVE con 10 [nm] de Al_4C_3	69
A.1.4. Tabla de resultados para RVE con 15 [nm] de Al_4C_3	70
A.2. Resultados	71
A.2.1. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 1 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo	71
A.2.2. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 5 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo	82
A.2.3. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 10 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo	93
A.2.4. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 15 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo	105
B. Anexos B	116
B.1. Asimetría	116
B.2. Calidad de elemento	120
B.3. Calidad ortogonal	124
B.4. Mallado	128
B.5. Distribución de refuerzos	134
Bibliografía	I

Índice de tablas

3.1. Características físicas del aluminio puro [9, 11, 12].	6
3.2. Características mecánicas del aluminio aleado [12].	7
3.3. Efecto de diferentes aleantes sobre el comportamiento de las aleaciones de aluminio [12].	8
3.4. Parámetros óptimos para realizar fundición por presión sobre aluminio.	24
3.5. Clasificación de los materiales sólidos [1].	25
4.1. Fracciones volumétricas de NTC y Al_4C_3 que participan en una fibra de refuerzo y radios efectivos del NTC según el espesor de la capa de Al_4C_3 que lo recubre [14]. . . .	45
4.2. Características de las partículas de refuerzo cilíndricas idealizadas como un conjunto de "NTC+ Al_4C_3 ". Interfaz: espesor de la interfaz de carburo de aluminio, Radio: radio de los cilindros de NTC+ Al_4C_3 , Módulo Elástico: módulo elástico de los cilindros de NTC+ Al_4C_3 , Poisson: módulo de Poisson de los cilindros de NTC+ Al_4C_3	45
4.3. RVE modelados y sus características: cantidad de partículas y proporción volumétrica de refuerzo, según el espesor de Al_4C_3 , indicado en la primera fila.	47
5.1. Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.	55
5.2. Resultados extrapolados linealmente de incremento porcentual del módulo elástico vs % volumétrico de refuerzo, agrupados en columnas según el espesor de la capa de Al_4C_3 presente en el refuerzo. (Incremento respecto de la constante de elasticidad de la aleación sin refuerzos (77 [GPa])).	60
A.1. resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.	67

-
- A.2. Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson. 68
- A.3. Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson. 69
- A.4. Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 15 nm de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson. 70

Índice de figuras

1.1. Clasificación y evolución de los materiales a lo largo de las eras [1].	1
3.1. Mineral de bauxita, de donde se extrae el aluminio [9].	4
3.2. Esquema del método Bayer para la obtención de alúmina [9].	5
3.3. Celda electrolítica, donde se obtiene aluminio puro [9].	6
3.4. Estructura de 8 formas alótropas del carbono: A)Diamante, B)Grafito, C)Lonsdaleita, D)Fulereo C_{60} , E)Fulereo C_{540} , F)Fulereo C_{70} , G)Carbón (amorfo), H) Nanotubo de Carbono de pared simple [5].	10
3.5. Comparativa entre un NTC de pared simple (A) y otro de pared compuesta (B) [18]. . .	11
3.6. Diagrama sobre una lámina de grafeno 2D, que muestra los vectores mediante los cuales se define la clasificación de las estructuras de los NTC [5].	12
3.7. Diagrama que muestra el enrollamiento de las diferentes estructuras quirales de los NTC [5].	12
3.8. Esquema de funcionamiento del método de descarga de arco para fabricación de NTC [17].	14
3.9. Esquema de funcionamiento del método de ablación láser para fabricación de NTC [17].	14
3.10. Esquema de funcionamiento del método de deposición química de vapor para fabricación de NTC [23].	15
3.11. Ejemplos de piezas manufacturadas mediante <i>Squeeze Casting</i> [30].	17
3.12. Diferentes procesos de fundición por presión, adaptado de [28].	18
3.13. Etapas del proceso de <i>Squeeze Casting</i> directo: fila superior, sin movimiento de metal, fila inferior, con movimiento del metal [28].	18
3.14. Diagrama esquemático que muestra la operación típica de moldeo por presión indirecto, de inyección vertical por pistón y cierre horizontal del molde [28].	20

3.15. Diagrama esquemático de la máquina de moldeo LEOMACS, diseñado por Toshiba. (a) molde de cierre vertical e inyección vertical, (b) molde de cierre horizontal e inyección horizontal [28]. En estos modelos, el inyector no es el encargado de ejercer la presión sobre el metal fundido.	20
3.16. Capilaridad de un fluido en un tubo, muestra patente de la mojabilidad, extraído de [33].	21
3.17. Esquema que muestra diferentes fases del encogimiento de un metal fundido, extraído y adaptado de [36].	22
3.18. Efecto de la presión externa en la morfología de las partículas de silicio eutéctico para la fundición por presión de la aleación 'Aluminio LM13' para temperatura de metal fundido de 730°C y temperatura de molde de 200°C: (a)0 MPa, (b)20 MPa, (c)53 MPa, (d)106 MPa, (e)171 MPa, (f)211 MPa [3].	23
3.19. Clasificación de materiales compuestos [34].	26
3.20. (a)esquema del diagrama esfuerzo-deformación para una fibra frágil y una matriz dúctil, donde se señalan los esfuerzos y deformaciones de fractura de ambos. (b)esquema del diagrama esfuerzo-deformación para un material compuesto de fibras alineadas paralelamente que es expuesto a una carga uniaxial en dirección longitudinal del alineamiento del refuerzo, donde las curvas de (a) se muestran superpuestas [35].	28
3.21. Métodos de compresión: carga directa en el extremo de la probeta (A) según norma ASTM, carga en corte a través de las paredes de la probeta (B) según método Celanece (CRAG), carga mixta, de corte y directa a la vez (C) [48].	33
3.22. Esquema del funcionamiento de las mordazas para el ensayo de compresión: (A) Celanece o CRAG, (B) ITRI, mordazas para ensayos de compresión: (C)ITRI, (D)CRAG [48]. . .	34
3.23. (A)esquema del equipo requerido para el ensayo de impacto sobre placa [48], (B)esquema del equipo y las probetas requeridas para el ensayo Charpy e Izod [43].	34
3.24. Curva esfuerzo/deformación y la información que es posible extraer de ella [43].	35
3.25. Representación del medio heterogéneo, el medio homogéneo simulado y el RVE [41]. . .	36
3.26. Dominio 3D con diferentes mallados [57].	38
3.27. En naranjo, se señalan las zonas de un cuerpo donde se recomienda refinar la malla [62].	39
3.28. Buenas y malas relaciones de aspecto en elementos, geométricamente apreciadas [63]. . .	40
4.1. A)nanotubo de carbono de pared múltiple, B) cilindro relleno que para efectos del presente trabajo representará al nanotubo de carbono de pared múltiple.	44
4.2. A)representación esquemática de un NTC cubierto de una capa de carburo de aluminio, B)idealización del refuerzo mostrado en (A) como un único material cuyas propiedades son ponderación de sus constituyentes.	44

4.3. Distribución de partículas generadas por DEM, para el caso de una espuma metálica, en diferentes etapas del proceso: a)distribución inicial, b)distribución a mitad del tiempo, c)distribución final [70].	46
4.4. Algunos RVE de los señalados en la tabla 4.3 y sus refuerzos: A) pared 1 [nm] y 0.5307 % de refuerzo, B) pared 5 [nm] y 0.6007 % de refuerzo, C) pared 10 [nm] y 0.4822 % de refuerzo, D) pared 15 [nm] y 0.5345 % de refuerzo.	48
4.5. Menú de configuración de Ansys donde se define 'bonded' como tipo de contacto entre la matriz y sus refuerzos.	50
4.6. Menú de configuración de Ansys donde se define la condición de la tapa inferior, junto a la figura que indica visualmente la ubicación de esa condición de contorno.	50
4.7. Menú de configuración de Ansys donde se define la condición de la tapa superior y se destaca la condición 'Coupled', junto a la figura que indica visualmente la ubicación de esa condición de contorno.	51
4.8. Algunos RVE de los señalados en la tabla 4.3 que han sido mallados: A) pared 1 [nm] y 0.5307 % de refuerzo, B) pared 5 [nm] y 0.6007 % de refuerzo, C) pared 10 [nm] y 0.4822 % de refuerzo, D) pared 15 [nm] y 0.5345 % de refuerzo, E) un refuerzo mallado.	52
5.1. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1894 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	53
5.2. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2793 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	54
5.3. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.2508 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	54
5.4. Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	56
5.5. Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	57
5.6. Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	57
5.7. Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	58

5.8. Regresión lineal de los datos, donde se incluye una extrapolación, del módulo de elasticidad vs % volumétrico de refuerzo, agrupados en diferentes colores según el espesor de la capa de Al_4C_3 presente en sus refuerzos (Rojo: 1 [nm], Negro: 5 [nm], Verde: 10 [nm], Azul: 15 [nm]). La zona punteada representa el dominio en el que cada grupo de RVE fue extrapolada. Los datos de esta figura provienen de la tabla 5.2.	59
5.9. Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 1 [nm] de espesor.	61
5.10. Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 5 [nm] de espesor.	61
5.11. Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 10 [nm] de espesor.	62
5.12. Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 15 [nm] de espesor.	62
5.13. Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo, agrupados según color para diferentes espesores de carburo de aluminio presente en los refuerzos.	63
A.1. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1894 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	71
A.2. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1932 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	71
A.3. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.332 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	72
A.4. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3664 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	72
A.5. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3791 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	73
A.6. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5307 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	73
A.7. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5599 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	74
A.8. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5841 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	74
A.9. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6427 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	75
A.10. Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6936 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	75

A.11.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7815 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	76
A.12.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8833 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	76
A.13.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9534 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	77
A.14.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9572 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	77
A.15.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.068 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	78
A.16.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0909 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	78
A.17.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2475 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	79
A.18.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2488 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	79
A.19.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2704 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	80
A.20.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.385 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	80
A.21.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4041 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3	81
A.22.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2085 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	82
A.23.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2340 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	82
A.24.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2518 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	83
A.25.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4033 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	83
A.26.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4084 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	84
A.27.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4161 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	84

A.28.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6007 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	85
A.29.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6796 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	85
A.30.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7051 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	86
A.31.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7891 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	86
A.32.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8222 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	87
A.33.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8935 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	87
A.34.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0705 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	88
A.35.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0962 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	88
A.36.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1240 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	89
A.37.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2615 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	89
A.38.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2653 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	90
A.39.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.3722 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	90
A.40.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4678 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	91
A.41.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5238 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	91
A.42.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5302 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	92
A.43.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.6829 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3	92
A.44.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2645 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	93

A.45.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2798 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	93
A.46.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2913 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	94
A.47.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4644 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	94
A.48.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4823 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	95
A.49.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4824 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	95
A.50.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7458 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	96
A.51.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7675 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	96
A.52.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7688 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	97
A.53.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8910 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	97
A.54.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9839 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	98
A.55.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0361 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	98
A.56.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2730 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	99
A.57.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2793 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	99
A.58.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5085 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	100
A.59.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5582 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	100
A.60.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5760 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	101
A.61.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7199 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	101

A.62.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7275 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	102
A.63.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7313 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	102
A.64.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.8840 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	103
A.65.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.8561 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	103
A.66.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.0884 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3	104
A.67.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3027 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	105
A.68.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3151 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	105
A.69.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3460 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	106
A.70.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5345 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	106
A.71.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5434 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	107
A.72.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5956 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	107
A.73.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8821 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	108
A.74.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9012 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	108
A.75.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9279 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	109
A.76.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0680 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	109
A.77.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1176 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	110
A.78.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1545 % de re- fuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	110

A.79.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4143 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	111
A.80.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4690 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	111
A.81.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5187 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	112
A.82.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7122 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	112
A.83.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7772 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	113
A.84.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.9554 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	113
A.85.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.9834 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	114
A.86.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.0500 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	114
A.87.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.1095 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	115
A.88.Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.2508 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3	115
B.1. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	116
B.2. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	116
B.3. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	117
B.4. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	117
B.5. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	117
B.6. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	118
B.7. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	118

B.8. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	118
B.9. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	119
B.10. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	119
B.11. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	119
B.12. Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	120
B.13. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	120
B.14. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	120
B.15. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3	121
B.16. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	121
B.17. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	121
B.18. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3	122
B.19. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	122
B.20. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	122
B.21. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3	123
B.22. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	123
B.23. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	123
B.24. Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3	124

B.25.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	124
B.26.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	124
B.27.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	125
B.28.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	125
B.29.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	125
B.30.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	126
B.31.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	126
B.32.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	126
B.33.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	127
B.34.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	127
B.35.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	127
B.36.Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	128
B.37.Mallado del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	128
B.38.Mallado del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	129
B.39.Mallado del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	129
B.40.Mallado del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	130
B.41.Mallado del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	130
B.42.Mallado del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	131
B.43.Mallado del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	131
B.44.Mallado del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	132
B.45.Mallado del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	132

B.46.Mallado del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	133
B.47.Mallado del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	133
B.48.Mallado del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	134
B.49.Distribución de refuerzo del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	134
B.50.Distribución de refuerzo del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	135
B.51.Distribución de refuerzo del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	135
B.52.Distribución de refuerzo del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	136
B.53.Distribución de refuerzo del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	136
B.54.Distribución de refuerzo del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	137
B.55.Distribución de refuerzo del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	137
B.56.Distribución de refuerzo del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	138
B.57.Distribución de refuerzo del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	138
B.58.Distribución de refuerzo del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	139
B.59.Distribución de refuerzo del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	139
B.60.Distribución de refuerzo del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .	140

1. Introducción

La humanidad, desde el albor del tiempo, ha hecho uso de los materiales que están disponibles en la naturaleza para sobrevivir. El perfeccionamiento de técnicas que permiten aprovecharlos de mejor manera, adaptándolos a los requerimientos y necesidades del grupo social, permitió que nuestra especie se organizara en sociedades cada vez más grandes y complejas. Dicha evolución no se limita a la explotación y uso de los materiales que se pueden hallar en estado natural sino que además contempla la creación de nuevos. En la figura 1.1 se puede apreciar una de las maneras de clasificarlos, agrupándolos en 4 categorías: metales, cerámicos, compuestos y polímeros.

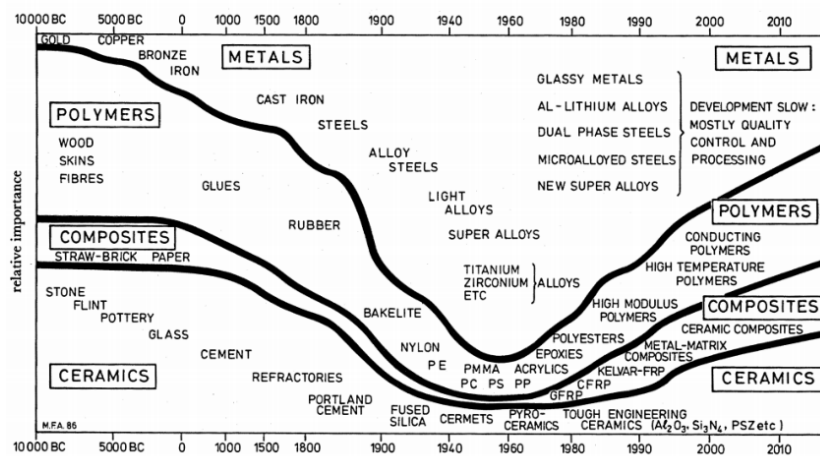


Figura 1.1: Clasificación y evolución de los materiales a lo largo de las eras [1].

Hoy en día, la ingeniería moderna está a cargo del diseño de nuevos materiales, su mejora y de hallar aplicaciones para éstos, considerando sus propiedades físicas, químicas, su factibilidad técnica y/o conveniencia económica de su fabricación. Materiales que se pueden citar como ejemplo de esto son las espumas metálicas, semiconductores, nuevas aleaciones y los nanotubos de carbono.

Una de las técnicas más antiguas que se puede contar para el uso, creación y modificación de nuevos materiales es la fundición [2]. En la edad de bronce se usaba para darle forma a dicho metal. El proceso de Fundición por Presión o *Squeeze Casting* es una evolución del anteriormente mencionado y consiste en vaciar dentro de un molde algún material fundido (que puede ser un polímero o un metal), para luego darle forma mediante el uso de una prensa hidráulica [3]. Las piezas generadas de esta forma destacan por sus propiedades mecánicas, su acabado superficial y ligereza [4], además, de ser resistentes

a la corrosión. Esta técnica permite añadir refuerzos al material fundido, para mejorar algunas de sus características. Esto vuelve de alto interés para la industria automovilística y aeronáutica los materiales generados por este método.

Mismos objetivos busca la incorporación de la nano tecnología para materiales, entre cuyas innovaciones se encuentran los NanoTubos de Carbono (NTC). Éstos corresponden a largas moléculas de carbono, de forma cilíndrica y huecas, en cuyas paredes se hallan dichos átomos de carbono distribuidos de forma hexagonal. Su diámetro es de orden nanométrico mientras su largo es micrométrico [5, 6]. Sus propiedades mecánicas excepcionales (bajo peso, gran rigidez, gran resistencia) [7] hacen que sea muy atractivo como fibra de refuerzo. Además de esto, los NTC tienen otros campos de aplicación como conductores eléctricos, absorbentes de polución de combustión, electrodos, almacenamiento de hidrógeno para vehículos eléctricos, etc [8].

Sin embargo, como en todo proceso metalúrgico se generan efectos secundarios indeseados. La formación de una interfase de carburo de aluminio (Al_4C_3) ocurre en el proceso de reforzar matrices de aluminio con NTC a través del ya mencionado *Squeeze Casting*. En este contexto se desarrolla la presente investigación, que se orienta a estudiar numéricamente la influencia que este material no deseado puede ejercer sobre las propiedades mecánicas del compuesto creado.

A continuación, se exponen en detalle las consideraciones y procedimientos para la realización de este estudio.

2. Objetivos

2.1. Objetivos principales

Estudiar numéricamente, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), el efecto de la interfase de carburo de aluminio (Al_4C_3) sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto de una matriz de aluminio reforzado con nanotubos de carbono (NTC). Con el desarrollo de este estudio se pretende predecir el efecto que se tiene sobre la rigidez de la matriz de aluminio reforzada con NTC según la cantidad de Al_4C_3 formado en la interfase entre la matriz y su refuerzo.

2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo anteriormente señalado se deben abordar estos objetivos específicos:

- Desarrollar un Modelo 3D del material de aluminio reforzado con NTC.
- Caracterizar numéricamente el material compuesto utilizando un software comercial como herramienta de análisis.
- Desarrollar un indicador para cuantificar el efecto de la interfase Al_4C_3 sobre las propiedades mecánicas del material en estudio.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes proporciones de refuerzo de NTC y espesores de interfase.
- Presentar conclusiones del trabajo desarrollado.

3. Antecedentes generales

3.1. Aluminio

El aluminio es uno de los metales más utilizados en el mundo, especialmente en forma de aleación binaria con silicio. Para adaptarlo a los requerimientos de diversas aplicaciones se emplean materiales de refuerzo, ya sea para intensificar o morigerar ciertas características del metal.

El proceso metalúrgico mediante el cual se incorporan estos refuerzos a la matriz de aleación aluminio es el *Squeeze Casting* o fundición por presión. Sin embargo, cuando se usan NTC como refuerzos para este metal, se genera un material no deseado: una interfase de carburo de aluminio (Al_4C_3) entre el NTC y la aleación misma.

Para una adecuada contextualización, en este capítulo se exponen someramente los materiales y el proceso mencionado, entre otros conceptos relevantes.

3.1.1. Aluminio y su obtención

El aluminio es el tercer elemento más abundante de la corteza terrestre luego del oxígeno y del silicio, componiéndola en un 7.5 % aproximadamente [9]. De forma natural el aluminio está disponible sólo en forma de minerales arcillosos, de los cuales el único de interés comercial es la bauxita, mineral que se aprecia en la figura 3.1, que contiene entre un 30 % y un 50 % de aluminio en forma de óxidos (alúmina), además de impurezas de silicio, óxidos de titanio y óxidos de hierro.



Figura 3.1: Mineral de bauxita, de donde se extrae el aluminio [9].

La forma en la que se obtiene el aluminio de este mineral, consta de dos procesos: El primero,

llamado proceso Bayer [9, 10] , transforma la bauxita en óxidos de aluminio. El segundo proceso, llamado electrólisis, permite obtener aluminio puro a partir de sus óxidos [9].

El método Bayer consiste en una serie de pasos, esquematizados en la figura 3.2, los cuales son:

- Molienda de la bauxita.
- Bauxita de molienda se somete a baños de soda cáustica caliente en un mezclador.
- La mezcla pasa al digestor, donde por acción de la presión y la temperatura se convierte en aluminato de sodio.
- La mezcla pasa a un sedimentador, donde se retiran las impurezas (barros rojos).
- El aluminato pasa a unos precipitadores donde se cristaliza en hidróxido de aluminio en solución.
- La solución con cristales pasa a un concentrador donde se obtienen cristales de hidróxido de aluminio.
- Finalmente dichos cristales pasan por un proceso de calcinación, donde por acción del calor, el hidróxido de aluminio se convierte en óxido de aluminio (alúmina).

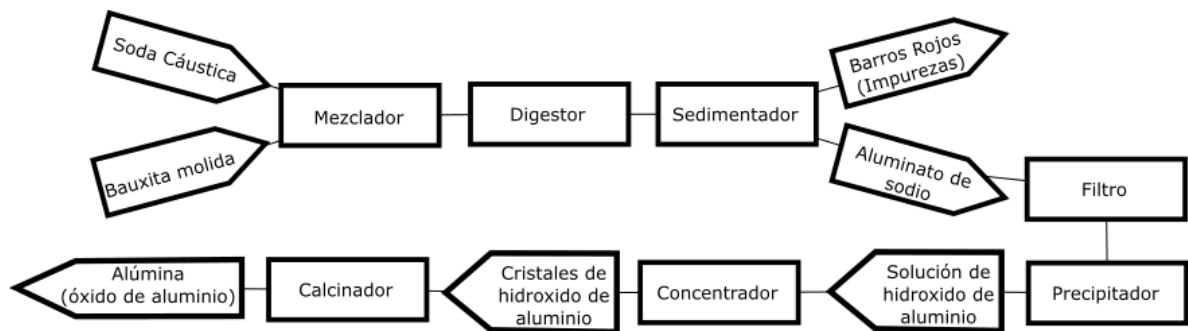


Figura 3.2: Esquema del método Bayer para la obtención de alúmina [9].

El proceso de electrólisis que le sigue a la obtención de la alúmina se realiza en una celda electrolítica cuyas paredes y fondo constituyen el cátodo y están hechos de carbón. En ésta se deposita la alúmina, que se disuelve en un baño de hexafluoraluminato de sodio, comúnmente llamado Criolita, fundido a 1012°C, cuya mezcla se somete a un paso de corriente eléctrica que la descompone químicamente, obteniéndose el aluminio puro fundido, que baja al fondo de la celda desde donde se extrae, como se aprecia en la figura 3.3. En cuanto al ánodo, desde el que se desprende el oxígeno presente en la alúmina, se encuentra igualmente hecho de carbón y sumergido en la mezcla de criolita.

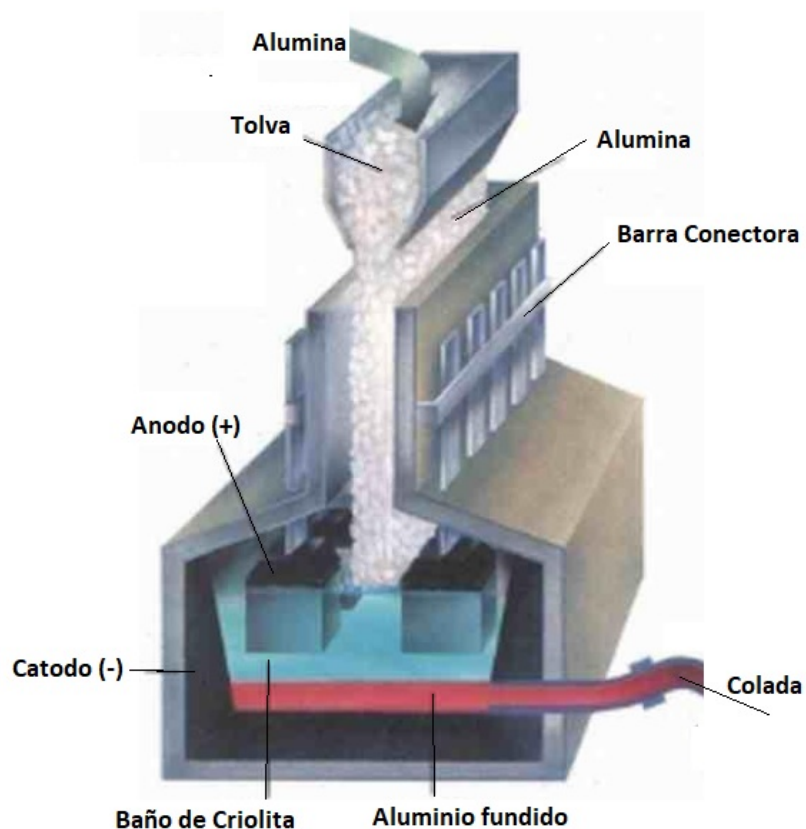


Figura 3.3: Celda electrolítica, donde se obtiene aluminio puro [9].

3.1.2. Usos y propiedades del aluminio puro

Al aluminio se le considera un material blando y maleable, de buena conductividad eléctrica y térmica, además de poseer propiedades ópticas relevantes [11]. Estas características lo vuelven un metal usado para propósitos tan diversos como aislación térmica en trajes de astronautas, conservación de alimentos ya sea en latas o tetrapacks, utensilios de cocina, espejos para telescopios, cables de alta tensión, disipadores de calor para electrónica de potencia, joyería y superconductores [9]. Algunas propiedades relevantes se mencionan en la tabla 3.1.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad	2700	kg/m ³
Dureza Mohs	2-4	-
Resistencia última	200	MPa
Módulo Elástico	69	GPa
Conductividad eléctrica	61	IACS
Conductividad térmica	230	W/m·K
Reflectividad	80 %	-

Tabla 3.1: Características físicas del aluminio puro [9, 11, 12].

3.1.3. Aleaciones de aluminio

Las propiedades del aluminio puro no lo hacen un metal adecuado para grandes solicitaciones mecánicas. Sin embargo, sus aleaciones destacan en el ámbito estructural por su relación peso/resistencia y otras características mecánicas. Además, el aluminio es susceptible de ser corroído lo que se evita gracias al óxido que naturalmente se genera en su superficie (alúmina). Éste protege las capas subyacentes del metal sin agrietarse o desprenderse, característica que se busca fortalecer mediante aleaciones y tratamientos diversos. Un ejemplo de tratamiento es el anodizado, que busca engrosar la capa de óxido protector del aluminio, mientras que un ejemplo de aleación de aluminio ampliamente utilizada es el Duraluminio, el cual posee 5 % de cobre, 2 % de magnesio y 1 % de manganeso, lo que mejora la resistencia mecánica y la dureza [13].

Actualmente se conocen más de 100 composiciones y existen más de 300 aleaciones de aluminio en el mercado a nivel mundial [12]. Para cada uso existe una aleación adecuada, y es por esto que las aleaciones poseen un amplio rango de propiedades, como puede apreciarse en la tabla 3.2. Las aleaciones de aluminio presentan diversas características positivas y negativas, que tienen relación directa con las propiedades mecánicas del material:

- (+) Poseen buena fluidez para fundición, lo que permite utilizar dicho material para molduras más grandes o geometrías complejas respecto de las posibilidades con otros metales.
- (+) Se funden a baja temperatura comparado con otros metales, lo cual implica facilidades para la manipulación del proceso, menor exigencia a los materiales involucrados en dicha manipulación, y por ende, menor costo.
- (-) No es posible realizar secciones muy delgadas, tanto por la buena fluidez como por la menor fortaleza del material.
- (-) Si bien el proceso de fundición es más económico, la solidificación en geometrías complejas es un fenómeno más difícil de controlar, agregándose en éste variabilidad al acabado final de la pieza moldeada.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Esfuerzo límite elástico	20-455	MPa
Esfuerzo Último	70-505	MPa
Enlongación	1-30	%
Dureza	30-150	HB
Conductividad eléctrica	18-60	IACS
Conductividad térmica	85-175	W/m·K
Elasticidad	65-80	GPa

Tabla 3.2: Características mecánicas del aluminio aleado [12].

3.1.4. Características de las aleaciones de aluminio y sus usos

Los efectos de cada elemento aleante en las propiedades mecánicas del aluminio se pueden ver en la tabla 3.3, entre los que destacan el cobre, que entrega mayor resistencia mecánica y dureza a la aleación, y el silicio que, proporcionado en grandes volúmenes, mejora la fluidez en fundición, además de evitar el agrietamiento durante la solidificación en este proceso.

ALEANTE	MEJORA
Bismuto, Cadmio, Cromo, Plomo	Respuesta al mecanizado
Berilio	Resistencia a la oxidación
Cobre, Hierro, Magnesio	Resistencia mecánica y dureza
Antimonio, Cromo, Sodio, Titanio, Silicio	Refinamiento de la microestructura
Boro	Conductividad eléctrica
Hierro, Silicio	Fundibilidad
Níquel	Resistencia a altas temperaturas
Silicio, Plata	Resistencia a la corrosión

Tabla 3.3: Efecto de diferentes aleantes sobre el comportamiento de las aleaciones de aluminio [12].

Esta diversidad de posibilidades ha motivado a la Asociación Estadounidense del Aluminio (AA) [12, 13] a generar una clasificación de aleaciones de aluminio, que permite apreciar y comparar cómo afectan estas combinaciones de aleantes a las propiedades del metal y sus usos:

- 1xx.z: Aluminio puro, 99.00 % o superior. Excelente para su aplicación como conductor en alta tensión, bobinas, transformadores y capacitores.
- 2xx.z: Aluminio aleado con cobre, para mejorar la resistencia mecánica. Se le agrega plata y magnesio para impedir el agrietamiento por corrosión. Aleación susceptible de agrietarse mientras se enfría. Se pueden usar en aplicaciones de altas temperaturas, debido a su bajo coeficiente de expansión térmica y buena conductividad térmica, por lo que se usan para blocks de motores enfriados por aire, tanto en los ámbitos de aviación y motociclismo.
- 3xx.z: Aluminio aleado con silicio y cobre, para mejorar las características importantes en fundición, como la fluidez, además de mejorar la resistencia a la abrasión. Se agrega cobre para mejorar la resistencia mecánica y el comportamiento ante el mecanizado, sin embargo, no posee buena ductilidad ni resistencia a la corrosión. Se usa en motores, especialmente en elementos sometidos a presión, como cilindros, carcasas de embragues, culatas, cárteres y bombas de combustible.

En el caso de aluminio aleado con silicio y magnesio se tiene buen comportamiento para la fundición y resistencia a la corrosión además de admitir tratamientos térmicos para mejorar sus características mecánicas. Por estos motivos se usan en aplicaciones estructurales y de automovilismo, como material para chasis y llantas, elementos de transmisión de potencia como cardanes, planetarios y bombas de freno, además de tuberías de alta presión hidráulicas.

- 4xx.z: Aleación binaria de propósito general, aluminio aleado con silicio, mejora las características críticas para la fundición, como la fluidez, además de promover la nucleación de granos más finos y por ello es de buena ductilidad, resistente a la corrosión, no obstante no ofrece buen

comportamiento ante el mecanizado. Entre sus usos se puede mencionar utensilios de cocina, médicos y dentales, componentes estructurales de vehículos, arquitectura y rieles de trenes de alta velocidad.

- 5xx.z: Aluminio aleado con magnesio, excelente resistencia a la corrosión, incluso en ambientes marinos, adecuada para ser mecanizada, pulida y soldada.
- 7xx.z: Aluminio aleado con zinc, no destaca por su resistencia mecánica, pero si por su resistencia ante el agrietamiento por corrosión, además de conservar sus dimensiones estables y sin distorsiones ante el mecanizado y la soldadura, no requiriendo tratamiento térmico posterior. Se usan en espejos de sistemas ópticos, instrumentos de medición, armas de bolsillo y piezas que serán posteriormente soldadas.
- 8xx.z: Aluminio aleado con estaño, adecuado para situaciones de abrasión, compresión y calor intenso, destacando además por su dureza. Su uso se da principalmente en rodamiento lubricados para cargas moderadas.
- 9xx.z: Aluminio con otros aleantes principales.

Se debe mencionar que dentro de las series 2xx.z y 3xx.z se hallan materiales de calidad aeroespacial, que poseen alta resistencia mecánica, buena ductilidad y microestructura muy fina. Sus usos van desde elementos estructurales de aviación, sistemas hidráulicos de aviones y suspensiones de automóviles de gama alta, hasta cuerpos y cabezas de misiles, cohetes, satélites y cápsulas tripuladas de misiones espaciales.

La aleación que se usa para este trabajo es Al-12wt %Si, que corresponde a una aleación de la serie 4xx.z, las que se destacan por su buena fluidez, fundibilidad y otras especiales características ya mencionadas, razones por las cuales ha sido elegida como aleación matriz en otros trabajos de esta índole [14].

3.2. Nanotubos de carbono

3.2.1. El carbono y su alotropía

El carbono es el sexto elemento de la tabla periódica y posee un peso atómico de 12. Sus 4 electrones de valencia le permiten establecer enlaces covalentes con muchos otros elementos, incluido él mismo. Es por esto que puede participar tanto en moléculas inorgánicas como en moléculas orgánicas y en organismos vivos formando compuestos de la más diversa índole, ya sean naturales o sintéticos [9]. Existen muchas formas en las que el carbono se presenta, tanto naturales como sintéticas, algunas de las cuales se muestran en la figura 3.4. Se les llaman a éstas formas alotropas al ser diferentes ordenamientos moleculares que constan únicamente del mismo átomo puro de carbono. Las propiedades de cada una de esas formas son diferentes y, a veces, disímiles como el grafito y el diamante, debido exclusivamente a los diferentes ordenamientos que los átomos de carbono pueden adoptar gracias a su valencia 4 covalente.

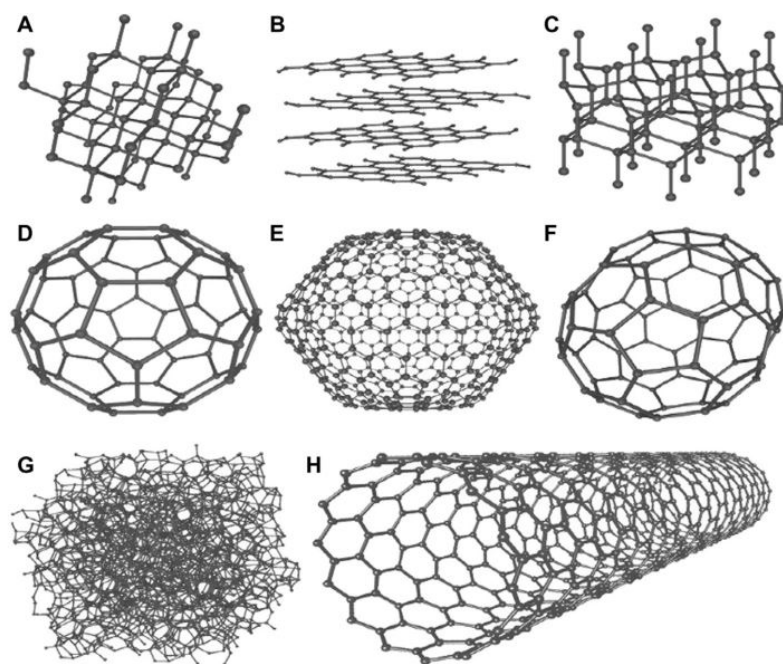


Figura 3.4: Estructura de 8 formas alotropas del carbono: A)Diamante, B)Grafito, C)Lonsdaleita, D)Fulereo C_{60} , E)Fulereo C_{540} , F)Fulereo C_{70} , G)Carbón (amorfo), H) Nanotubo de Carbono de pared simple [5].

El grafeno es una red nanométrica bidimensional de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie uniforme plana con ligeras ondulaciones de un (1) átomo de espesor, en la cual los átomos de carbono están organizados en forma de celdas hexagonales, cada uno de los cuales está unido a otros 3. Se puede considerar a éste el material base de los demás compuestos gráficos: envuelto en forma cuasiesférica, puede formar fulerenos (C_{60}); si se enrolla cilíndricamente, se forman NTC; si se superponen tridimensionalmente capa sobre capa, forma grafito [15].

3.2.2. Nanotubos y su clasificación

Los NTC son formas de carbono cilíndricas que tienen nanómetros de diámetro mientras que su largo es micrométrico, en ocasiones sus extremos están cerrados por un hemisferio fullerénico y en ocasiones están abiertos [5]. Desde su descubrimiento [16] se ha distinguido entre NTC de pared simple y multipared [17]:

- Nanotubos de pared simple: cilindro formado por una lámina de grafeno enrollada sin uniones. Se pueden considerar un objeto unidimensional, pues su largo excede 1000 veces su diámetro.
- Nanotubos de pared múltiple: consiste en un grupo de NTC concéntricos, uno dentro de otro.

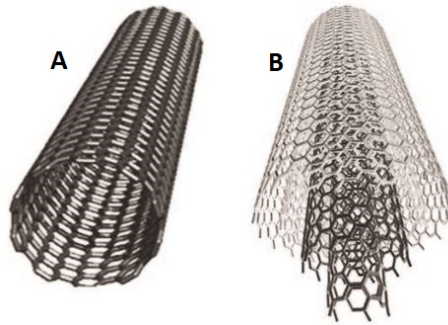


Figura 3.5: Comparativa entre un NTC de pared simple (A) y otro de pared compuesta (B) [18].

Las propiedades del NTC se determinan por la cantidad de capas que posea y por la forma en que ocurre el enrollamiento del grafeno. Esto último se expresa mediante el vector quirál del NTC. Siendo $\mathbf{a}_1$ y $\mathbf{a}_2$ los vectores unitarios de la red hexagonal de grafeno, se puede definir $C(n, m) = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$, (n y m , enteros) como vector quirál, el cual, si se ubica en el plano del grafeno desenrollado, es perpendicular al eje del enrollamiento que da origen al NTC [5]. En función de estos parámetros, n y m , se clasifica la estructura de los NTC como zigzag $(n, 0)$, armchair (n, n) o quirál (n, m) , como se puede apreciar en las figuras 3.6 y 3.7. Para i entero, si $|n - m| = 3i$, entonces los enlaces del NTC se comportan como si fuese metálico. Si $|n - m| = 3i + 1$, entonces se comportan como semiconductores.

El concepto de quiralidad de un NTC, atendiendo a la figura 3.7, queda más patente si se imagina una lámina infinita de grafeno la cual es enrollada en diferentes orientaciones. La quiralidad es la orientación de dicho enrollamiento que da origen a un NTC.

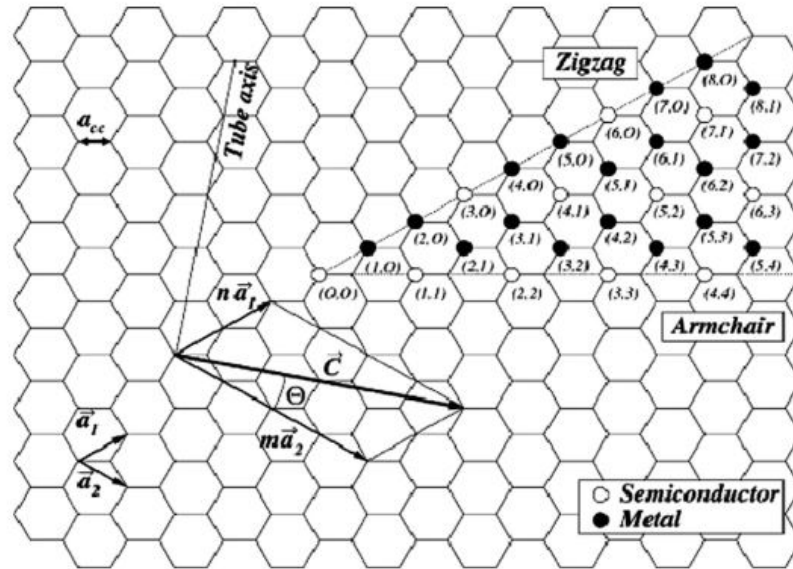


Figura 3.6: Diagrama sobre una lámina de grafeno 2D, que muestra los vectores mediante los cuales se define la clasificación de las estructuras de los NTC [5].

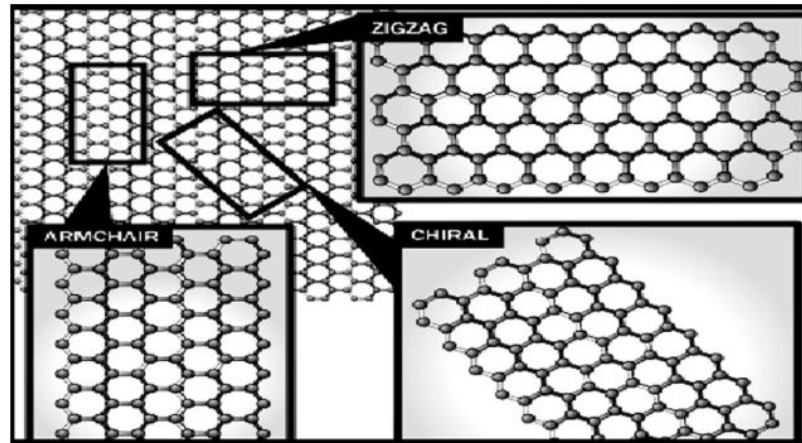


Figura 3.7: Diagrama que muestra el enrollamiento de las diferentes estructuras quirales de los NTC [5].

3.2.3. Propiedades de los nanotubos de carbono

Se debe mencionar que las propiedades de los NTC dependen únicamente del número de capas y de su quiralidad.

- Propiedades eléctricas: la quiralidad del NTC puede indicar si su comportamiento será semiconductor o superconductor. Debido a que el control sobre el proceso para su fabricación no es total aún, se estima que 1/3 de los NTC de pared simple que se fabrican son superconductores y 2/3

son semiconductores [18]. La conductividad de los NTC de pared simple es $10^5 - 10^6$ [S/m] en el caso superconductor y de 10 [S/m] en el caso semiconductor. Para los NTC de pared múltiple, estos valores rondan $10^7 - 10^8$ [S/m].

- Propiedades térmicas: los NTC poseen conductividades más altas que las del diamante, en el orden de los 3300 [W/(K.m)], además de ser estables térmicamente a altas temperaturas [18].
- Propiedades mecánicas: los NTC generan mucho interés a causa de la inusual relación peso/resistencia que poseen, además de otras características mecánicas (hasta 100 veces más resistente que el mejor acero, con sólo un 33 % de su densidad [17]). Los NTC de pared simple poseen un módulo de elasticidad de 1.25 [TPa] mientras que los de pared múltiple ven elevada esta característica a 1.8 [TPa]. Dadas las incertidumbres asociadas al proceso de fabricación de los NTC, se tiene que el rango para la resistencia última en el caso multipared es entre 11 y 63 [GPa], la elongación es de 12 % y el módulo elástico de 270 – 950 [GPa]. Este comportamiento especial lo hace atractivo para su uso como fibra de refuerzo [18].

3.2.4. Fabricación

En todos los procesos de síntesis de los NTC, el mecanismo mediante el cual se generan opera en dos pasos: primero, carbono molecular (C_2) se forma rápidamente en la superficie de un catalizador, adoptando la forma de varillas microscópicas metaestables, para posteriormente ocurrir una grafitización de aquellas estructuras, es decir, su ordenamiento atómico cambia y pasa a adoptar la estructura del grafeno (red hexagonal donde cada átomo de carbono está unido a otros 3 por enlaces covalentes) [5]. Existen varios métodos para la fabricación de los NTC, como la vaporización por energía solar [19] o el método de antorcha de plasma [20], pero hay tres de éstos que son los más usados: descarga de arco [18], ablación láser [17] y deposición química de vapor (DQV) [21].

- Descarga de arco: inicialmente usado para producir fulerenos, es la forma más sencilla y común de producir NTC, además de ser la primera forma en que se produjeron. Esta técnica produce muchas impurezas, como hollín que contiene carbono amorfo y fulerenos, además, el proceso debe interrumpirse constantemente para poder retirar regularmente los NTC formados.

El proceso consiste en introducir un gas inerte a un reactor generando una atmósfera inerte a una presión controlada. Dos barras de grafito separadas por 1[mm] constituyen los electrodos, y entre éstas se impone un potencial eléctrico de entre 30 y 35[V]. Los electrodos se acercan y la descarga de 100[A] ocurre, formándose plasma a 4000[K] y un gas de carbono sublimado [5]. La zona donde se forman los NTC en base al carbono sublimado es el electrodo negativo (cátodo) mientras que el electrodo positivo (ánodo) es consumido en el proceso. Para obtener NTC de pared simple, un catalizador metálico es añadido junto al grafito, en forma de una mezcla de nanopulvo grafitico y metálico que es introducida en perforaciones del ánodo, y en este caso los NTC se depositan en las paredes del reactor en forma de hollín [18], como puede apreciarse en la figura 3.8. Para obtener NTC de pared múltiple se puede prescindir del catalizador e inclusive se puede realizar a atmósfera abierta [5], reduciendo los costos y complejidad del proceso sin merma del resultado.

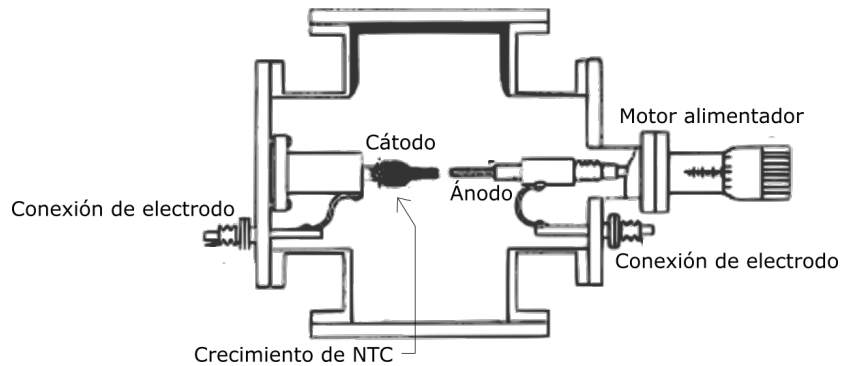


Figura 3.8: Esquema de funcionamiento del método de descarga de arco para fabricación de NTC [17].

- Ablación láser: En este proceso una pieza de grafito, que puede contener particulado de níquel y cobalto en calidad de catalizadores, es sublimada por acción de un láser dentro de un horno cilíndrico a 1200°C con una atmósfera inerte [18]. El hollín generado contiene NTC y es recolectado en un tubo de cuarzo a baja temperatura [17], como puede verse en la figura 3.9. Es el mejor método, en términos de calidad, para fabricar NTC de pared simple [5].

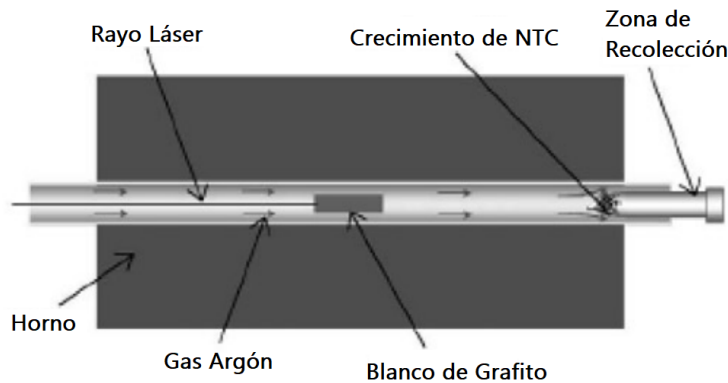


Figura 3.9: Esquema de funcionamiento del método de ablación láser para fabricación de NTC [17].

- Deposición química de vapor: Se calienta un catalizador a alta temperatura ($500\text{-}1000^{\circ}\text{C}$) en un horno tubular con atmósfera inerte, haciendo pasar hidrocarburos por el horno en un lapso regular de tiempo. El calor y la presencia de catalizadores permite la disociación del hidrocarburo, generándose hidrógeno y carbono. Luego el carbono precipita en un sustrato de nanopartículas de metal (cobalto, níquel, hierro, molibdeno)[5], formándose gracias a la acción nucleadora [18] de éstas los NTC. Los parámetros que influyen en el desempeño del proceso son la temperatura del horno, la presión de operación, volumen y concentración del hidrocarburo, tamaño de las nanopartículas de metal (dictan el diámetro de los NTC), calidad del catalizador y tiempo de reacción [21]. Sometidos a altas temperaturas y en presencia de nanopartículas de metal en el sustrato, se forman NTC de pared simple, mientras que a bajas temperaturas, en presencia, e incluso en ausencia de nanopartículas de metal en el sustrato se forman NTC de pared múltiple [17]. Este proceso ofrece mejor control sobre la alineación, diámetro y largo de los NTC [18, 22], además de ser más económico de realizar a gran escala que los métodos anteriormente señalados de fabricación [5].

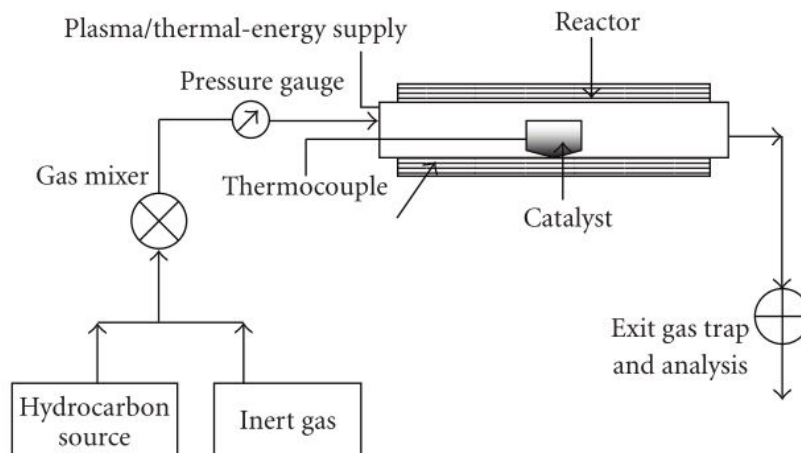


Figura 3.10: Esquema de funcionamiento del método de deposición química de vapor para fabricación de NTC [23].

3.2.5. Aplicaciones de los nanotubos de carbono

Producto de su reciente descubrimiento -menos de 30 años-, los efectos de sus propiedades físicas y mecánicas en diversos procesos se siguen estudiando, así como su interacción con otros materiales. No obstante lo anterior, el interés en diversas áreas ha sido patente, entregándolos a algunos de los siguientes usos:

- **Sensores:** la presencia de ciertos gases o líquidos puede cambiar la resistividad de los NTC ante la corriente eléctrica, y de esa manera pueden indicar la presencia y concentración de diversas sustancias. Su buena conductividad y estabilidad química puede hacer que electrodos de sensores eléctricos sean más certeros, más estables químicamente y de respuesta más rápida que los tradicionales. Este principio también puede servir para medir la presión de un sistema gaseoso, permitiendo detectar NO_2 , NH_3 , O_2 [17]. Diversas sustancias orgánicas también pueden ser identificadas gracias a esto, entre las cuales se pueden mencionar enzimas, glucosa, hemoglobina, agua oxigenada, ácido ascórbico, dopamina o colesterol [22]. El ámbito de los sensores no se restringe a los de tipo electroquímico, sino también piezoeléctricos, pues al enlongarse, torcerse o flectarse, un NTC cambia su resistividad, de igual manera que un *strain gauge* [17].
- **Transporte y adsorción de sustancias:** los NTC pueden transportar sustancias, incluso de interés biológico. Éstos pueden contener drogas o sustancias antígenas, además de sustancias "gatillo", que permiten que las primeras sean liberadas ante ciertos eventos, como la presencia de determinados transportadores celulares, enzimas, pH, etc [21]. También se destaca la capacidad de los NTC de adsorber, incluso, metales pesados, algunos hidrocarburos y otras sustancias contaminantes [24]. Esta capacidad se debe a su gran área superficial respecto de su peso, su estructura nanométricamente porosa y a su naturaleza covalente [5]. Por esto es también atractivo usarlos como sustratos almacenadores de gases o líquidos, como hidrógeno para baterías.
- **Electricidad:** no sólo por la adsorción antes mencionada, sino además por sus propiedades conductoras es que se explora la introducción de NTC en baterías de plomo como un reemplazo del

carbón. También se han fabricado condensadores con capacitancias 3 o 4 veces superiores a los actualmente disponibles en el mercado, además de usarse como superconductores, soportando corrientes del orden de $10^9[\text{A}/\text{cm}^2]$ [17]. Esta misma cualidad, sumado a su estabilidad térmica lo hace atractivo como material de emisión de campos, por ejemplo, reemplazando el mercurio en diversas lámparas de emisión de rayos X, tanto domésticas como industriales o médicas.

- Materiales compuestos: las especiales características mecánicas y eléctricas que poseen los NTC los hacen muy atractivos como fibras de refuerzo para materiales compuestos, ya sea de matriz polimérica, cerámica [18] o metálica [25]. No sólo se busca mejorar las propiedades mecánicas de la matriz, sino que se pueden obtener mejoras en conductividad eléctrica o térmica [17]. A modo ilustrativo: en polímeros, el reforzamiento con NTC genera aumentos de entre un 30 y 70 % en la resistencia en tracción y en el módulo de corte [18], mientras que en otros trabajos [25] se señala un aumento de entre 2 y 3 veces en la dureza de una aleación de aluminio al reforzarla de esta manera, y por último se reporta que con tan sólo usar un 0.05 % en masa de NTC rellenos de cobre, aumenta la resistencia a la compresión en un 70 % para un tipo de concreto, además de reducirse en un 10 % su conductividad térmica y su porosidad [26].

Son estos datos los que permiten visualizar las grandes mejoras que la incorporación de los NTC representan para las diferentes industrias de los materiales compuestos. Sin embargo, como ya se menciona, su escaso desarrollo investigativo obliga a determinar cómo reaccionarán éstos en los diversos procesos y cómo interactúan con distintas matrices.

En vista de estos antecedentes, en este trabajo se usan NTC de pared múltiple, con un módulo de Young de 680 GPa, y una relación de Poisson de 0.27, con un radio interior de 15[nm] y exterior de 35[nm], de $1[\mu\text{m}]$ de largo, formado por 18 capas de grafeno -en concordancia con las investigaciones precedentes en este ámbito [14, 27]-, para determinar los efectos en las propiedades mecánicas que la reacción entre la aleación de aluminio fundida y el refuerzo de NTC genera en el material compuesto durante el proceso de fabricación por *Squeeze Casting*, a tratar a continuación en la sección 3.3 .

3.3. Fundición por presión o *Squeeze Casting*

La fundición es una de las formas más económicas que se conocen para convertir un material bruto en piezas listas para usarse [28], además de ser uno de los procesos más antiguos conocidos por el hombre para darle forma a los metales [2, 29]. La fundición consiste en vaciar un metal fundido dentro de un molde para que éste llene todas sus cavidades, enfríe, y genere una pieza sólida [29], pudiéndose o no perder el molde mismo en el proceso. Este proceso incluso en la modernidad no está libre de efectos indeseados en las piezas generadas, como porosidad y distribución desigual del material.



Figura 3.11: Ejemplos de piezas manufacturadas mediante *Squeeze Casting* [30].

Una forma de morigerar esos efectos indeseados es la fundición por presión o moldeo por presión (*Squeeze Casting*), que consiste en promover la solidificación del metal mediante presión externa usando moldes reutilizables [28]. Mediante esta técnica se manufacturan componentes de alta calidad, pudiendo incorporar o no diferentes tipos de refuerzos al material fundido. Un refuerzo ampliamente utilizado es el polvo de *carborundum*, *carborundo* [3] o Carburo de Silicio, en diversos tamaños. Hay interés en utilizar NTC como refuerzo por sus especiales cualidades. En cuanto a los metales usados como matriz se encuentran ampliamente difundidos el aluminio y el magnesio, con los que se fabrican componentes para la industria aeronáutica y automovilística, además de artículos para deportes de alto rendimiento. Por último, el metal más utilizado para fungir de molde es el acero H13 para trabajos en caliente [31]. Ejemplos de piezas manufacturadas por este proceso pueden apreciarse en la figura 3.11.

3.3.1. Proceso de *Squeeze Casting*

El proceso de la fundición por presión se puede describir mediante los siguientes pasos generales. La numeración de los pasos está basada en la figura 3.13.

1. Una cantidad predefinida de metal fundido se vierte o inyecta dentro un molde, el cual debe estar precalentado a cierta temperatura dependiendo del metal y de la microestructura que se desee.

2. Mediante una prensa hidráulica o una bomba, se procede a presurizar el metal fundido al interior del molde.
3. Se sostiene la presión hasta la solidificación completa del metal fundido y se retira una de las caras del molde.
4. El componente solidificado es empujado fuera del molde y éste puede volver a utilizarse.

3.3.2. Tipos de *Squeeze Casting*

Existen 2 métodos distinguibles para realizar fundición por presión o *Squeeze Casting*, según se aprecia en la figura 3.12.

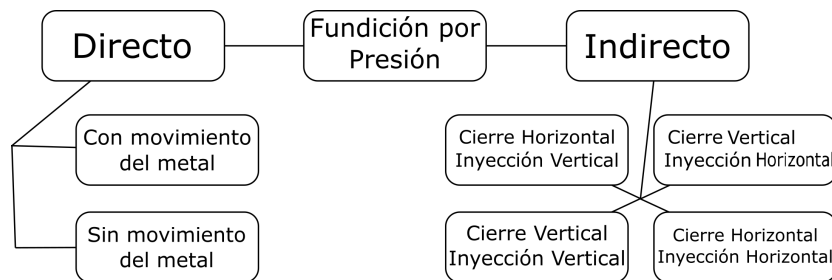


Figura 3.12: Diferentes procesos de fundición por presión, adaptado de [28].

- Método directo: la presión se aplica a través de la cara del molde que no contiene inicialmente el metal fundido (tapa). A su vez, dentro de este método se distinguen dos situaciones: cuando existe movimiento del metal en el interior del molde y cuando no existe dicho movimiento. Esto depende de si la tapa del molde posee relieve o no, como se evidencia en la figura 3.13.

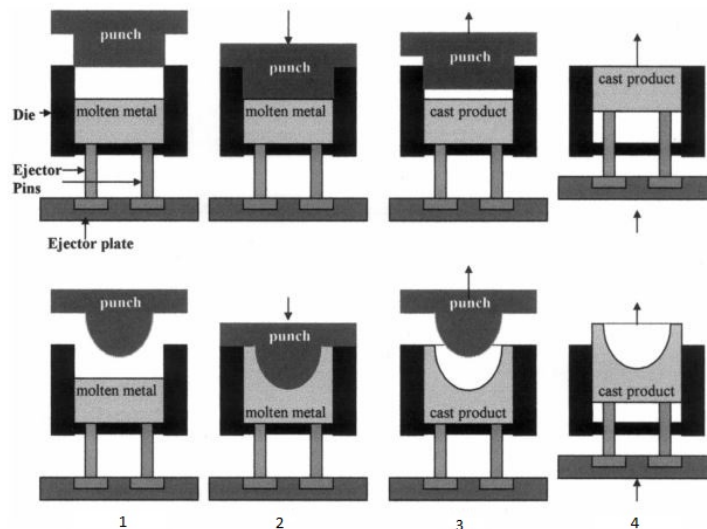


Figura 3.13: Etapas del proceso de *Squeeze Casting* directo: fila superior, sin movimiento de metal, fila inferior, con movimiento del metal [28].

- Método indirecto: la presión se aplica al metal fundido mediante una bomba o inyector que lo empuja dentro del molde, el cual se encuentra inicialmente cerrado. Se pueden identificar 4 formas de proceder en el método indirecto, basado en la posición del inyector del metal fundido respecto de la orientación en que se abre el molde. Esto puede apreciarse en la figura 3.14, donde se muestra el método de inyección vertical y cierre horizontal.

El *Squeeze Casting* directo con movimiento del metal ocurre cuando éste, al ser vertido dentro del molde, no llena todas sus cavidades. Esto se da especialmente cuando dichas cavidades se ubican en la cara del molde encargada de ejercer la presión (tapa). La presión ejercida en la etapa sucesiva mediante el molde permite que el metal fundido se desplace para alcanzar dichos lugares que aún no habían sido "mojados" por él, como se puede apreciar en la fila inferior de la figura 3.13.

El *Squeeze Casting* directo sin movimiento del metal ocurre cuando el metal, al ser vertido, y antes de ejercer la presión propia del proceso, ya ha adoptado la forma final que tendrá una vez sólido. En este caso la presión no desplazará metal, sino sólo será un agente bajo el cual se promueve su solidificación, como se puede apreciar en la fila superior de la figura 3.13.

El *Squeeze Casting* indirecto se subclasifica de 4 maneras. En el primer tipo, el molde dispone de sus mitades de forma sagital (cierre horizontal) mientras que la inyección del metal fundido se da de forma vertical, como se muestra en la figura 3.14. Los pasos del proceso, como se muestran en dicha figura, son de izquierda a derecha: carga del metal fundido, acomodo del inyector y cierre del molde, llenado del molde y presurización del metal.

En el segundo tipo de *Squeeze Casting* indirecto el molde consta de 2 partes dispuestas en mitades transversales (cierre vertical) y la inyección del metal fundido se da de forma vertical.

En el tercer tipo de *Squeeze Casting*, el molde consta de sus mitades dispuestas en forma sagital (cierre horizontal) y la inyección ocurre de forma horizontal también. Estos procesos pueden apreciarse en la figura 3.15.

Finalmente, el último tipo de *Squeeze Casting* indirecto consta de disponer las mitades del molde en forma transversal (cierre vertical) y la inyección del metal sucede de forma horizontal.

Los métodos indirectos de *Squeeze Casting* presentan ciertas ventajas al ser realizados de forma vertical con inyección del metal fundido en contra de la gravedad. El control del proceso es más preciso al depender en sí sólo de la velocidad y presión de inyección [32]. También se promueve que, de formarse óxido en el metal fundido, éste esté ubicado directamente en la pared del molde, lo cual tiene como efecto proteger el molde del contacto directo con el metal fundido, además de evitar que este óxido se mezcle con el metal mismo.

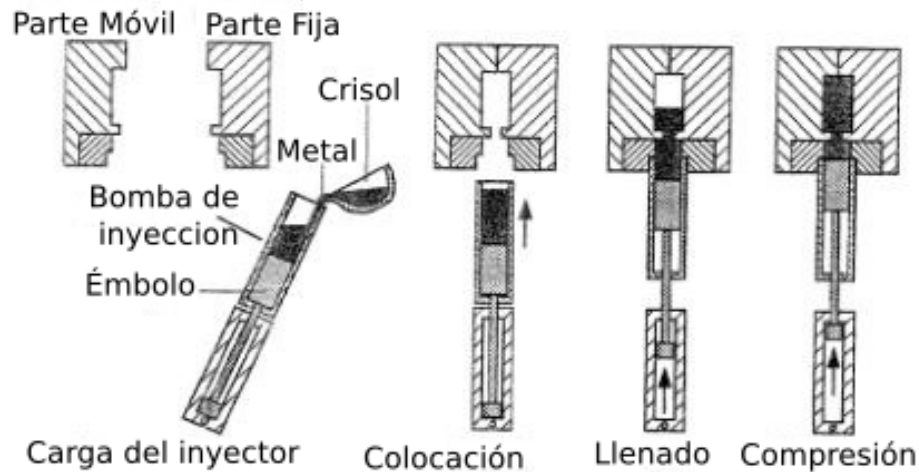


Figura 3.14: Diagrama esquemático que muestra la operación típica de moldeo por presión indirecto, de inyección vertical por pistón y cierre horizontal del molde [28].

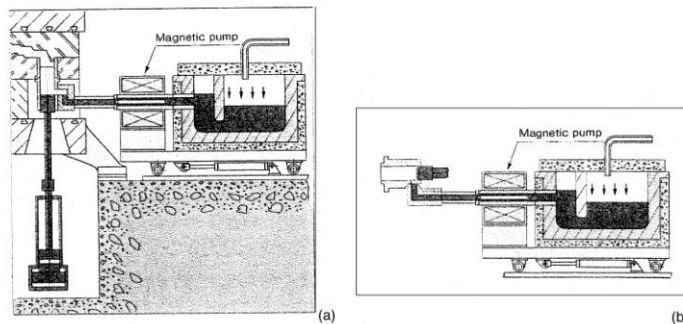


Figura 3.15: Diagrama esquemático de la máquina de moldeo LEOMACS, diseñado por Toshiba. (a) molde de cierre vertical e inyección vertical, (b) molde de cierre horizontal e inyección horizontal [28]. En estos modelos, el inyector no es el encargado de ejercer la presión sobre el metal fundido.

3.3.3. Mojabilidad en el *Squeeze Casting*

Se dice que un líquido moja a un cuerpo sólido cuando es susceptible de extenderse sobre él y dejar una traza [33]. Una forma de medir la mojabilidad es considerar el ángulo que adopta la superficie del líquido dentro de un tubo delgado: si dicha superficie es cóncava, se dice que es muy mojado; por el contrario, si es convexa, se dice que no es mojado. Este comportamiento, que puede apreciarse en la figura 3.16, depende de las atracciones que sufre la superficie del líquido, tanto con las moléculas del interior de éste como con las moléculas de la superficie del cuerpo sólido. Otra forma de medir la empapabilidad o mojabilidad es considerar el ángulo que adoptan las zonas de contacto de las gotas de un líquido sobre una superficie (cuerpo) totalmente plano y recto. Mientras más pequeño

sea el ángulo respecto de la horizontal, considerando dicho ángulo medido desde el interior de la gota, se dice que ese líquido sobre dicha superficie es más "mojador".

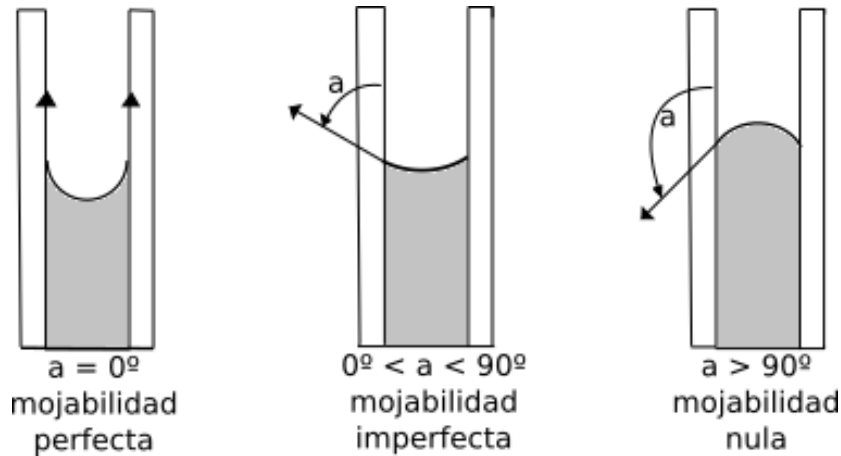


Figura 3.16: Capilaridad de un fluido en un tubo, muestra patente de la mojabilidad, extraído de [33].

Este fenómeno está íntimamente ligado con la tensión superficial, al punto que diversos factores que la alteran, como presión, temperatura o solutos, también afectan la mojabilidad.

En el contexto del *Squeeze Casting*, la mojabilidad que presenta un refuerzo o un elemento aleante sumergido en el metal fundido influye fuertemente en la cohesión entre la matriz metálica y dichos agregados [28]. Esta cohesión entre refuerzo y matriz es el mecanismo por el cual la matriz transfiere solicitaciones mecánicas a la fibra [34, 35], permitiendo mezclar las ventajas de diferentes materiales.

3.3.4. Ventajas del *Squeeze Casting*

Entre las ventajas más importantes que presenta el *Squeeze Casting* respecto de la fundición tradicional se pueden mencionar [3]:

- Las piezas fabricadas presentan muy baja porosidad a causa de nucleación de gas durante su enfriamiento.
- Las piezas fabricadas no presentan contracciones debido al enfriamiento.
- Las piezas presentan muy poco encogimiento, abierto o cerrado (*shrinkage*, figura 3.17).
- No ocurre desperdicio de material, al ser un metal fluido que se someterá a presión, se vierte sólo la cantidad que es necesaria.
- El uso de presión incrementa la mojabilidad de los elementos que se desee agregar al metal, ya sea para generar una aleación o un material compuesto de matriz metálica.
- De igual forma, la presión ayuda a una dispersión homogénea de estos aditivos.
- La fluidez del metal fundido se torna no crítica gracias al uso de la presión.

- Se obtiene una calidad superficial superior debido al perfecto contacto entre el metal fundido y el molde.

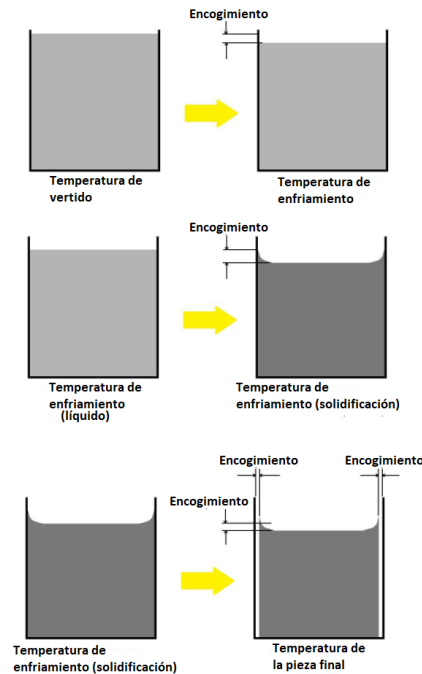


Figura 3.17: Esquema que muestra diferentes fases del encogimiento de un metal fundido, extraído y adaptado de [36].

Las ventajas antes mencionadas se deben a la física del proceso del *Squeeze Casting* y sus efectos en la microestructura de las piezas fabricadas, efectos que se ven promovidos por los elementos aleantes o refuerzos que se decida incluir en el metal base.

El gran agente que diferencia a este tipo de *casting* de otros es la presión, que a su vez desencadena todas las diferencias y efectos en la microestructura del material resultante. Este efecto se puede resumir en una microestructura de grano muy fino [3, 28].

Dos fenómenos ocurren simultáneamente que explican esta refinación. Por una parte, una gran transferencia de calor se logra al aplicar presión, la cual retira el aire en torno a la pieza. Se logra así que el molde exista como único agente de transferencia de calor, mejorando la tasa de enfriamiento (*heat transfer undercooling*). El otro fenómeno generado por la aplicación de presión es el aumento de la temperatura de fusión del metal fundido (ley de Clausius–Clapeyron), lo cual aumenta la temperatura de cristalización. Eso causa un aumento en la nucleación de los granos del metal, generándose granos más finos (*pressure undercooling*) [28].

El metal fundido al ser comprimido aumenta ligeramente su temperatura. Si se realiza la compresión del metal fundido a una temperatura superior a la de fusión afecta al fenómeno de *pressure undercooling*, entonces el fenómeno predominante es el *heat transfer undercooling*. Si se realiza la compresión del metal fundido en el rango de temperatura de fusión afecta al fenómeno de *pressure undercooling*, entonces éste sí es un mecanismo de mayor predominio. Independiente del mecanismo

responsable de la refinación del grano, el efecto de la presión en el proceso de cristalización y formación de grano es muy patente [28]. Puede observarse en la figura 3.18 que el aumento en la presión de trabajo genera microestructuras más homogéneas y con menos porosidad.

La presión también mejora la mojabilidad de los refuerzos o aleantes, además de aumentar la solubilidad de los gases y las impurezas en el metal fundido. La mejora de mojabilidad tiene como resultado que la fuerza cohesiva entre la matriz metálica y el refuerzo aumente, condición que es deseable en un material compuesto. La mejora en la solubilidad antes mencionada implica una microestructura más homogénea y menor presencia de porosidad debido a gases que escapen del metal fundido en enfriamiento [3].

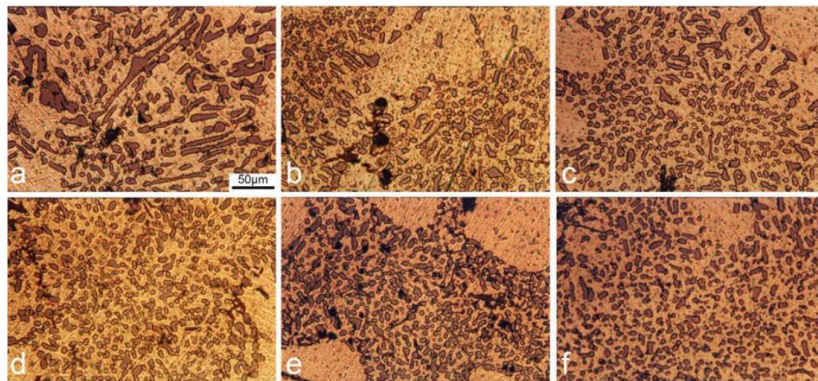


Figura 3.18: Efecto de la presión externa en la morfología de las partículas de silicio eutéctico para la fundición por presión de la aleación 'Aluminio LM13' para temperatura de metal fundido de 730°C y temperatura de molde de 200°C: (a)0 MPa, (b)20 MPa, (c)53 MPa, (d)106 MPa, (e)171 MPa, (f)211 MPa [3].

Debido al fenómeno de *undercooling* el tiempo de contacto entre la matriz de aluminio fundido y los refuerzos se reduce significativamente. Esto reduce la posibilidad de reacción química entre el metal matriz fundido y los refuerzos [3], sin embargo no previene por completo su ocurrencia [14]. Así mismo, la presión ayuda a la correcta infiltración de los refuerzos en el metal fundido y la dispersión de éstos en su interior. Se debe destacar que los refuerzos en esta situación además fungen como promovedores de la nucleación de los granos cuando ocurre el enfriamiento del metal y su cristalización. Mientras más pequeño el refuerzo, existe mayor área de contacto entre él y el metal matriz, por ende se tiene un aumento de las zonas donde se inicia la nucleación de los cristales. Esto tiene como efecto una alta homogeneidad a nivel microestructural. Partículas reforzantes más pequeñas implican también espacios libres más pequeños entre ellas. Dado que son fuentes de nucleación, éstas brindan más restricciones al crecimiento del grano durante el enfriamiento. Esto tiene como efecto restringir la deformación plástica del metal durante la deformación en frío; contribuye a un aumento de la resistencia de la aleación [3] (el tamaño del grano está íntimamente relacionado con las características mecánicas finales del material).

Los parámetros óptimos del proceso de *Squeeze Casting* para la aleación de aluminio Al-12wt %Si son:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Presión	100	MPa
Tamaño Refuerzo	15-30	nm
Temperatura del molde	250	°C
Temperatura Metal	600-700	°C
Tiempo de Presión	60	s

Tabla 3.4: Parámetros óptimos para realizar fundición por presión sobre aluminio.

3.4. Materiales compuestos

3.4.1. Tipos de materiales y los materiales compuestos

Antes que todo, es necesario definir qué es un material compuesto y para ello, entender cómo se agrupan los materiales sólidos a grandes rasgos. Según la figura 1.1, se pueden categorizar como está indicado en la tabla 3.5.

Clasificación	Material
Metales	Hierro y Acero
	Aluminio
	Oro
	Cobre
	Litio
Polímeros	Maderas y fibras naturales
	Resinas y Gomas
	Nylon
	Epóxicos
	Policloruro de Vinilo (PVC)
Cerámicos	Rocas y Pedernal
	Arcillas
	Cementos
	Vidrios
	Refractarios (Al_2O_3 y SiO_2)
Compuestos	Adobe
	Papel
	Hypalón
	Fibra de Vidrio
	Kevlar 49

Tabla 3.5: Clasificación de los materiales sólidos [1].

Un material compuesto puede ser considerado como un material consistente en 2 o más constituyentes químicamente diferentes, existiendo interfaces que los separan, donde cada componente ofrece diferentes propiedades físicas, las que pueden ser mezcladas sinérgicamente [34, 35, 37], de manera de lograr una combinación óptima de características [35]. En un material compuesto existe un constituyente que actúa como matriz, mientras los demás constituyentes actúan como elementos resistentes o refuerzos [38], conociéndose también por el nombre de fase dispersa. Los refuerzos son usualmente más duros y resistentes que la matriz [34]. La matriz cumple con el objetivo de mantener a los refuerzos unidos y en una posición u orientación dada, de forma tal que ésta distribuya las sollicitaciones a través de estos refuerzos [39]. Éstos terminan siendo los agentes resistentes ante la sollicitación del material. Las características de estos materiales dependen de las propiedades de sus constituyentes, pero también de sus cantidades relativas, la dispersión del refuerzo, la geometría del refuerzo y la unión entre el refuerzo y la matriz [35].

3.4.2. Clasificaciones de los materiales compuestos

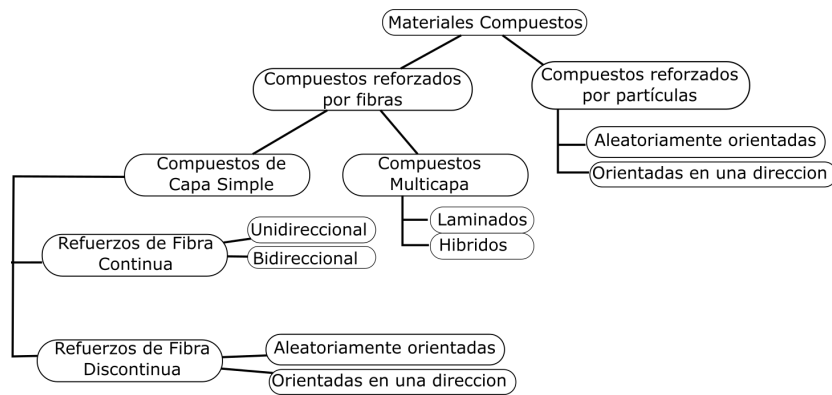


Figura 3.19: Clasificación de materiales compuestos [34].

Existen otras clasificaciones además de la expuesta en la figura 3.19 para agrupar los materiales compuestos, sin ser excluyentes entre sí. Se ha propuesto una forma de clasificar los materiales compuestos según la geometría del refuerzo en dispersión [35]:

- Refuerzos de partículas: en este caso, el refuerzo está compuesto por partículas equiaxiales (dimensiones semejantes en toda dirección). Se distinguen los casos de partículas grandes y pequeñas.

En caso de las partículas grandes, éstas actúan a macroescala, siendo como refuerzo más duras y resistentes que la matriz que las contiene. Estas partículas restringen el movimiento de la matriz, quien transfiere las solicitaciones al refuerzo, siendo crítica para esta transferencia la calidad de la unión entre ambos. Siempre que las partículas estén uniformemente distribuidas en la matriz, la elasticidad del compuesto puede ser aproximada por la Regla de las Mezclas.

En el caso de partículas pequeñas, el refuerzo trabaja a nivel de la microescala, donde la matriz resiste la mayor parte de la sollicitación mientras que los refuerzos impiden las dislocaciones que conducen al agrietamiento del material, mejorando la dureza y resistencia a cambio de pérdida de ductilidad.

Las partículas pueden ser esféricas, cuasiesférica o pueden tener forma de cristales planos muy pequeños con alto grado de perfección cristalina (hojuelas).

Como ejemplos de materiales compuestos de partículas grandes se pueden mencionar el cermet, el caucho vulcanizado y el concreto. Como ejemplo de materiales compuestos de partículas pequeñas se puede mencionar el níquel con óxido de torio en dispersión.

- Refuerzos laminados: se disponen capas laminadas de materiales de baja densidad, generalmente orientando cada capa a 90° respecto de la anterior, formando por pegado placas de alta rigidez y ligeras, en forma semejante al contrachapado. Un caso de material laminado corresponde al vidrio laminado, donde se alternan capas de vidrio con capas de plástico (butiral de polivinilo, etilvinilacetato, por ejemplo). Otro tipo de materiales laminados son los denominados *sandwich*, donde se tiene un núcleo de bajo modulo elástico y blando, usualmente un polímero, un arreglo de celdas vacías o una espuma, cubierto de un material duro, como aluminio o acero. Otro caso

de materiales de este tipo son los bimetales, muy usados como termostatos [40], aunque también se usan en forma de alambres recubiertos, donde un metal envuelve a otro (cobre envolviendo aluminio, cobre envolviendo acero).

- Refuerzos de Fibra: separados a su vez en fibra corta y fibra larga, constituyen unos de los refuerzos más ampliamente utilizados. La fortaleza de estos compuestos no depende sólo de las características de la fibra y la matriz, sino también de la adhesión entre ambos, el largo de la fibra, la continuidad o discontinuidad de la fibra, orientación y la distribución de la misma en la matriz. La fibra puede ser entre 25 y 50 veces más resistente que la matriz [41].

En el ámbito del largo, las fibras pueden ser largas o cortas, continuas o discontinuas. En el ámbito de la orientación, hay dos extremos de distribuciones: alineamiento paralelo en una misma dirección del eje longitudinal de las fibras, y arreglo totalmente aleatorio. Bajo ciertas consideraciones, la elasticidad y resistencia de los compuestos reforzados por fibras pueden ser aproximadas mediante la Regla de las Mezclas.

Las fibras son policristalinas o amorfas, poseen pequeños diámetros y pueden ser cerámicas o poliméricas. Se mencionan como ejemplos el kevlar 49, el carburo de silicio, el óxido de aluminio, la fibra spectra 900 y los NTC.

Otro criterio de clasificación de materiales compuestos según el tipo de matriz constituyente distingue entre las cerámicas, metálicas y poliméricas [35]. En el caso de las matrices de metal y polímero, se espera cierta ductilidad o flexibilidad de parte del material compuesto gracias al refuerzo, mientras que en el caso de las matrices cerámicas el refuerzo cumple, a escala microscópica, la labor de evitar el agrietamiento. Sea cual sea la matriz, sus funciones son las siguientes:

- Unirse fuertemente al refuerzo conservando su ordenamiento, con el fin transmitirle a éste las sollicitaciones. La calidad de esta unión es crítica para las propiedades del material compuesto.
- Proteger a los refuerzos de daño químico o mecánico del ambiente.
- La matriz, al ser más dúctil, menos dura y de menor módulo elástico que el refuerzo, mantiene separadas dichas partículas reforzantes, previniendo la propagación de fallas frágiles de un refuerzo a otro.

3.4.3. Regla de las mezclas

La regla de las mezclas clásica aproxima el comportamiento de materiales compuestos atendida a ciertas premisas señaladas por [41]:

- En cada volumen infinitesimal del compuesto participan un conjunto de sustancias componentes.
- Cada componente contribuye al comportamiento del compuesto en la misma proporción que su participación volumétrica, esto implica una distribución homogénea de todas las sustancias en cada punto del compuesto.
- Todos los componentes poseen la misma deformación, esto implica que la unión entre refuerzo y matriz debe ser perfecta: no deben existir deslizamientos entre ellas.

- El volumen ocupado por cada componente es mucho menor que el volumen total del compuesto.

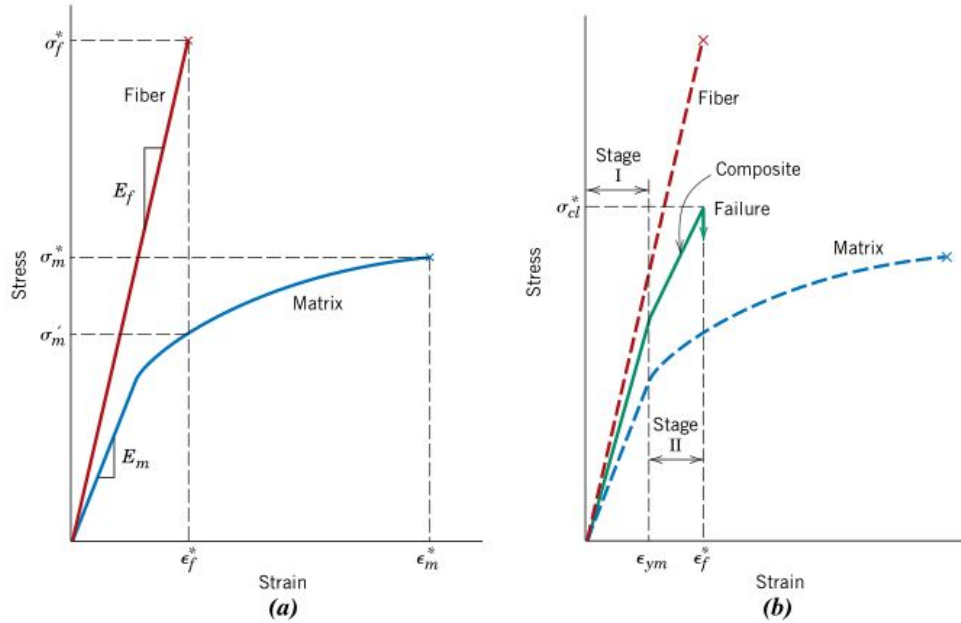


Figura 3.20: (a)esquema del diagrama esfuerzo-deformación para una fibra frágil y una matriz dúctil, donde se señalan los esfuerzos y deformaciones de fractura de ambos. (b)esquema del diagrama esfuerzo-deformación para un material compuesto de fibras alineadas paralelamente que es expuesto a una carga uniaxial en dirección longitudinal del alineamiento del refuerzo, donde las curvas de (a) se muestran superpuestas [35].

Considerando que se aplica una fuerza en forma longitudinal sobre un material compuesto (longitudinal respecto del refuerzo largo y continuo que contiene el material compuesto), se puede suponer que cada constituyente (matriz y fibras) aporta resistiendo cierta cantidad de la sollicitación que un material compuesto recibe [35]. La fuerza que el material soporta equivale al esfuerzo de la sollicitación distribuido en el área resistente del material, $F = \sigma * A$. Por tanto la fuerza que soporta el compuesto (F_c) se puede descomponer en la fuerza que soporta la matriz (F_m) más la fuerza soportada por la fibra (F_f). Aquel razonamiento conduce a:

$$F_c = F_m + F_f \rightarrow \sigma_c * A_c = \sigma_m * A_m + \sigma_f * A_f$$

donde A_c corresponde a la sección resistente del compuesto, y σ_c al esfuerzo al que esa sección del compuesto está sometida. Los subíndices m y f denotan matriz y fibra respectivamente. Si la fibra es igual de larga que la matriz, entonces la razón $\frac{A_m}{A_c}$ equivale a la fracción volumétrica de matriz (V_m) y $\frac{A_f}{A_c}$ a la fracción volumétrica de fibra (V_f):

$$\sigma_c = \sigma_m * \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f * \frac{A_f}{A_c} \rightarrow \sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f$$

lo que significa que el esfuerzo producto de la sollicitación del material es resistido según la fracción volumétrica de cada constituyente del material compuesto. Si se considera la deformación del material

compuesto (ϵ_c) y la segunda premisa de la regla de las mezclas, se tiene que todos los componentes del compuesto poseen la misma deformación ($\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$). Además, se debe recordar que la suma de las fracciones volumétricas de todos los constituyentes del material compuesto es igual a uno ($V_f + V_m = V_c = 1$). Recordando también que la constante elástica de un material se puede expresar como el esfuerzo sobre la deformación ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$), se puede obtener una expresión para la constante elástica del material compuesto (E_c), dividiendo toda la expresión anterior por un 'uno conveniente' (ϵ_c):

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_c} * V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_c} * V_f \rightarrow \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} * V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} * V_f$$

$$E_c = E_m * (1 - V_f) + E_f * V_f \quad (3.1)$$

donde E_m y E_f corresponden a la constante elástica del material matriz y de la fibra de refuerzo, respectivamente. Respecto a la resistencia longitudinal (σ_{cl}^*) del compuesto idealizado en este punto, y atendiendo a las deformaciones y esfuerzos señalados en la figura 3.20, se señala que:

$$\sigma_{cl}^* = \sigma'_m * (1 - V_f) + \sigma_f^* * V_f \quad (3.2)$$

Un compuesto, como el idealizado en esta sección, puede ser cargado en forma transversal respecto de la orientación de sus fibras continuas. En esta situación se asume que todas las fases están sometidas al mismo esfuerzo ($\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$). Considerando que $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ se tiene la siguiente relación, en donde E_{ct} es el módulo elástico trasnversal del material:

$$\epsilon_c = \epsilon_m * V_m + \epsilon_f * V_f \rightarrow \frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} * V_m + \frac{\sigma}{E_f} * V_f$$

Recordando que $V_f + V_m = V_c = 1$ y reordenando se tiene la siguiente relación:

$$E_{ct} = \frac{E_m * E_f}{((1 - V_f) * E_f + E_m * V_f)} \quad (3.3)$$

3.4.4. Refuerzo por fibras

En la sección 3.4.2 se mencionaron algunos detalles de las fibras como refuerzo, siendo las posibilidades que ofrecen bastante amplias. Las fibras pueden agruparse en continuas o discontinuas, largas o cortas, paralelamente alineadas o aleatoriamente orientadas [35]. En cada uno de estos casos las fibras influirán de manera diferente sobre las propiedades finales del material compuesto.

Se define el largo crítico (L_C) de una fibra como:

$$L_c = \frac{\sigma_f d}{2t_c} \quad (3.4)$$

donde σ_f es la tensión de rotura de la fibra, t_c es la tensión de corte de de la matriz o de la interfaz entre matriz y refuerzo (la más pequeña de ambas), y d es el diámetro de la fibra. Se considera a las fibras 15 veces más largas que L_C como fibras continuas, sino son discontinuas.

Al momento en que la matriz solicita a la fibra, en la medida que ésta es más corta deja de cumplirse la tercera premisa de la regla de las mezclas [41]. Para la fibra larga se tiene el mismo estado de deformaciones en la matriz y la fibra, la tensión en la fibra no varía salvo en los extremos donde la deformación de la fibra es menor que la de la matriz. Esto causa una concentración de tensiones en el compuesto. Mientras más corta sea la fibra, más preponderante se torna este fenómeno de los extremos en la fibra completa. L_C es la longitud mínima de la fibra para garantizar igual deformación en fibra y matriz. Fibras de menor largo que éste no participan plenamente del mecanismo de refuerzo, pierden su eficacia como tales. En función de lo anterior se pueden identificar las siguientes combinaciones de factores:

- Fibra continua, larga y orientada paralelamente: Genera comportamientos altamente anisotrópicos en los materiales compuestos. El comportamiento discutido en la sección 3.4.3 aplica para este tipo de refuerzo.
- Fibra corta, discontinua, orientada paralelamente: Las fibras discontinuas generan menor transferencia de la carga desde la matriz. La resistencia longitudinal (σ_{cd}^*) para los compuestos de este tipo cuya fibra sea de largo L superior a L_C es, atendiendo a la figura 3.20:

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* * V_f * (1 - \frac{L}{2 * L_c}) + \sigma_m^* * (1 - V_f) \quad (3.5)$$

Si el largo de la fibra L es inferior a L_C , se tiene, siendo d el diámetro de la fibra y w el mínimo entre la resistencia en corte de la unión fibra-matriz y la resistencia en corte del material matriz, que la resistencia (σ_{cd}^*) es:

$$\sigma_{cd}^* = \frac{L * w}{d} * V_f + \sigma_m^* * (1 - V_f) \quad (3.6)$$

- Fibra corta aleatoriamente orientada, homogéneamente distribuida: la constante elástica del compuesto (E_{cd}) puede ser aproximada mediante reglas empíricas de la siguiente manera:

$$E_{cd} = K * E_f * V_f + E_m * (1 - V_f) \quad (3.7)$$

donde K es un parámetro de eficiencia del refuerzo [35]. Si la fibra es paralela y la sollicitación también lo es, $K = 1$, pero si la sollicitación es perpendicular, $K = 0$. Para una fibra corta, aleatoriamente orientada y uniformemente distribuida, con sollicitación en cualquier dirección, $K = 0,2$.

3.4.5. Usos de los materiales compuestos

En cuanto al uso de los materiales compuestos se pueden mencionar a la industria automotriz, como material para reemplazar piezas que antes fueran de metal, como discos de frenos (fibra de carbono), carrocerías (fibra de vidrio) o neumáticos; mientras que en la industria aeronáutica muchas piezas de las aeronaves se fabrican usando materiales compuestos en lugar de metales, en especial en las turbinas [41]. Así mismo, se usan en muelles y vehículos acuáticos, además en estructuras de ingeniería civil [42]. En otro ámbito, por la capacidad de diseño de la que son susceptibles los materiales compuestos y la tecnología disponible hoy en día para su fabricación, muchos implantes

dentales y ortopédicos se realizan en materiales compuestos, que van desde lentes intraoculares hasta reemplazos de huesos y articulaciones, además de sustratos para crecimiento de células [37], válvulas cardíacas, tejidos para diálisis y anticoagulantes [34]. Por último, polímeros con refuerzos de NTC y litio pueden ser usados tanto como conductores comparables a los metales, así como generadores piezoeléctricos [42] y baterías.

3.5. Determinación de las propiedades mecánicas de un material

Para conocer las propiedades mecánicas de un material, sea éste puro o compuesto, generalizando, cualquier material macroscópicamente continuo, se emplean diversos métodos conocidos formalmente como ensayos. En forma somera, estos ensayos pueden agruparse en destructivos y no destructivos [43], según si la probeta a ensayar es destruida o no durante la ejecución del ensayo. Los ensayos no destructivos se basan en medidas indirectas para estimar algunas propiedades mecánicas, mientras que los destructivos permiten valorar directamente las propiedades mecánicas de los materiales [44].

Algunos de los ensayos no destructivos más frecuentes son:

- **Tintas penetrantes:** Este es un método utilizado para descubrir grietas en la superficie de un material [45]. Para llevarse a cabo esta prueba se depositan químicos líquidos en la superficie del material, los cuales son absorbidos por las grietas o agujeros que estén presentes en la superficie. Luego de secarse el líquido, éste es removido de la superficie mediante productos limpiadores. Posterior a esa limpieza se añade una sustancia reveladora, la cual vuelve reactivos a la luz UV los restos del líquido anterior presentes en grietas y poros. Finalmente, una inspección visual revela las zonas de acumulación del tinte [43], y por tanto la presencia o ausencia de grietas o poros. La propiedad mecánica medida en este caso corresponde a la calidad superficial del material.
- **Análisis de vibraciones:** La propiedad a ser determinada en este ensayo es el módulo elástico del material. Consiste en que una probeta del material es forzada a vibrar longitudinal, torsional o transversalmente, pudiendo estar dicha probeta empotrada en ambos extremos, o suspendida mediante alambres delgados. La excitación se administra mediante campos magnéticos y las vibraciones ocasionadas se pueden medir gracias a bobinas de impedancia [45]. El espectro de frecuencias de las vibraciones muestra peaks de resonancia, de tal forma que la posición de dichos peaks y la masa de la probeta se pueden usar para calcular el módulo elástico.
- **Identación:** sirve para medir la resistencia a la deformación plástica de un material [45]. Los indentores a usar determinan el tipo de ensayo que se realiza, los cuales pueden ser esféricos (ensayo brinell), cónicos (ensayo rockwell) o con forma de pirámide (ensayo vickers). La deformación que se mide es producto de la aplicación de una carga en condiciones normadas [43], constatándose correlaciones empíricas entre la dureza y el esfuerzo de fluencia.
- **Ultrasonido:** gracias a esta prueba se puede medir la el módulo elástico de un material, incluso en materiales compuestos más heterogéneos donde otros ensayos podrían resultar más complejos de realizar. La probeta o muestra del material se amordaza en un soporte sumergido en un recipiente con agua, dentro del cual también se encuentran unos transductores que funcionan como receptores del ultrasonido. A su vez éstos se conectan a un osciloscopio y a un generador de ondas [46]. El soporte permite ubicar la probeta en un ángulo específico de tal forma de capturar las velocidades de propagación de las ondas transversales y longitudinales del material. Con ambas velocidades queda definida la constante elástica del material [47] mediante relaciones físicas conocidas.

Los ensayos destructivos otorgan una medición directa de las propiedades del material a ensayar y como resultado se obtienen gráficas (curvas esfuerzo/deformación (figura 3.24), curvas de esfuerzo

de ruptura vs ciclos) o bien energías de deformación. De las gráficas de esfuerzo/deformación pueden obtenerse las siguientes características mecánicas: módulo elástico, esfuerzo de fluencia, deformación plástica, esfuerzo último, tenacidad y resiliencia. Algunos de los ensayos destructivos más comunes son:

- **Tracción:** el objetivo del ensayo de tracción es determinar la Resistencia Última (UTS, por sus siglas en inglés) y el módulo de elasticidad del material. Además, la observación directa del ensayo permite obtener otras informaciones relevantes, pues un material compuesto puede fallar por agrietamiento o "delaminación". Se puede indagar la forma en que el material falla, cómo es que el daño se desarrolla en el material [48]. El ensayo de tracción consiste en aplicar una carga controlada y medir la deformación de la probeta en ensayo [43], llegando en la mayor parte de los casos a la ruptura del material. Para este propósito se puede usar máquinas de tornillo que imponen un desplazamiento a la probeta, o bien máquinas hidráulicas que imponen una carga sobre la probeta, siendo la máquina hidráulica la que ofrece un control más sensible de la misma, pero a un costo económico mayor que la máquina de tornillo. La probeta a ensayar posee una geometría establecida por diversas normas, al igual que el mecanismo de sujeción de la probeta a la máquina de ensayos.
- **Compresión:** el objetivo es determinar la resistencia del material y su módulo de elasticidad. Sin embargo se diferencia del anterior por el sentido contrario en que se aplica la carga. Normalmente la tendencia al pandeo en compresión se controla aumentando la sección de área resistente del material en cuestión [48]. En consideración a esto y a que consecuentemente existen otros mecanismos de falla, se usan equipos y mordazas normadas (figura 3.22). Se establecen así diferentes tipos de ensayos de compresión según la manera de transferir la carga a la probeta, como se aprecia en la figura 3.21.

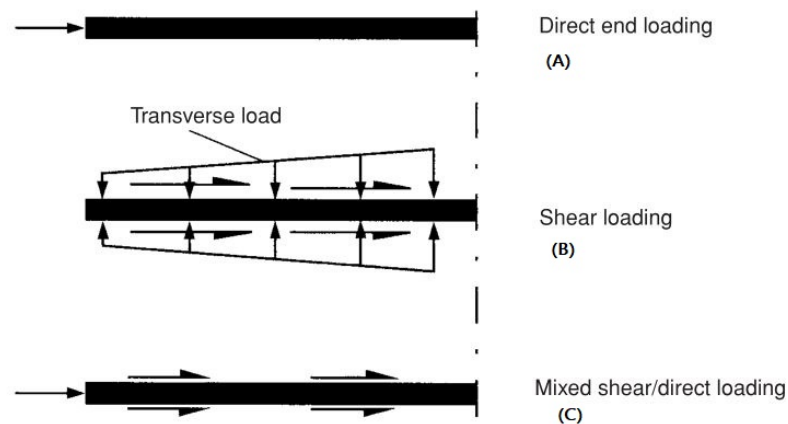


Figura 3.21: Métodos de compresión: carga directa en el extremo de la probeta (A) según norma ASTM, carga en corte a través de las paredes de la probeta (B) según método Celanec (CRAG), carga mixta, de corte y directa a la vez (C) [48].

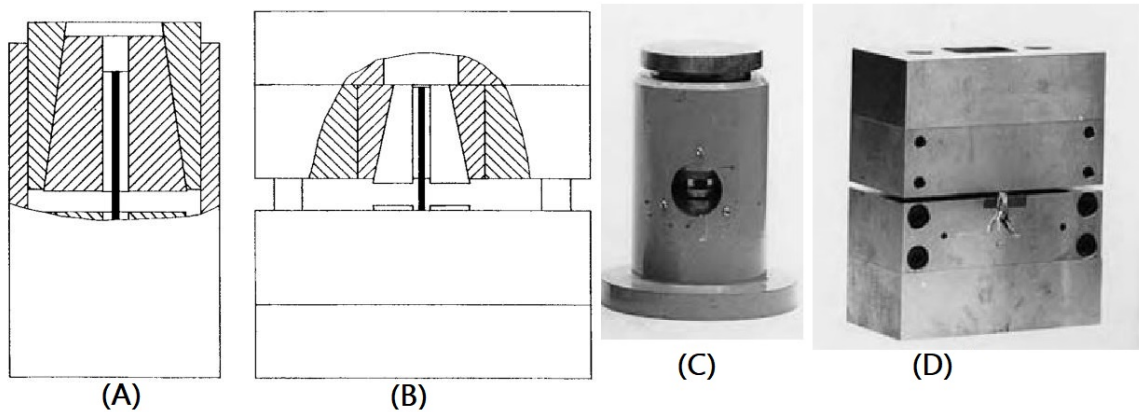


Figura 3.22: Esquema del funcionamiento de las mordazas para el ensayo de compresión: (A) Celanece o CRAG, (B) ITRI, mordazas para ensayos de compresión: (C)ITRI, (D)CRAG [48].

- **Fatiga:** el objetivo del ensayo es obtener la gráfica de esfuerzo vs ciclos hasta la ruptura. El ensayo de fatiga consiste en someter una probeta a una sollicitación alternativa, de tal forma que se vea afectada por esfuerzos alternativos [43], que tienen cierta amplitud. Se identifican un esfuerzo máximo, uno mínimo y uno promedio. La acción mediante la cual se administra el esfuerzo puede ser compresión, tracción, corte, flexión o torsión [48].
- **Impacto:** el objetivo es obtener la energía absorbida por el material ante el impacto y su fractura. Un ensayo muy famoso de este tipo corresponde al ensayo Charpy, pero además existen otros como el ensayo de impacto sobre placa. Ambos están esquematizados en la figura 3.23.

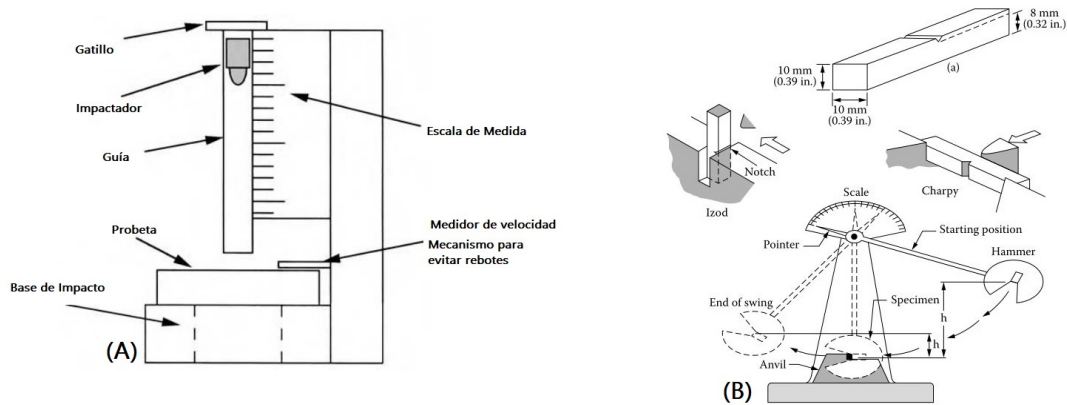


Figura 3.23: (A)esquema del equipo requerido para el ensayo de impacto sobre placa [48], (B)esquema del equipo y las probetas requeridas para el ensayo Charpy e Izod [43].

A su vez, estos ensayos mencionados se pueden clasificar por la manera en que se aplican las cargas sobre las muestras [43, 45]:

- **Esfuerzos:** éstos son uniaxiales, biaxiales, multiaxiales e hidrostáticos. Los ensayos de esfuerzos uniaxiales son los más frecuentes.

- Modo de la carga: se identifican los ensayos de compresión, tracción, corte, flexión, torsión y pandeo. Los más habituales son los de tracción y compresión. En el de compresión no se requiere adosar la probeta a alguna máquina, pero es más complejo identificar la zona de falla.
- Tiempo de la carga: se pueden señalar las cargas estáticas, cuasiestáticas, dinámicas, cíclicas o de impacto. Las cargas cíclicas definen los ensayos de fatiga, donde se mide la capacidad de un material para tolerar la aplicación alternada de cierta cantidad de carga. Las cargas de impacto definen los ensayos como el Charpy, que buscan medir la tenacidad de un material sirviéndose de la ruptura de éste mediante un péndulo normado. Las cargas estáticas o cuasiestáticas suelen ser ocupadas en ensayos de tracción o compresión.

Los ensayos destructivos en su mayoría permiten obtener como resultados curvas de esfuerzo vs deformación. De estas gráficas se puede obtener información relevante respecto no sólo del módulo elástico del material sino de otras variables como su resistencia última o el rango de deformación en el que el material se comporta elásticamente. Estos y otros resultados se aprecian en la figura esquemática 3.24.

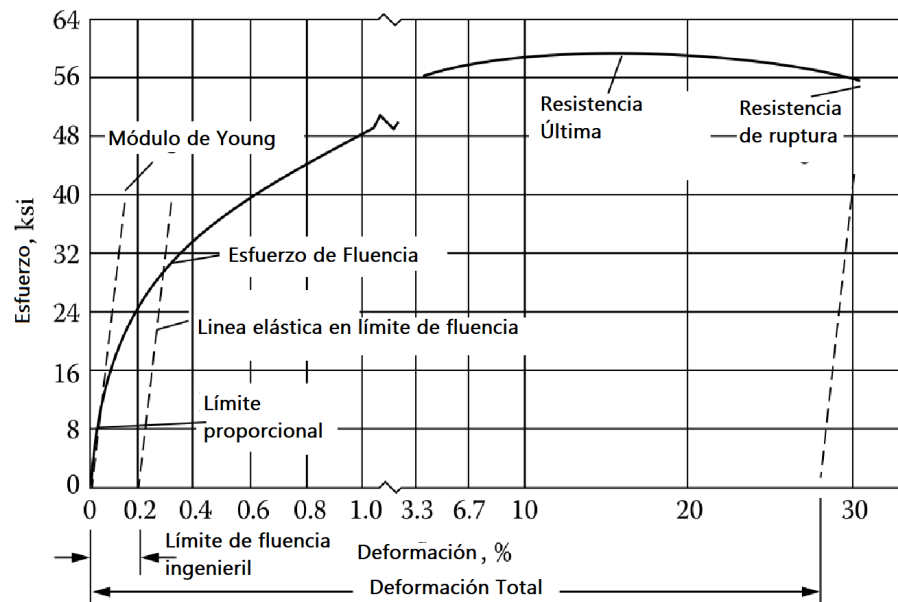


Figura 3.24: Curva esfuerzo/deformación y la información que es posible extraer de ella [43].

Existen otros tipos de ensayos tanto destructivos como no destructivos, pero se mencionaron los más habituales relativos a las características mecánicas de los materiales. Además de las pruebas ultrasónicas [49] también existen pruebas radiológicas, magnéticas, de microondas y eléctricas que permiten caracterizar mecánicamente un material [46].

Se debe destacar que el ensayo a recrear mediante simulación en este estudio corresponde a un ensayo de compresión de carga directa en el extremo, donde se imprimirá una deformación de 1 %, sin llegar a destruir la "probeta digital" ni sobrepasar el rango de límite de fluencia ingenieril (2 %).

3.6. Volumen representativo elemental

El Volumen representativo elemental, o RVE por sus siglas en inglés, es parte de una técnica usada para estudiar medios heterogéneos, llamada "Homogenización". Este método teoriza el comportamiento de materiales compuestos desde los supuestos de la mecánica de medios continuos [41]. En el estudio de los materiales compuestos se puede adoptar dos puntos de vista:

- Escala global o macroscópica: a este nivel, las heterogeneidades del medio son muy pequeñas y por tanto ignoradas, considerándose así como si fuera un material homogéneo.
- Escala local o microscópica: a este nivel es donde se analiza la estructura interna del compuesto. La escala de este nivel de representación corresponde a una parte muy pequeña del dominio global y se denomina 'volumen elemental representativo'. Dicho dominio está formado por los pequeños componentes o fases del material, entendiéndose que sus dimensiones son lo suficientemente grandes para satisfacer las hipótesis de la mecánica de medios continuos; más grande que la distancia intermolecular de sus constituyentes.

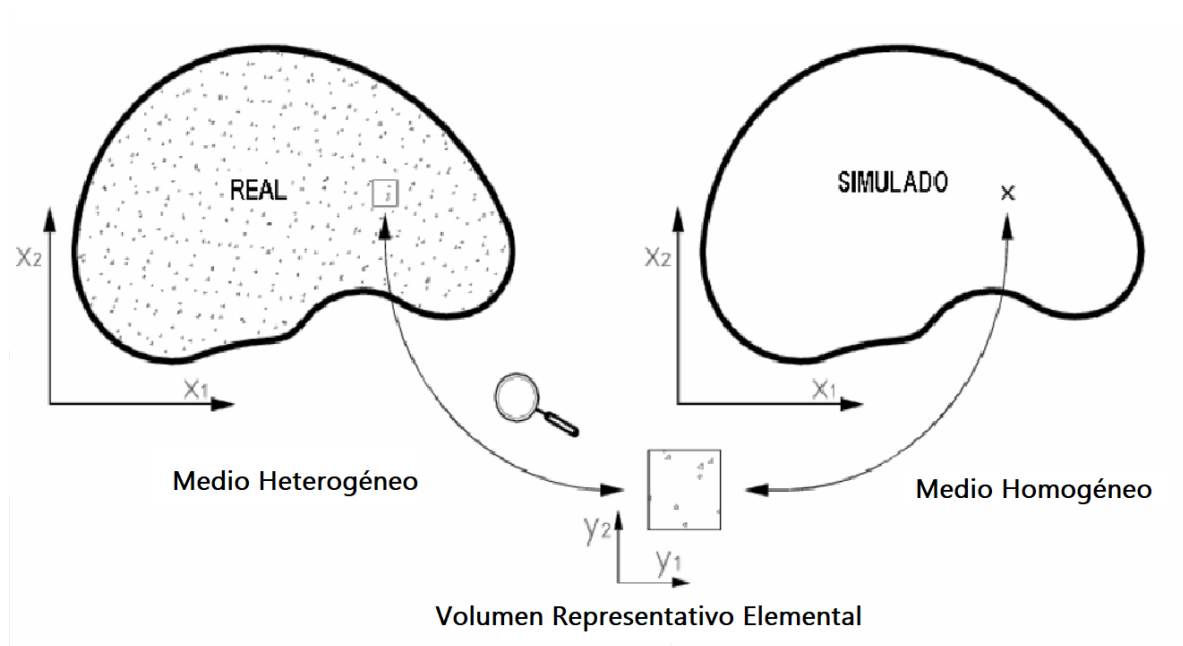


Figura 3.25: Representación del medio heterogéneo, el medio homogéneo simulado y el RVE [41].

Una hipótesis a considerar es que el medio heterogéneo es estadísticamente homogéneo, o sea, se presume que es posible determinar un volumen elemental que sea representativo del medio. Una forma de realizar esto es sustituir un material fuertemente heterogéneo por un material homogéneo el cual se desea equivalente al anterior dentro de un rango usual de cargas [41]. El material fuertemente heterogéneo es el compuesto, dentro del cual una muestra de tamaño manipulable contiene un gran

número de heterogeneidades (granos, cristales, fibras, agujeros, fisuras, etc) embebidas dentro de una matriz de propiedades diferentes [41]. Una recomendación indica que el RVE debe ser de al menos 2.5 - 3.5 veces el tamaño de la característica significativa (heterogeneidad) de mayor tamaño del RVE [50].

El empleo de RVE para tratar materiales compuestos mediante métodos computacionales es una técnica que permite reducir la complejidad y costo computacional del problema [51], siendo el empleo de esta técnica el curso de acción para el caso del presente trabajo.

3.7. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos o MEF es una técnica que permite encontrar la solución aproximada en forma numérica a las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el comportamiento de diversos fenómenos [52]. El método inicialmente se enfocó en resolución de problemas de análisis estructural, pero actualmente se ha diversificado, usándose para resolver problemas de medios continuos en general.

A partir de la década de 1980, la ayuda de los computadores en la solución de problemas aplicando MEF ha permitido lograr grandes avances en la mecánica computacional. Se han creado diversas herramientas que permiten aprovechar este método para abordar problemas con geometrías o condiciones de borde complejas [52]. Algunos ejemplos de software comerciales que realizan estas labores son Abaqus [53], Adina [54], Comsol [55] y Ansys [56], los que abordan tanto problemas de estructuras como eléctricos y térmicos.

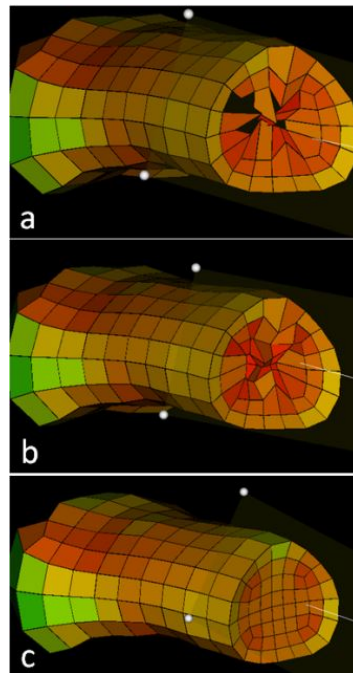


Figura 3.26: Dominio 3D con diferentes mallados [57].

Para resolver de manera aproximada un problema mediante el MEF, se recurre a discretizar tanto las EDP como el dominio mismo, lo cual permite manejar adecuadamente condiciones de contorno, geometrías complejas y propiedades de materiales a simular, como se ve en la figura 3.26. La discretización implica reducir la complejidad del problema a nivel matemático, pasando de un planteamiento de respuesta algebraica irresoluble y compleja de conseguir, a una gran cantidad de problemas pequeños de menor complejidad [58, 59, 60]. Se obtiene como resultado el campo de desplazamientos del medio en cuestión, el que a su vez permite calcular otras magnitudes de interés.

Los pasos a seguir, a modo grueso, para conseguir el resultado anteriormente señalado son descritos por [61]:

- El medio continuo es separado por líneas imaginarias o superficies, las cuales forman los elementos finitos. Esto se conoce como "malla".
- Los elementos se interconectan entre sí mediante una cantidad finita de puntos nodales situados en sus contornos, los que ocasionalmente también existen en su interior, y son los desplazamientos de estos nodos las incógnitas a hallar del problema.
- Los desplazamientos nodales definen de manera única el estado de las deformaciones dentro del elemento y en sus bordes mediante funciones de forma. Generalmente se prefieren como funciones de forma polinomios de lagrange unidimensionales.

La malla del problema cobra una importancia fundamental, pues -no sólo- de ella depende la representatividad de las soluciones encontradas. Existen algunas recomendaciones respecto de la malla del problema. Se recomienda a modo general 'usar mallas relativamente finas en regiones donde se espere un alto gradiente de deformaciones o esfuerzos, mientras que se puede usar malla menos fina en regiones donde se esperan bajos gradientes de deformaciones o esfuerzos' [62]. Como ejemplos de estas zonas se mencionan: la vecindad de un punto donde hay cargas concentradas, grietas o agujeros, cambios abruptos de sección, uniones entre diferentes materiales y la cara interior de secciones curvas de un cuerpo, como se puede apreciar en la figura 3.27. Además se recomienda el uso de mallas conformadas por elementos triangulares (2d) o tetragonales (3d), debido a su buena capacidad de aproximar geometrías variadas [61].

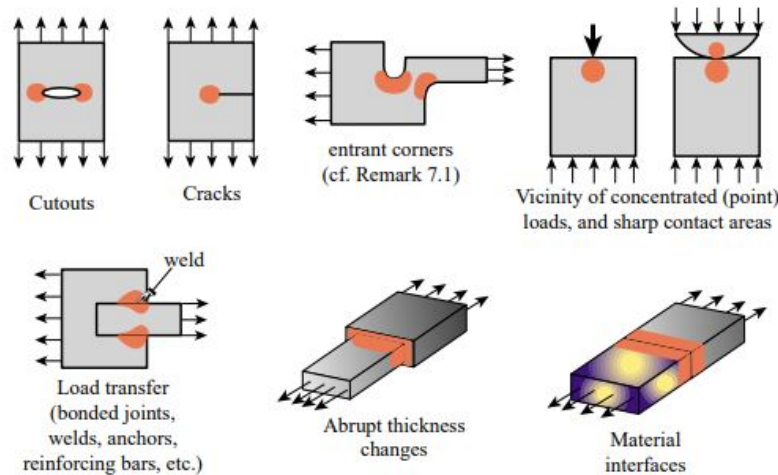


Figura 3.27: En naranja, se señalan las zonas de un cuerpo donde se recomienda refinar la malla [62].

Son 5 las características que definen la calidad de una malla: suavidad, relación de aspecto, calidad de elemento, asimetría y calidad ortogonal [63, 64].

- Suavidad: Corresponde a la gradualidad del cambio de la malla de fina a gruesa (o vice versa) entre caras adyacentes del cuerpo a estudiar. Cambios abruptos de volumen entre elementos de la malla adyacentes conduce a grandes errores de truncamiento.
- Relación de aspecto: es la razón entre la más grande y la más pequeña de las dimensiones del elemento. Valores cercanos a 0 significan mala calidad (figura 3.28).

- Calidad de elemento: Comparación entre los elementos de la malla y la geometría del elemento exigido por el usuario. 1 representa buena calidad, 0 mala calidad.
- Asimetría: Comparación entre los elementos de la malla y un elemento equilátero equiangular. 0 significa buena calidad y 1 significa mala calidad. Valores inferiores a 0.5 se consideran suficientes.
- Calidad ortogonal: producto punto normalizado entre el vector normal a una cara del elemento y el vector que va desde el centro del elemento al centroide del elemento vecino pasando por esa misma cara. 0 es la peor calidad y 1, la mejor.

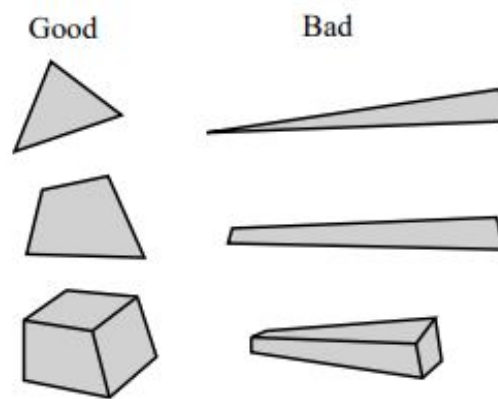


Figura 3.28: Buenas y malas relaciones de aspecto en elementos, geométricamente apreciadas [63].

4. Metodología

En este capítulo se exponen las condiciones y consideraciones tomadas para la configuración de la simulación, se identifica el problema, se describe lo que se lleva a cabo para abordarlo y se detallan las acciones a realizar para ello.

4.1. El Problema a resolver

El aluminio reforzado con NTC es un material compuesto de matriz metálica reforzado por fibras largas y discontinuas, y en el caso de este trabajo, aleatoriamente orientadas. Según discute la sección 3.3.4, el método de fabricación de la matriz de aluminio es el Moldeo por Presión. Éste reduce las posibilidades de que ocurra una reacción química entre el metal fundido matriz y el refuerzo de NTC, pero no lo evita por completo [14, 3]. Este proceso de fabricación genera en la interfase entre matriz y refuerzo una sustancia llamada carburo de aluminio (Al_4C_3) [14]. Ésta consume parte de la matriz y del refuerzo para generarse, adoptando la forma de una cáscara en torno a éste último. Cabe mencionar que el mecanismo de formación del Al_4C_3 escapa de los objetivos de este trabajo.

En otros trabajos relacionados con materiales compuestos de matriz metálica se da cuenta de la existencia del carburo de aluminio en la interfase entre matriz y refuerzo [65, 66, 67]. En éstos se le considera al carburo como un agente que transfiere las solicitaciones entre las fases. Sin embargo, no se indaga en los mecanismos que generan dicho carburo, ni tampoco en los efectos que un aumento o disminución en su cantidad generaría en las propiedades mecánicas del material. En particular en [66] se observa que la forma en que puede crecer el carburo depende de en cierta medida de los defectos que pueda tener cada NTC individual. Si bien en el [14] se indaga en este tópico, se realizan análisis considerando una fibra única y no una distribución de éstas al interior de una matriz.

El carburo en la interfase del material compuesto actualmente es una fuente de variabilidad para sus propiedades mecánicas y no se ha estudiado. Caracterizar esta influencia tiene como fin último que el aluminio reforzado con NTC sea un material con propiedades estandarizadas y predecibles, pudiendo así servir a propósitos ingenieriles variados. Por ello resulta de especial interés vislumbrar la influencia de esta sustancia sobre las propiedades mecánicas de este material compuesto de matriz metálica.

4.2. Procedimiento

Se analizan numéricamente 89 RVE cilíndricos compuestos de una aleación de aluminio Al-12 %wt-Si reforzada con NTC, refuerzos que están afectos al fenómeno de la formación de carburo de aluminio, mediante el método de los elementos finitos (MEF) usando un software comercial (Ansys 16). Esto, con el objeto de obtener sus propiedades mecánicas, específicamente su módulo de elástico y relación de Poisson en el sentido longitudinal, y cómo estas propiedades se ven afectadas por la formación del carburo de aluminio. Para hallar las características mecánicas mencionadas se induce un desplazamiento uniaxial en una de las caras de los RVE dentro de los límites de fluencia ingenieriles, además de establecerse ciertas condiciones de contorno. El tamaño de los RVE cilíndricos de aluminio es de 4 μm de altura y 5 μm de diámetro.

Se establecen 4 grupos de RVE, definiendo en cada uno un espesor específico para esta interfase formada: 1 [nm], 5 [nm], 10 [nm] y 15 [nm]. Además, cada RVE dentro cada grupo posee una fracción volumétrica de refuerzo diferente, que va desde el 0.18 % hasta el 2.25 %. Posteriormente se comparan las propiedades de módulo elástico y relación de Poisson, respecto del espesor de la interfase de carburo de aluminio y respecto de la proporción de refuerzo. Los NTC tienen un radio variable, entre los 35 [nm] a los 44 [nm] y un largo de 1 μm , atendiendo a ciertas consideraciones que son detalladas en las siguientes secciones.

4.3. Etapas del procedimiento

4.3.1. Análisis y determinación de las dimensiones de los RVE

Las dimensiones reales de una probeta de aluminio en un ensayo físico de compresión para este trabajo son de 3 [cm] de diámetro y 2.5 [cm] de largo, siendo considerada una probeta corta ($\text{Largo/Diámetro} = 0.8$) según la norma de compresión ASTM [68]. Mientras, las dimensiones de cada NTC son de 1 μm de largo y 35 [nm] de radio, considerándose una proporción volumétrica de refuerzo de entre 0.18 % y 2.25 %. Esto quiere decir que en un ensayo real, la diferencia de ordenes de magnitud entre las dimensiones de la probeta y las de sus refuerzos serían 4 respecto del largo y 7 respecto del diámetro.

Sin embargo, por la diferencia de órdenes de magnitud entre las dimensiones completas de la probeta y sus heterogeneidades presentes (refuerzos), se vislumbra una serie de dificultades a la hora de modelar computacionalmente esta situación.

Por una parte, se requiere emplear una gran cantidad de elementos finitos para capturar dichas heterogeneidades y conseguir mallar la geometría apropiadamente, lo que, a su vez, exige un equipo con una alta capacidad de memoria y procesamiento, más allá de los recursos disponibles.

Por otra parte, los elementos que sí son capaces capturar las heterogeneidades son de volumen muy pequeño respecto a los que no logran. Operar con ellos requiere de una aritmética con una alta cantidad de cifras significativas so pena de inmensos errores de redondeo/truncamiento, lo que conlleva la pérdida de la validez de los resultados finales. La complejidad de este análisis requiere de mayores

recursos computacionales.

Para subsanar estas dificultades se ha decidido modelar para este problema un volumen representativo elemental (RVE) del material involucrado (aleación de aluminio reforzada con NTC), cuyas dimensiones son de 5 $[\mu\text{m}]$ de diámetro y 4 $[\mu\text{m}]$ de largo. De esta manera las diferencias de orden de magnitud antes mencionadas respecto del largo se reducen a 0, mientras que para el diámetro se reducen sólo a 3. El problema de la disparidad del tamaño de los elementos que capturan heterogeneidades respecto de los que no las capturan (zonas de la probeta sin refuerzos) queda resuelto. Como consecuencia adicional de esto, se tiene que el nuevo dominio del problema cuenta con menor cantidad de heterogeneidades que considerar, reduciéndose la cantidad de elementos necesarios para modelar éste.

Sin embargo, esto no resuelve el problema de la precisión, pues para trabajar a esta pequeña escala, aún se necesita de gran aritmética, como mínimo de 9 cifras significativas (especialmente en las divisiones). Esto se torna crítico a la hora de resolver el sistema lineal involucrado en la resolución del modelo MEF. Para subsanarlo, se conservan las respectivas proporciones de la probeta y sus refuerzos, amplificando las dimensiones del problema en 6 órdenes de magnitud. Esto significa que el RVE a manejar dentro de la simulación tiene dimensiones de 5 [m] de diámetro y 4 [m] de largo, mientras que las de los refuerzos es de 1 [m] de largo y 3.526-4.428 [cm] de radio. De esta manera se induce un menor error de redondeo en las operaciones.

4.3.2. Establecer las propiedades de los componentes del RVE

Material matriz: Se deben establecer las características del material matriz del RVE. Las propiedades de la aleación de aluminio a usar en el trabajo son: módulo elástico de 77 [GPa] y relación de Poisson 0.33 [14].

Interfase: Se han creado 4 grupos de RVE, según el espesor de la interfase de carburo de aluminio (Al_4C_3) entre el refuerzo mismo y la matriz. De esa manera se puede estudiar la influencia de los diferentes espesores de esta capa sobre las propiedades mecánicas de las probetas. Los grupos creados según este espesor son: 1 [nm], 5 [nm], 10 [nm], y 15 [nm], siguiendo un estudio desarrollado previamente [14]. Esta cáscara que se ubica exclusivamente en la superficie de cada fibra de NTC posee como características mecánicas 309 [GPa] de módulo elástico y una relación de Poisson de 0.2 [14].

Refuerzos: Se deben establecer las propiedades del refuerzo, el cual consta preliminarmente de NTC de pared múltiple, con un radio interior de 15 [nm] y exterior de 35 [nm], donde se considera a cada pared de un espesor de 0.4 [nm], con una cantidad aproximada de 18 paredes. Las propiedades de estos refuerzos son: módulo de elástico de 680 [GPa] y una relación de Poisson de 0.27 [14]. Debido a las limitaciones del poder de cómputo disponibles, se ha optado por representar a los NTC usando cilindros rellenos en lugar de tubos de pared gruesa (figura 4.1). Así, la malla del problema y su posterior resolución logran ser manejadas. Estos cilindros rellenos poseen las mismas propiedades que un NTC; son una representación mecánicamente fiel de éstos.

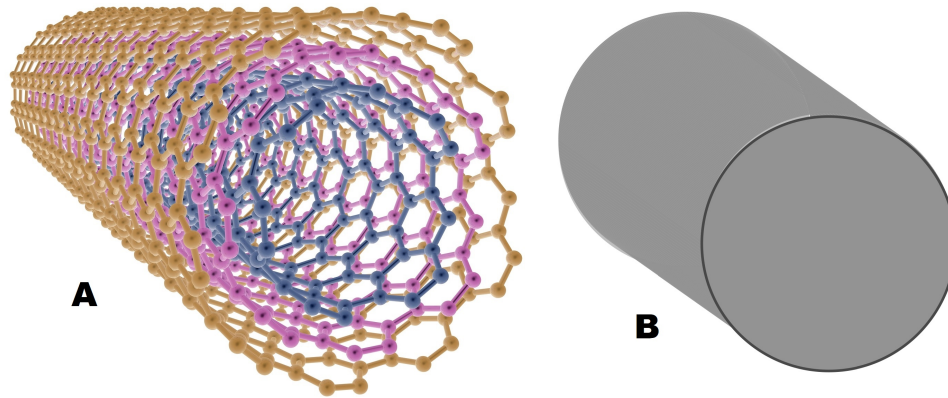


Figura 4.1: A) nanotubo de carbono de pared múltiple, B) cilindro relleno que para efectos del presente trabajo representará al nanotubo de carbono de pared múltiple.

Refuerzos + Interfase: Dada la pequeña escala de esta cáscara de Al_4C_3 , se optó por crear una representación fiel de la estructura "NTC+ Al_4C_3 ", en forma de cilindro relleno, compuesto de un único material. La cáscara de carburo de aluminio crece exclusivamente a lo largo del manto del NTC y por esto resulta conveniente el empleo de la Regla de las Mezclas (Sección 3.4.3) para cuantificar las propiedades finales de los cilindros rellenos que se proponen como refuerzos idealizados para este caso, como se muestra en la figura 4.2. El carburo de aluminio crece principalmente en dirección a la matriz de aleación de aluminio y consume una cantidad de NTC en su proceso de formación equivalente a un tercio del volumen total de Al_4C_3 formado [14]. Esto quiere decir que si un NTC de 35 [nm] de radio tiene una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 , el radio final del conjunto "NTC+ Al_4C_3 " no será 36 [nm] como podría intuirse inicialmente, sino menor: 35.26 [nm]. La tabla 4.1 muestra los radios y las fracciones volumétricas de NTC y Al_4C_3 que participan en el refuerzo según el espesor de éste último.

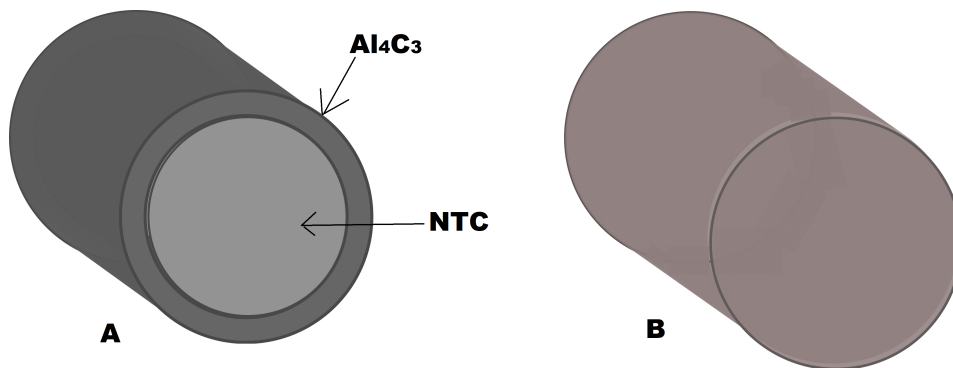


Figura 4.2: A) representación esquemática de un NTC cubierto de una capa de carburo de aluminio, B) idealización del refuerzo mostrado en (A) como un único material cuyas propiedades son ponderación de sus constituyentes.

Espesor Interfaz _{Al₄C₃} [nm]	Fracción Volumétrica _{NTC}	Fracción Volumétrica _{Al₄C₃}	Radio [nm]
1	0.934	0.066	35.26
5	0.711	0.289	38.25
10	0.509	0.491	41.35
15	0.365	0.635	44.28

Tabla 4.1: Fracciones volumétricas de NTC y Al₄C₃ que participan en una fibra de refuerzo y radios efectivos del NTC según el espesor de la capa de Al₄C₃ que lo recubre [14].

Regla de las Mezclas: Para cuantificar las propiedades de los refuerzos propuestos se usa la Regla de las Mezclas (Sección 3.4.3), en particular la fórmula 3.1 de la siguiente manera:

$$E_r = E_{NTC} * F_{NTC} + E_{Al_4C_3} * F_{Al_4C_3} \quad (4.1)$$

donde E denota el módulo elástico y F la fracción volumétrica del material indicado en subíndice. El módulo elástico del refuerzo propuesto, E_r , es una ponderación de los módulos elásticos de las sustancias que componen al refuerzo idealizado según sus participaciones volumétricas, implicando de esta manera que este material respeta las premisas de la regla de las mezclas. Para caracterizar completamente al refuerzo propuesto se debe establecer su relación de Poisson, usando nuevamente la fórmula 3.1:

$$\nu_r = \nu_{NTC} * F_{NTC} + \nu_{Al_4C_3} * F_{Al_4C_3} \quad (4.2)$$

donde ν denota la relación de Poisson del material referido en el subíndice respectivo. Los resultados de estos cálculos se hallan en la tabla 4.2 y son las propiedades efectivas a configurar para los refuerzos dentro del modelo MEF.

Interfaz [nm]	Radio[nm]	Módulo Elástico[GPa]	Poisson[-]
1	35.26	655	0.265
5	38.25	573	0.25
10	41.35	497	0.235
15	44.28	443	0.225

Tabla 4.2: Características de las partículas de refuerzo cilíndricas idealizadas como un conjunto de "NTC+Al₄C₃". Interfaz: espesor de la interfaz de carburo de aluminio, Radio: radio de los cilindros de NTC+Al₄C₃, Módulo Elástico: módulo elástico de los cilindros de NTC+Al₄C₃, Poisson: módulo de Poisson de los cilindros de NTC+Al₄C₃.

4.3.3. Modelado computacional de los RVE

El modelado computacional de los RVE se realiza en varias etapas. LIGGGHTS [69] es un software de código abierto que permite realizar simulaciones de partículas discretas (DEM: Discrete Element Method). Este programa tiene la capacidad de simular el comportamiento de partículas inmersas en un medio dentro de un dominio dado, afectas a condiciones tales como velocidad de ingreso a ese dominio, cantidad de partículas presentes, su módulo elástico, el roce entre ellas, su restitución ante choques entre ellas, la gravedad presente, etc. Estas partículas se encuentran bajo condiciones

de alta velocidad, alto coeficiente de restitución y baja módulo elástico, en un ambiente con gravedad cercana a cero. Luego de transcurrida la cantidad de tiempo adecuado, se genera una distribución aleatoria de éstas. Esta situación puede apreciarse en la figura 4.3 para el caso de la generación de una espuma metálica.

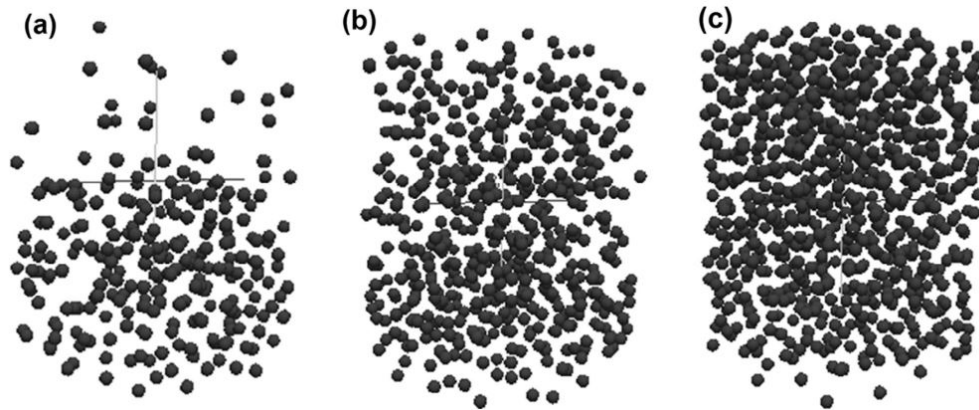


Figura 4.3: Distribución de partículas generadas por DEM, para el caso de una espuma metálica, en diferentes etapas del proceso: a) distribución inicial, b) distribución a mitad del tiempo, c) distribución final [70].

El resultado de este proceso es un archivo de texto que contiene información de la cantidad de partículas inmersas en el dominio anterior, la ubicación de los centroides de dichas partículas y las dimensiones de dicho dominio, que corresponde al RVE. Para obtener las proporciones volumétricas de refuerzo necesarias se insertan 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 partículas en LIGGGHTS.

Posteriormente se realiza un tratamiento a este archivo de texto con el software Matlab, que convierte las dimensiones y ubicaciones anteriormente señaladas en un conjunto de instrucciones de modelado para el software Design Modeler de Ansys 16. Dichas instrucciones consisten en crear los contornos del RVE usando las dimensiones del dominio utilizado en LIGGGHTS, ubicar el centroide de cada refuerzo según las posiciones de los centroides ya determinadas en el paso anterior, definir la orientación de cada refuerzo según generadores de números aleatorios y finalmente crear cada refuerzo según el grupo de RVE con que se esté trabajando.

El *script* generado por Matlab finalmente se ejecuta en Design Modeler y se obtiene como resultado un modelo CAD de cada RVE con los refuerzos que le correspondan distribuidos en su interior. El total de los RVE generados se encuentra en la tabla 4.3, mientras que algunas de ellos aparecen en la figura 4.4.

1 [nm]		5 [nm]		10 [nm]		15 [nm]	
Partículas	%vol	Partículas	%vol	Partículas	%vol	Partículas	%vol
%-50p	0,1894	%-50p	0,2085	%-50p	0,2645	%-50p	0,3027
%-50p	0,1932	%-50p	0,234	%-50p	0,2798	%-50p	0,3151
%-50p	0,2264	%-50p	0,2518	%-50p	0,2913	%-50p	0,346
%-100p	0,332	%-100p	0,4033	%-100p	0,4644	%-100p	0,5345
%-100p	0,3664	%-100p	0,4084	%-100p	0,4823	%-100p	0,5434
%-100p	0,3791	%-100p	0,4161	%-100p	0,4823	%-100p	0,5956
%-150p	0,5307	%-150p	0,6007	%-150p	0,7458	%-150p	0,8821
%-150p	0,5599	%-150p	0,6796	%-150p	0,7675	%-150p	0,9012
%-150p	0,5841	%-150p	0,7051	%-150p	0,7688	%-150p	0,9279
%-200p	0,6427	%-200p	0,7891	%-200p	0,891	%-200p	1,068
%-200p	0,6936	%-200p	0,8222	%-200p	0,9839	%-200p	1,1176
%-200p	0,7815	%-200p	0,8935	%-200p	1,0361	%-200p	1,1545
%-250p	0,8833	%-250p	1,0705	%-250p	1,273	%-250p	1,4143
%-250p	0,9534	%-250p	1,0962	%-250p	1,2793	%-250p	1,469
%-250p	0,9572	%-250p	1,124	%-300p	1,5085	%-250p	1,5187
%-300p	1,068	%-300p	1,2615	%-300p	1,5582	%-300p	1,7122
%-300p	1,0909	%-300p	1,2653	%-300p	1,576	%-300p	1,7772
%-350p	1,2475	%-300p	1,3722	%-350p	1,7199	%-350p	1,9554
%-350p	1,2488	%-350p	1,4678	%-350p	1,7275	%-350p	1,9834
%-350p	1,2704	%-350p	1,5238	%-350p	1,7313	%-350p	2,05
%-400p	1,385	%-350p	1,5302	%-400p	1,884	%-400p	2,1095
%-400p	1,4041	%-400p	1,6829	%-400p	1,8561	%-400p	2,2508
				%-400p	2,0884		

Tabla 4.3: RVE modelados y sus características: cantidad de partículas y proporción volumétrica de refuerzo, según el espesor de Al_4C_3 , indicado en la primera fila.

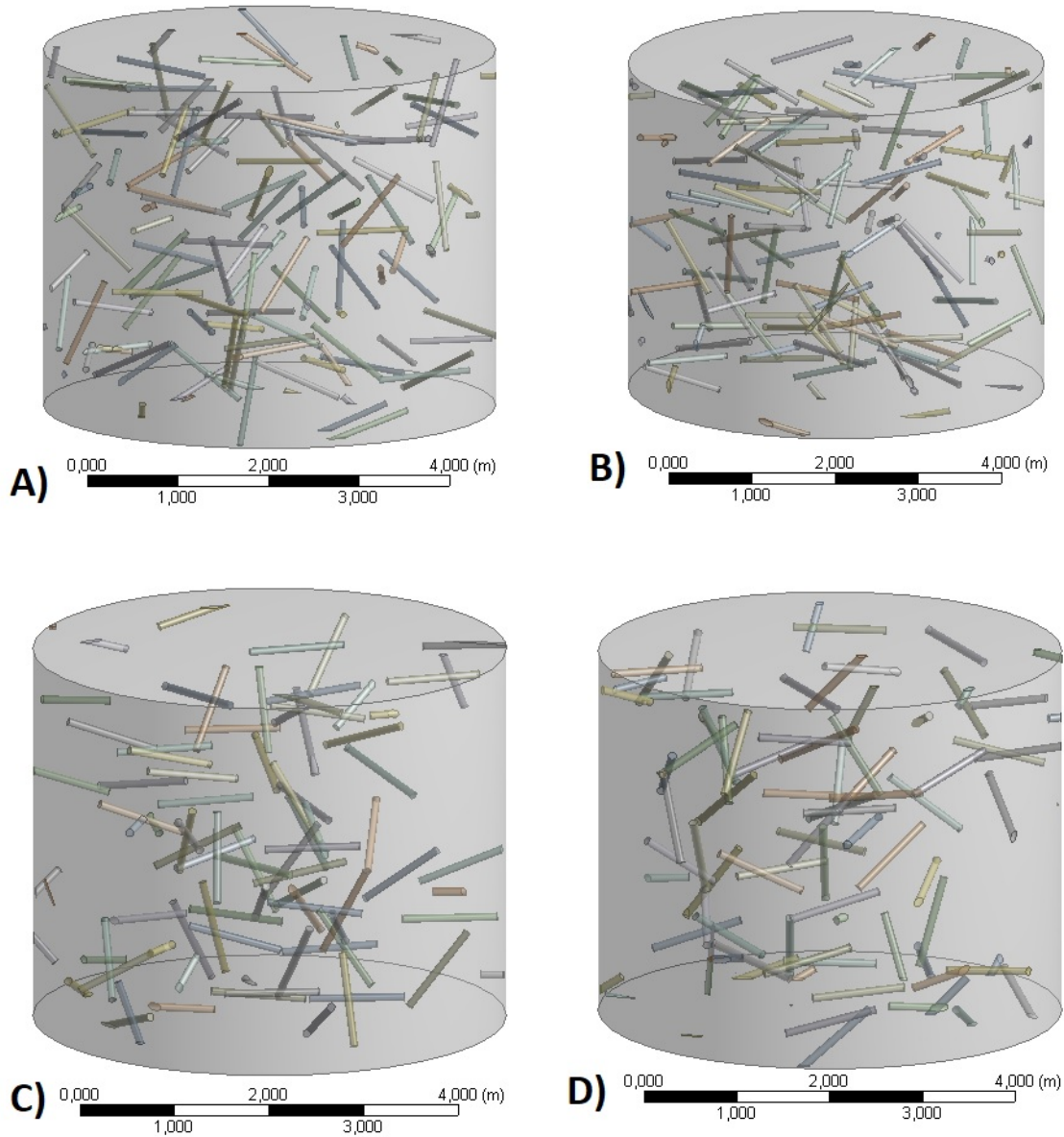


Figura 4.4: Algunos RVE de los señalados en la tabla 4.3 y sus refuerzos: A) pared 1 [nm] y 0.5307 % de refuerzo, B) pared 5 [nm] y 0.6007 % de refuerzo, C) pared 10 [nm] y 0.4822 % de refuerzo, D) pared 15 [nm] y 0.5345 % de refuerzo.

Una vez los RVE han sido generados por el modelador, debe realizarse una prueba que consiste en consultarle al mismo programa acerca del volumen de dichos RVE. Si el volumen es posible de ser calculado, tanto para el conjunto como para cada constituyente por separado, significa que los cuerpos involucrados han sido correctamente generados, y que no le faltan caras a algún poliedro para quedar cerrado. Esto es análogo a un polígono al que le falta una arista para cerrarse; sin ella no es posible determinar o siquiera definir su área. Una probeta de volumen indefinido no puede ser utilizada para las simulaciones MEF.

4.3.4. Simulación numérica

Para determinar las propiedades mecánicas de los RVE, se induce un desplazamiento uniaxial en el mismo, en su sentido longitudinal, el que es equivalente al 1 % de la longitud de éste, de tal forma de no exceder el límite de fluencia ingenieril definido para los materiales (2 % de enlongación). El módulo elástico y la relación de Poisson son determinados en base a la ecuación de elasticidad unidimensional para materiales isotrópicos:

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} \quad (4.3)$$

donde σ_z y ϵ_z son el esfuerzo y la deformación a los que está sometido el material, respectivamente, en el sentido longitudinal del RVE (z). A la deformación corresponde la siguiente relación:

$$\epsilon_z = \frac{u_z}{L_z} \quad (4.4)$$

donde u_z es el desplazamiento impuesto (4 [cm]) y L_z el largo original del RVE (4 [m]). El valor de σ_z que es utilizado fue calculado en base al área de la tapa del RVE, A_z , y a la fuerza de reacción que se genera en ella, F_z , (ambos datos entregados por el programa Ansys) mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_z = F_z/A_z \quad (4.5)$$

En conjunto con lo anterior, se determina el módulo de Poisson (ν) mediante estas dos relaciones:

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_z} \quad (4.6)$$

$$\epsilon_t = \frac{u_t}{L_t} \quad (4.7)$$

donde ϵ_t corresponde a la deformación transversal de la probeta al ser solicitada longitudinalmente, así mismo u_z corresponde al desplazamiento transversal que la probeta experimenta al ser solicitada longitudinalmente. L_t es la dimensión transversal de la probeta a la sollicitación, o sea, su diámetro. El desplazamiento transversal se obtiene por medio del programa Ansys.

4.3.5. Condiciones de contorno

En cuanto a las condiciones de contorno se tienen las siguientes consideraciones:

Tipo de Contacto: Los refuerzos que se encuentran dentro de la matriz necesitan estar en contacto perfecto con ella, atendiendo a los fundamentos mencionados en la sección 3.4.2. Para ello, dentro de Ansys se configura que todas las zonas de contacto entre los cuerpos sean del tipo **bonded**, o 'adherido', como se observa en la figura 4.5. Los cuerpos que han de estar en contacto constan de refuerzos y matriz.

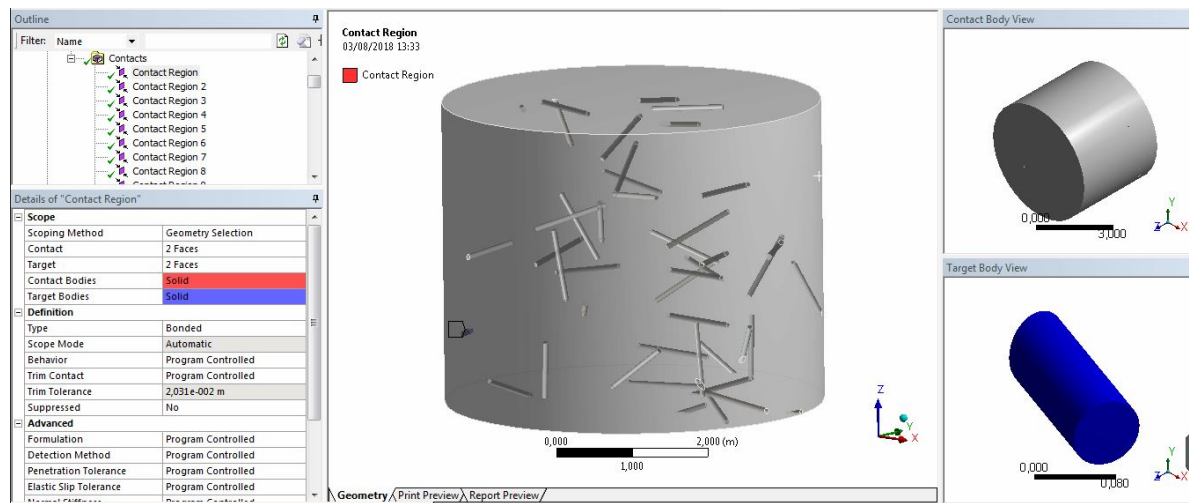


Figura 4.5: Menú de configuración de Ansys donde se define 'bonded' como tipo de contacto entre la matriz y sus refuerzos.

Tapa Inferior: La tapa inferior se configura como una cara fija en el sentido longitudinal (z), pero sin otras restricciones (x e y). Por tanto, se ajusta en aquella tapa un desplazamiento igual a 0 para el sentido longitudinal (z), como se aprecia en la figura 4.6.

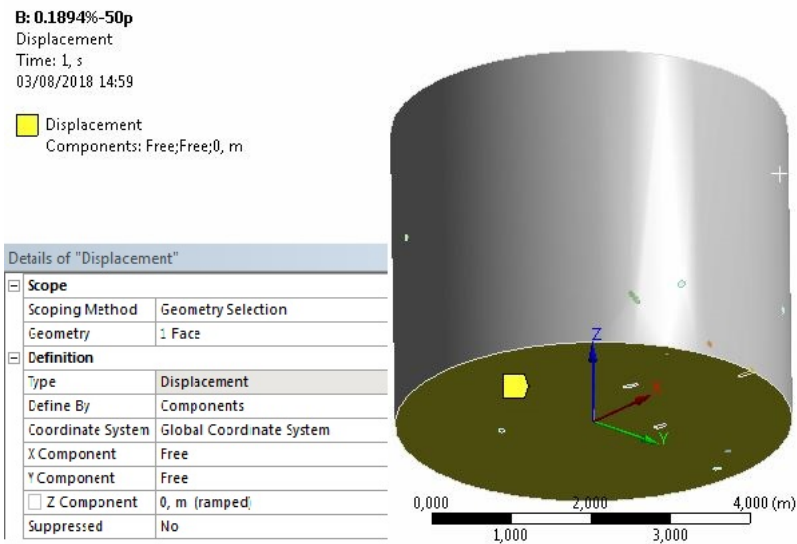


Figura 4.6: Menú de configuración de Ansys donde se define la condición de la tapa inferior, junto a la figura que indica visualmente la ubicación de esa condición de contorno.

Tapa Superior: Se configura un desplazamiento remoto en esta superficie, de valor igual a 0.04 [m] en el sentido longitudinal (z) en forma compresiva (esto quiere decir, -0.04 [m]), fijando además el ángulo de rotación en el sentido longitudinal como 0° . El resto de los grados de libertad (x , y , y las sus rotaciones respectivas) se dejan libres de restricciones. Para que toda la superficie se comporte coplanarmente, se configura un comportamiento 'coupled' tal como se muestra en la figura 4.7.

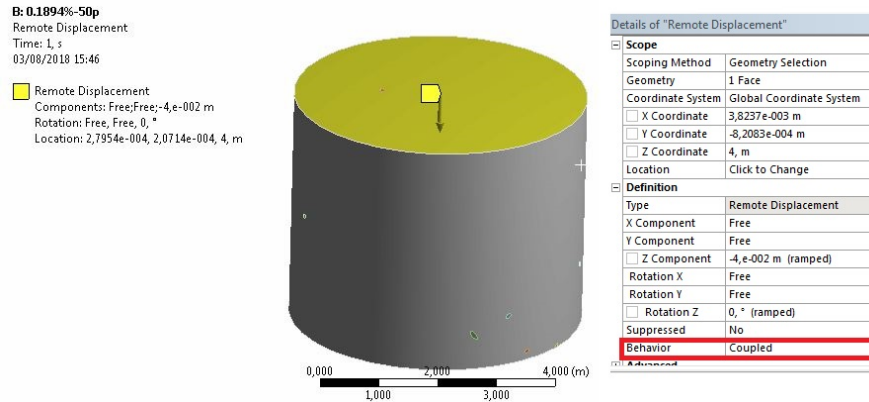


Figura 4.7: Menú de configuración de Ansys donde se define la condición de la tapa superior y se destaca la condición 'Coupled', junto a la figura que indica visualmente la ubicación de esa condición de contorno.

En una situación de prueba con un material conocido, el cual se sometió a un desplazamiento impuesto en su tapa, éstas condiciones de contorno descritas permitieron obtener como resultado sus propiedades ya conocidas. Condiciones de contorno sobre el manto o restricciones al movimiento lateral de ambas tapas provocaron cambios en estas respuestas.

4.3.6. Mallado

Respecto del mallado, se intentan cumplir las condiciones de las secciones 3.7, 4.3.2 y 4.3.1, las cuales imponen un límite a la cantidad de nodos presentes en el problema. Se optó por usar en cada probeta la malla más fina que los recursos permitieran. Se adjuntan las calidades de la malla de los problemas en anexos, y se muestran ejemplos de probetas malladas en la figura 4.8.

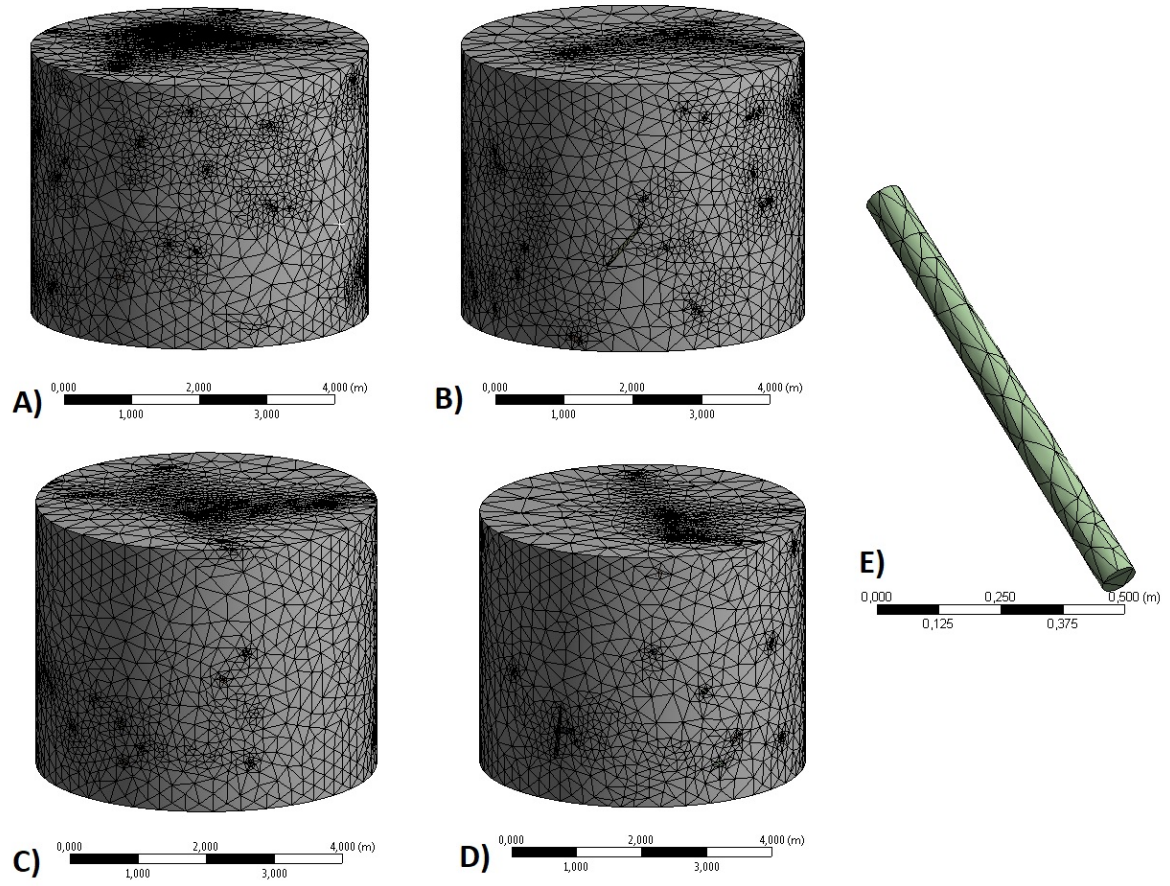


Figura 4.8: Algunos RVE de los señalados en la tabla 4.3 que han sido mallados: A) pared 1 [nm] y 0.5307 % de refuerzo, B) pared 5 [nm] y 0.6007 % de refuerzo, C) pared 10 [nm] y 0.4822 % de refuerzo, D) pared 15 [nm] y 0.5345 % de refuerzo, E) un refuerzo mallado.

5. Resultados y Análisis

5.1. Resultados

La totalidad de los RVE en deformación se han adjuntado en los anexos. A continuación se muestran algunos de ellos a modo ilustrativo:

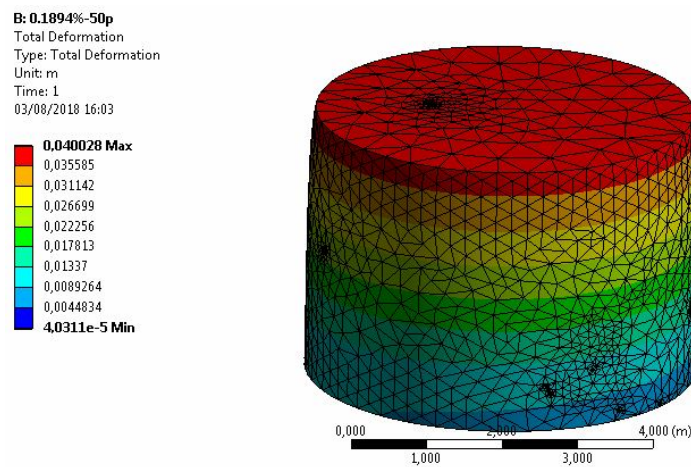


Figura 5.1: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1894 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

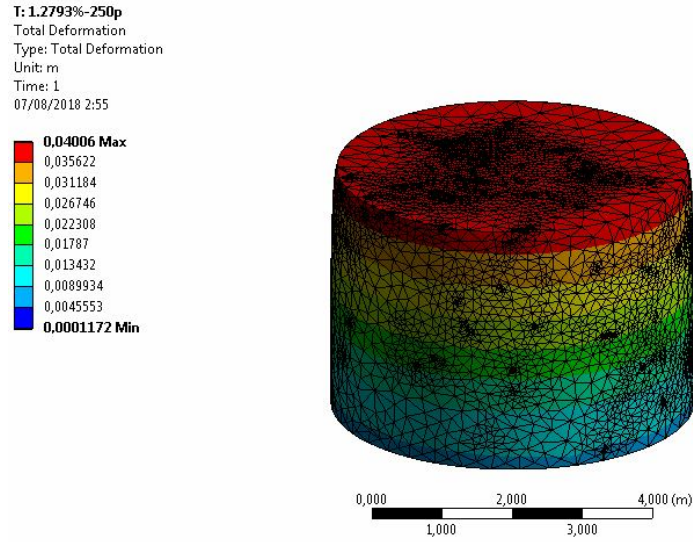


Figura 5.2: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2793 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

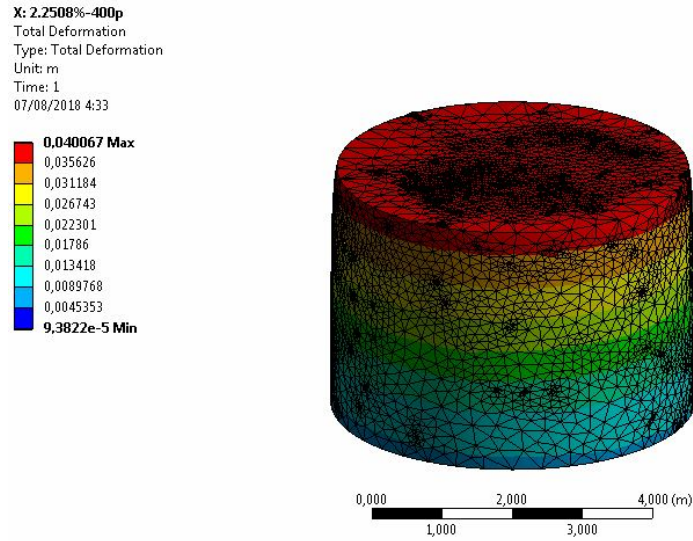


Figura 5.3: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.2508 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

Los RVE fueron sometidos a una deformación impuesta del 1 % de su largo, 4 [μm], es decir, -0.04 [μm], lo cual fue configurado dentro del programa como -4 [cm], puesto que el largo del RVE en el programa es 4 [m], atendiendo a las consideraciones mencionadas en capítulos anteriores. Se adjunta una de estas tablas a modo ilustrativo. Las demás se hallan en los anexos.

1 [nm]			
%	Reacción Tapa [GN]	Y [GPa]	Poisson
0,1894	15,806	80,4993	0,347042
0,1932	15,812	80,5299	0,346754
0,2264	15,823	80,5859	0,348983
0,332	15,843	80,6877	0,348918
0,3664	15,859	80,7692	0,348499
0,3791	15,866	80,8049	0,348402
0,5307	15,913	81,0442	0,349932
0,5599	15,932	81,1410	0,34924
0,5841	15,927	81,1155	0,349871
0,6427	15,978	81,3753	0,348945
0,6936	15,969	81,3294	0,346068
0,7815	15,994	81,4568	0,347485
0,8833	16,027	81,6248	0,348517
0,9534	16,04	81,6910	0,347903
0,9572	16,058	81,7827	0,347239
1,068	16,112	82,0577	0,348594
1,0909	16,111	82,0526	0,345976
1,2475	16,143	82,2156	0,346017
1,2488	16,153	82,2666	0,347372
1,2704	16,157	82,2869	0,343526
1,385	16,21	82,5569	0,341925
1,4041	16,196	82,4856	0,346924

Tabla 5.1: Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.

5.2. Análisis de resultados

A continuación, se analizan los resultados de este trabajo. Los módulos elásticos de los RVE se han normalizado porcentualmente respecto del módulo elástico de la matriz: 77 [GPa].

En el caso de los RVE con la capa de Al_4C_3 más delgado en sus refuerzos (1 [nm]), se puede apreciar que para la cantidad mínima de refuerzo estudiado en este grupo (0.1894 %) el módulo de elástico experimenta un incremento de 4.5 % respecto del material matriz puro, y para el valor máximo (1.4041 %) experimenta un incremento del 7.1 %. En la figura 5.4 dicho aumento del módulo elástico en función de la proporción volumétrica de refuerzo queda patente mediante la regresión lineal, cuyos datos provienen de la tabla A.1.

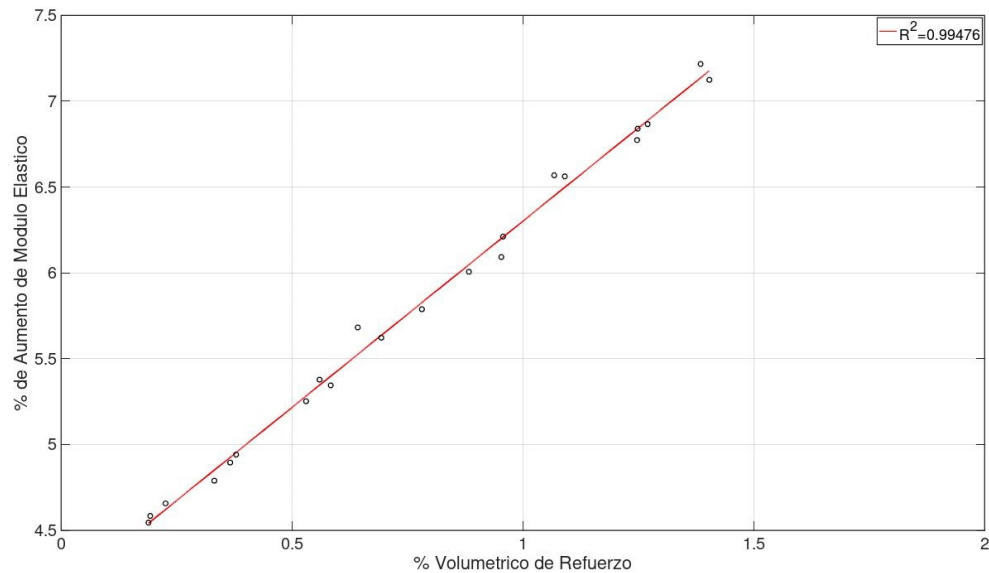


Figura 5.4: Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

En el caso de los RVE del grupo de 5 [nm] (tabla A.2), la menor cantidad de refuerzo agregado (0.2085 %) genera un aumento del módulo elástico de 4.57 % respecto del de la aleación de aluminio matriz sin refuerzos. La máxima cantidad de refuerzo agregado (1.683 %) provoca un aumento del modulo elástico de 7.7 % respecto de la matriz sin reforzamiento. Nuevamente se puede apreciar una clara tendencia lineal en la figura 5.5: un aumento del módulo elástico en función del aumento en la proporción de refuerzo agregado.

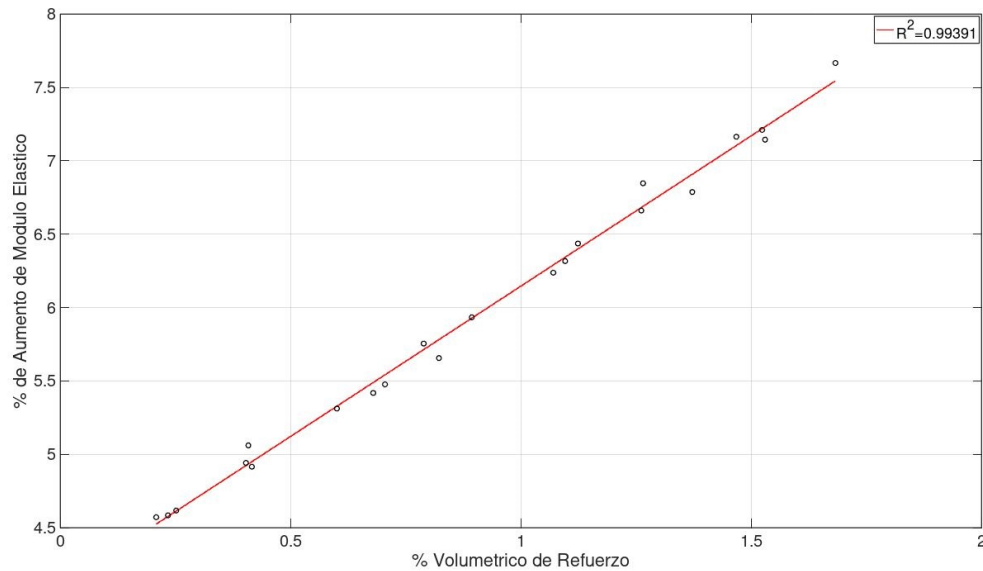


Figura 5.5: Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

En el caso del grupo de RVE con 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 en sus refuerzos, el mínimo valor de refuerzo usado (0.2645 %) genera un aumento de un 4.6 % en el módulo elástico, mientras que ante la proporción volumétrica máxima de refuerzo utilizado (2.088 %) dicho aumento es de un 7.9 % respecto del material matriz sin reforzamiento. La regresión lineal nuevamente muestra una clara tendencia en los datos, según se aprecia en la figura 5.6.

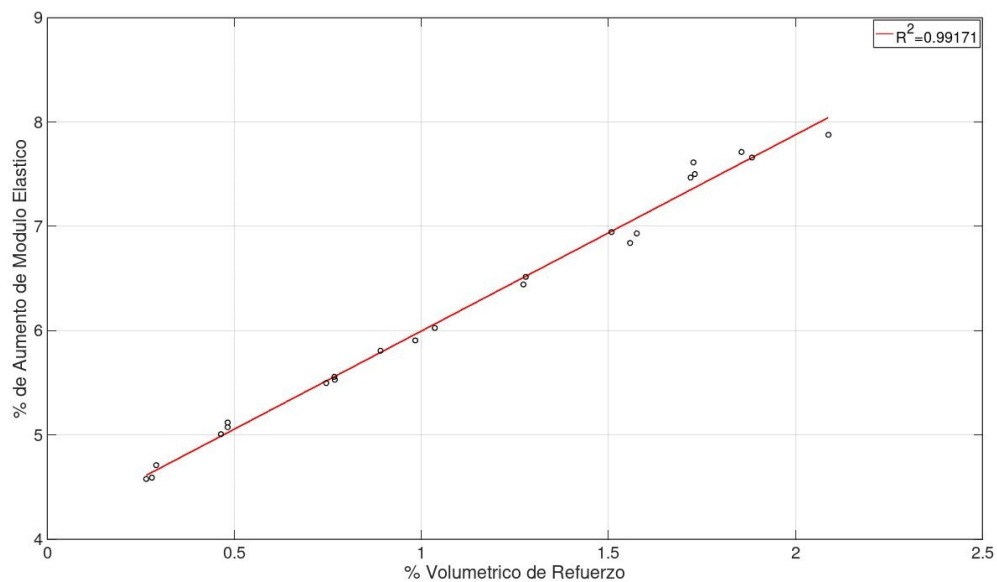


Figura 5.6: Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

En el caso del último grupo de RVE (15 [nm]), ante la mínima cantidad de refuerzo usado (0.3027 %), el incremento en el módulo elástico es de un 4.7 % respecto del material matriz. Mientras, para la máxima cantidad de refuerzo usado (2.25 %) dicho incremento es de 7.9 %. La regresión lineal nuevamente deja de manifestar una tendencia lineal en los datos, lo cual se puede apreciar en la figura 5.7.

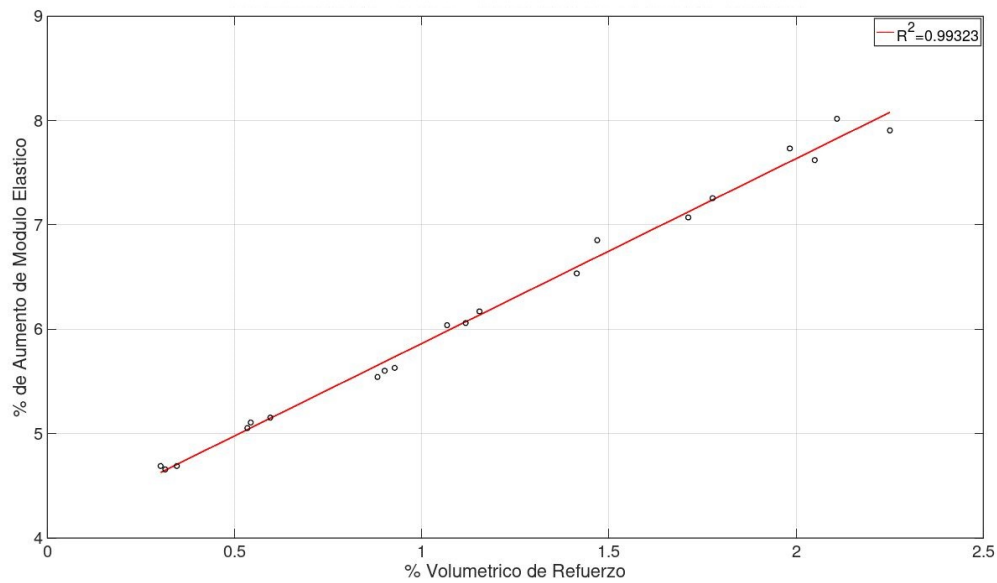


Figura 5.7: Resultados simulados y su posterior regresión lineal, del aumento porcentual de módulo elástico del RVE según su proporción de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

Un problema al comparar estos resultados es que en los 4 grupos de RVE los porcentajes volumétricos de refuerzo habitan en dominios diferentes, que si bien comparten cierta zona común, no son totalmente iguales. En base a los coeficientes de regresión lineal de buena calidad que se obtuvieron de los 4 grupos de RVE par los datos de Constante Elástica vs Porcentaje Volumétrico de Refuerzo”, se procedió a extrapolar el ajuste lineal antes obtenido para cada grupo, con el fin de compararlos en forma más objetiva, según se aprecia en la figura 5.8.

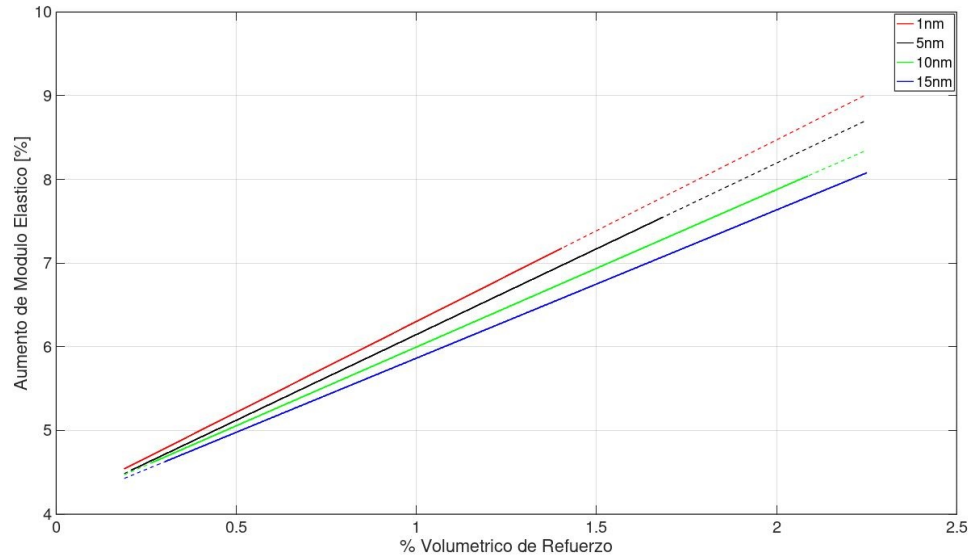


Figura 5.8: Regresión lineal de los datos, donde se incluye una extrapolación, del módulo de elasticidad vs % volumétrico de refuerzo, agrupados en diferentes colores según el espesor de la capa de Al_4C_3 presente en sus refuerzos (Rojo: 1 [nm], Negro: 5 [nm], Verde: 10 [nm], Azul: 15 [nm]). La zona punteada representa el dominio en el que cada grupo de RVE fue extrapolada. Los datos de esta figura provienen de la tabla 5.2.

A mayor cantidad de refuerzo, es mayor el valor de la constante elástica de la probeta resultante. También queda de manifiesto que el engrosamiento de la capa de Al_4C_3 penaliza este aumento de módulo elástico: dicha capa contrarresta el efecto inicial del refuerzo. La tabla 5.2 muestra datos calculados de módulo elástico en función de % de refuerzo, según las regresiones lineales antes mostradas, para un dominio común en los 4 grupos de RVE. En el caso de baja cantidad de refuerzo (0.1894 %) se puede observar que entre la hipotética probeta de cáscara de 1 [nm] y de 15 [nm] ocurre 0.11 % de reducción del módulo elástico, mientras que para la mayor cantidad de refuerzo (2.2508 %) ocurre un descenso de 0.937 % en el módulo elástico. Esto quiere decir, y en concordancia con lo que se aprecia en la gráfica anterior, que a mayor espesor de Al_4C_3 presente como cáscara sobre los refuerzos de NTC, menor es el incremento del módulo elástico que ese refuerzo es capaz de generar sobre el material compuesto.

% Refuerzo	% de aumento Y [GPa]			
	1 [nm]	5 [nm]	10 [nm]	15 [nm]
0.18940	4.54156	4.48535	4.47135	4.42761
0.28756	4.75460	4.68641	4.65600	4.60147
0.38572	4.96764	4.88746	4.84065	4.77533
0.48389	5.18069	5.08852	5.02529	4.94919
0.58205	5.39373	5.28958	5.20994	5.12305
0.68021	5.60678	5.49064	5.39459	5.29691
0.77837	5.81982	5.69169	5.57923	5.47078
0.87653	6.03286	5.89275	5.76388	5.64464
0.97470	6.24591	6.09381	5.94853	5.81850
1.07286	6.45895	6.29487	6.13317	5.99236
1.17102	6.67199	6.49592	6.31782	6.16622
1.26918	6.88504	6.69698	6.50247	6.34008
1.36734	7.09808	6.89804	6.68711	6.51394
1.46550	7.31113	7.09910	6.87176	6.68780
1.56367	7.52417	7.30016	7.05640	6.86166
1.66183	7.73721	7.50121	7.24105	7.03553
1.75999	7.95026	7.70227	7.42570	7.20939
1.85815	8.16330	7.90333	7.61034	7.38325
1.95631	8.37635	8.10439	7.79499	7.55711
2.05448	8.58939	8.30544	7.97964	7.73097
2.15264	8.80243	8.50650	8.16428	7.90483
2.25080	9.01548	8.70756	8.34893	8.07869

Tabla 5.2: Resultados extrapolados linealmente de incremento porcentual del módulo elástico vs % volumétrico de refuerzo, agrupados en columnas según el espesor de la capa de Al_4C_3 presente en el refuerzo. (Incremento respecto de la constante de elasticidad de la aleación sin refuerzos (77 [GPa])).

En cuanto a la relación de Poisson de los RVE, se aprecia en las figuras siguientes que varía de muestra a muestra sin un patrón, ni una tendencia lineal, según evidencian los coeficientes de regresión al interior de las gráficas. No se logra establecer la influencia de la capa de Al_4C_3 sobre esta magnitud. A pesar de esto, el rango total de las variaciones del coeficiente de poisson, considerando los casos de todas las muestras, va entre 0.33787 y 0.35023 (diferencia de 0.012357 entre ellos), lo que indica que tanto la cantidad de refuerzo como el espesor de la capa de Al_4C_3 presentes en ellos no afecta significativamente a dicha variable. En la sección 3.4.2 se menciona que los materiales compuestos pueden presentar anisotropía según la forma en que se distribuya su refuerzo.

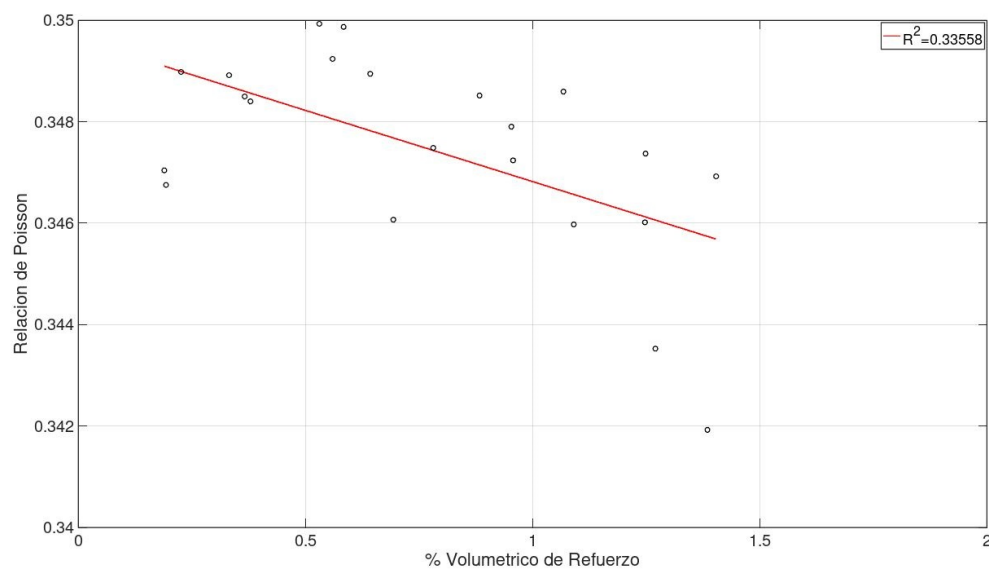


Figura 5.9: Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 1 [nm] de espesor.

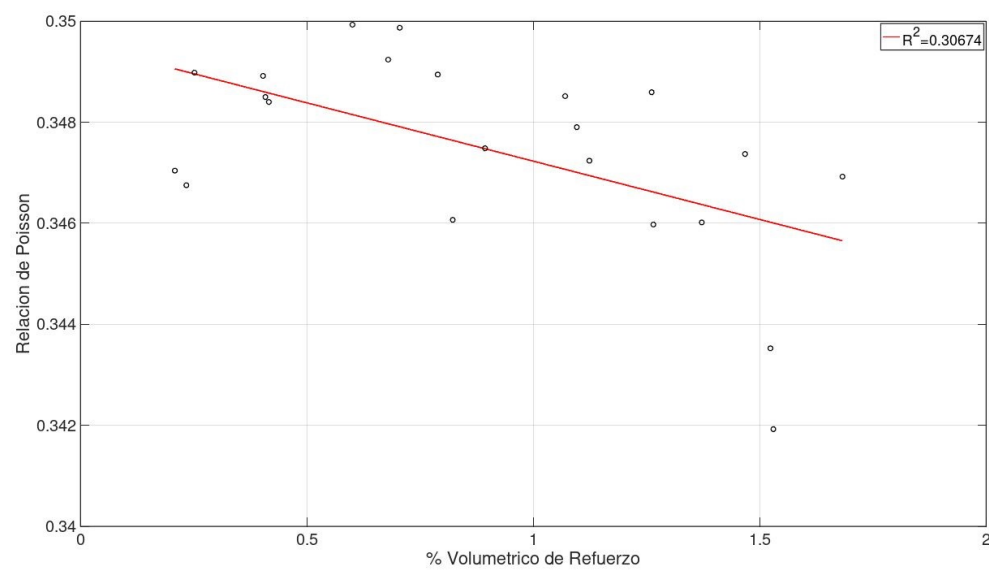


Figura 5.10: Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 5 [nm] de espesor.

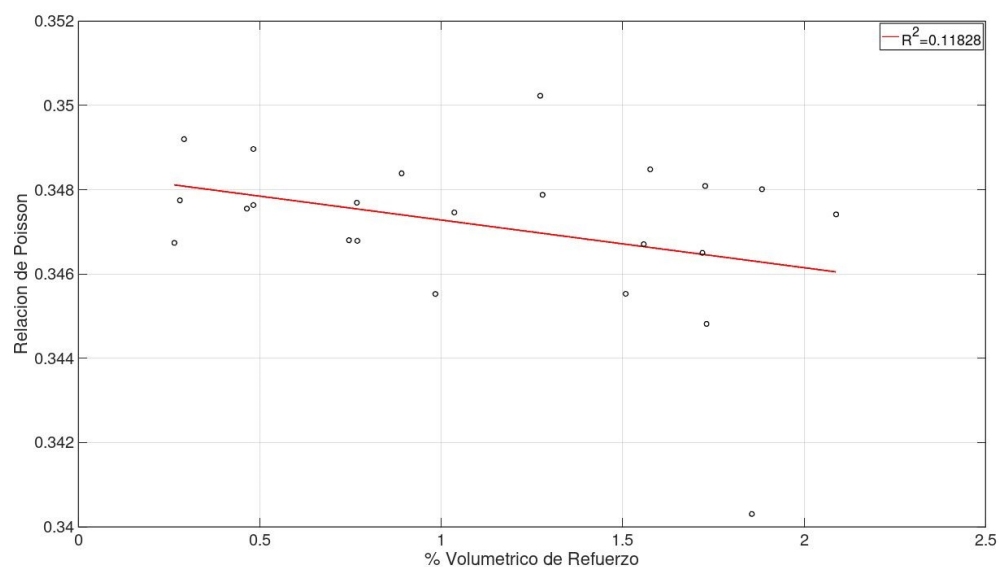


Figura 5.11: Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 10 [nm] de espesor.

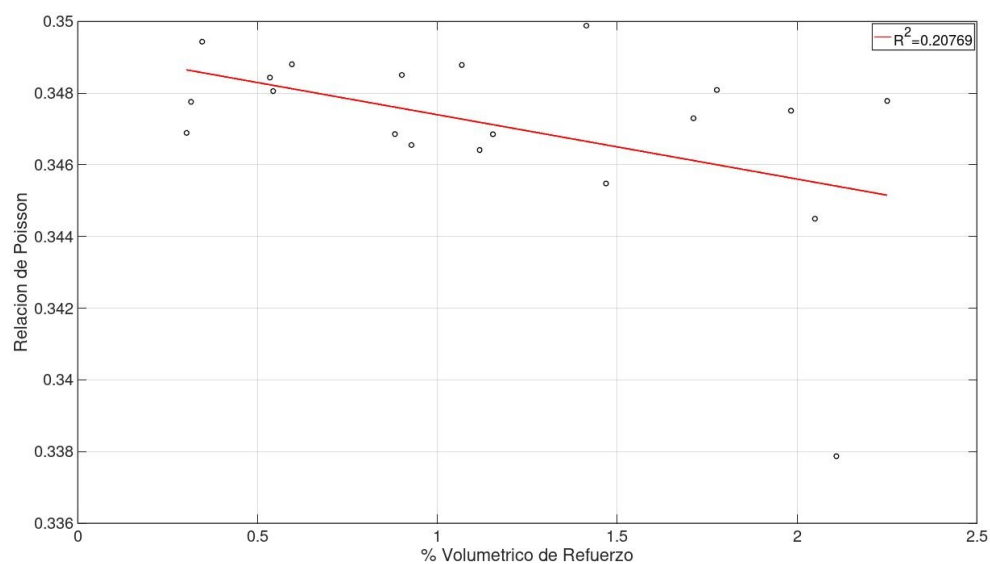


Figura 5.12: Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo para el grupo de RVE de Al_4C_3 de 15 [nm] de espesor.

En la siguiente figura (5.13) queda patente, no sólo el rango de variabilidad de la relación de Poisson para todos los RVE, sino también la distribución del mismo, sin tendencia clara ni para el % de refuerzo ni para el espesor de la capa de Al_4C_3 en los refuerzos.

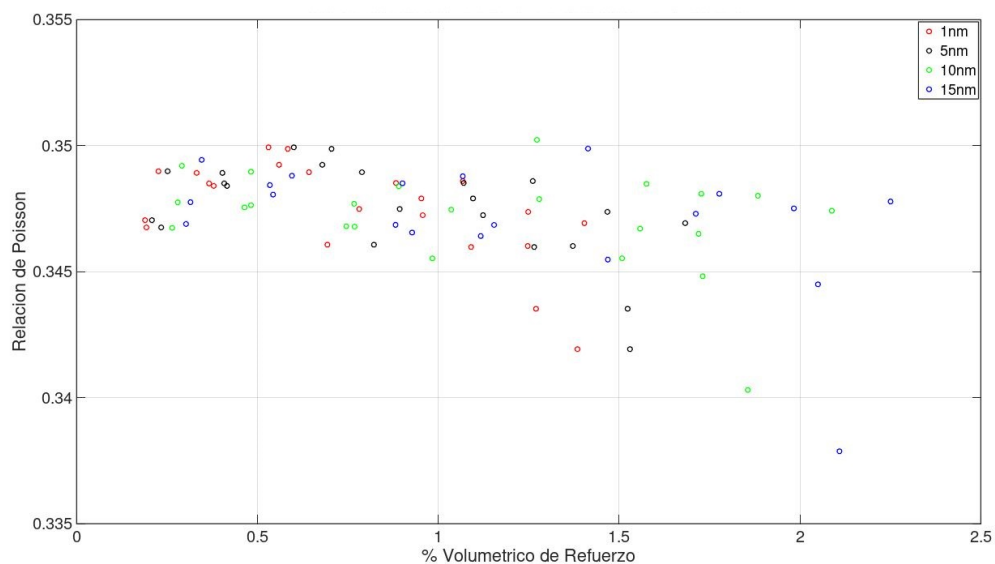


Figura 5.13: Relación de Poisson vs % volumétrico de refuerzo, agrupados según color para diferentes espesores de carburo de aluminio presente en los refuerzos.

6. Conclusiones

El presente trabajo logra establecer, mediante MEF, un modelo que permite la caracterización de las propiedades mecánicas de las matrices de Al-12wt %Si reforzadas con NTC. Aunque en la actualidad existen estudios que exploran a los NTC como material de refuerzo, no se ha contemplado con anterioridad el fenómeno aquí descrito; la formación en la interfaz entre matriz y refuerzo de una capa de Al_4C_3 (carburo de aluminio). Si bien ha sido estudiada la influencia mecánica de este carburo en un refuerzo individual de NTC, este trabajo aporta antecedentes respecto de su influencia en un material más cercano a la realidad, que contiene una distribución de múltiples refuerzos, todos afectos al carburo.

Respecto de la modelación de los elementos estudiados, se concluye que el método DEM es una herramienta idónea para representar la distribución de las fibras en el compuesto, así como el método MEF es adecuado para lograr que los detalles presentes en las diferentes fases de las muestras logren interactuar entre sí e influyan de forma más realista en las características mecánicas finales de las mismas. Esto se ve reflejado en la aparente aleatoriedad de los coeficientes de Poisson presentados, esperable para un material cuyas fibras están distribuidas aleatoriamente, de diferente manera en cada espécimen.

Bajo la condición ideal que en todos los refuerzos de NTC se genere el mismo espesor de Al_4C_3 , y que la unión entre matriz, refuerzo y carburo sea perfecta, se puede decir de los resultados que, añadir refuerzos puede aumentar el módulo elástico de la aleación matriz desde 77 [GPa] hasta 80.5-84 [GPa], según los datos proyectados de las simulaciones para la cantidad de refuerzo incorporado (desde 0.1894 % hasta 2.25 %), lo que significa, como era de esperarse, que a mayor cantidad de refuerzo, mayor es la oposición del material a ser deformado. Sin embargo, se observa que el Al_4C_3 contrarresta este efecto, es decir, la presencia de esta interfaz debilita la acción reforzante de los NTC.

Cuantitativamente, al considerar que la unión entre cáscara y refuerzo, y entre cáscara y matriz, son perfectas, se penalizan de forma mínima las propiedades mecánicas del material en cuestión ante la presencia del carburo. Es de esperar que una situación más realista, donde se conozcan las fuerzas de unión entre ambas interfaces, se de una mayor reducción de la capacidad reforzante de los refuerzos de NTC a la observada en este trabajo.

Gracias al MEF es posible morigerar en gran medida los costos relacionados a investigar un material de este tipo, relacionados con las horas-hombre requeridas tanto para la realización del ensayo como para la fabricación de las probetas, relacionados con los equipos para fabricarlas y ensayarlas uniaxialmente, y las instalaciones requeridas para ello. Sin embargo, para realizar un análisis adecuado por simulación se requiere un equipo computacional de amplios recursos además de una licencia

adecuada de Ansys que permita trabajos de gran envergadura, además de una teoría adecuada que permita representar de forma realista el problema en el programa de simulación.

Lineamientos futuros: A considerar como futuras líneas de investigación se pueden mencionar los siguientes tópicos:

- Realizar experimentos orientados a validar los resultados de este trabajo.
- Indagar una relación cuantitativa entre los parámetros de fabricación del material compuesto y el espesor de la capa de carburo formada y su distribución en el material, mediante experimentos y trabajo de laboratorio.
- Indagar mediante experimentos la relación directa entre los parámetros productivos y las propiedades mecánicas del material compuesto adicionales a la rigidez, como por ejemplo, la dureza, la tenacidad, el mecanismo de falla, etc.
- Determinar alguna relación empírica entre presencia y cantidad del carburo de aluminio con la bondad de la unión entre las fases de este material compuesto.
- Estudiar la distribución del refuerzo de este material según los parámetros productivos en miras de generar un modelo computacional que replique dicha distribución.

A. Anexos A

A continuación se adjuntan la totalidad de los resultados.

A.1. Resumen de resultados

En esta sección se muestran los resultados tabulados correspondientes a los RVE en deformación. Éstos fueron sometidas a una deformación impuesta del 1 %, lo cual fue configurado dentro del programa como 4 [cm], puesto que el largo del RVE simulado era 4 [m], atendiendo a las consideraciones mencionadas en capítulos anteriores.

A.1.1. Tabla de resultados para RVE con 1 [nm] de Al_4C_3

1 [nm]			
%	Reacción Tapa [GN]	Y [GPa]	Poisson
0,1894	15,806	80,4993	0,347042
0,1932	15,812	80,5299	0,346754
0,2264	15,823	80,5859	0,348983
0,332	15,843	80,6877	0,348918
0,3664	15,859	80,7692	0,348499
0,3791	15,866	80,8049	0,348402
0,5307	15,913	81,0442	0,349932
0,5599	15,932	81,1410	0,34924
0,5841	15,927	81,1155	0,349871
0,6427	15,978	81,3753	0,348945
0,6936	15,969	81,3294	0,346068
0,7815	15,994	81,4568	0,347485
0,8833	16,027	81,6248	0,348517
0,9534	16,04	81,6910	0,347903
0,9572	16,058	81,7827	0,347239
1,068	16,112	82,0577	0,348594
1,0909	16,111	82,0526	0,345976
1,2475	16,143	82,2156	0,346017
1,2488	16,153	82,2666	0,347372
1,2704	16,157	82,2869	0,343526
1,385	16,21	82,5569	0,341925
1,4041	16,196	82,4856	0,346924

Tabla A.1: resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.

A.1.2. Tabla de resultados para RVE con 5 [nm] de Al_4C_3

5 [nm]			
%	Reaccion Tapa [GN]	Y [GPa]	Poisson
0,2085	15,81	80,520	0,347682
0,234	15,812	80,530	0,348705
0,2518	15,817	80,555	0,348708
0,4033	15,866	80,805	0,350296
0,4084	15,884	80,897	0,348102
0,4161	15,862	80,785	0,34781
0,6007	15,922	81,090	0,347126
0,6796	15,938	81,172	0,347938
0,7051	15,947	81,217	0,349014
0,7891	15,989	81,431	0,346438
0,8222	15,974	81,355	0,346422
0,8935	16,016	81,569	0,347023
1,0705	16,062	81,803	0,348352
1,0962	16,074	81,864	0,346759
1,1240	16,092	81,956	0,347186
1,2615	16,126	82,129	0,347637
1,2653	16,154	82,272	0,347224
1,3722	16,145	82,226	0,348103
1,4678	16,202	82,516	0,346454
1,5238	16,209	82,552	0,350372
1,5302	16,199	82,501	0,34631
1,6829	16,278	82,903	0,345496

Tabla A.2: Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.

A.1.3. Tabla de resultados para RVE con 10 [nm] de Al_4C_3

10 [nm]			
%	Reacción Tapa [GN]	Y [GPa]	Poisson
0,26450	15,811	80,525	0,346738
0,27980	15,813	80,535	0,347747
0,29130	15,831	80,627	0,349199
0,46440	15,876	80,856	0,347551
0,48230	15,893	80,942	0,348965
0,48232	15,886	80,907	0,347635
0,74580	15,950	81,233	0,346801
0,76750	15,959	81,279	0,347691
0,76880	15,955	81,258	0,346786
0,89100	15,997	81,472	0,348387
0,98390	16,012	81,548	0,345526
1,03610	16,030	81,640	0,34746
1,27300	16,093	81,961	0,350228
1,27930	16,104	82,017	0,347878
1,50850	16,169	82,348	0,34553
1,55820	16,153	82,267	0,346707
1,57600	16,167	82,338	0,348482
1,71990	16,248	82,750	0,346502
1,72750	16,270	82,862	0,348088
1,73130	16,253	82,776	0,344816
1,88400	16,277	82,898	0,348011
1,85610	16,285	82,939	0,340306
2,08840	16,310	83,066	0,347414

Tabla A.3: Resultados para RVE de Al-12wt%Si reforzados con NTC afectados por una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.

A.1.4. Tabla de resultados para RVE con 15 [nm] de Al_4C_3

15 [nm]			
%	Reacción Tapa [GN]	Y [GPa]	Poisson
0,30270	15,828	80,611	0,34689
0,3151	15,823	80,586	0,347756
0,346	15,828	80,611	0,349435
0,5345	15,883	80,891	0,348433
0,5434	15,891	80,932	0,348056
0,5956	15,898	80,968	0,348805
0,8821	15,957	81,268	0,346857
0,9012	15,966	81,314	0,348506
0,9279	15,970	81,335	0,346551
1,068	16,032	81,650	0,348784
1,1176	16,035	81,666	0,346413
1,1545	16,052	81,752	0,346853
1,4143	16,107	82,032	0,349882
1,469	16,155	82,277	0,345479
1,5187	15,497	78,926	0,327682
1,7122	16,188	82,445	0,347298
1,7772	16,216	82,587	0,348088
1,9554	15,620	79,552	0,326953
1,9834	16,288	82,954	0,347509
2,05	16,271	82,868	0,344496
2,1095	16,331	83,173	0,337871
2,2508	16,314	83,087	0,347782

Tabla A.4: Resultados para RVE de Al-12wt %Si reforzados con NTC afectados por una capa de 15 nm de Al_4C_3 . %: Porcentaje volumétrico de refuerzo, Reacción Tapa: fuerza de reacción en la tapa en giganewtons, Y: constante elástica en [GPa], Poisson: Coeficiente de Poisson.

A.2. Resultados

A.2.1. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 1 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo

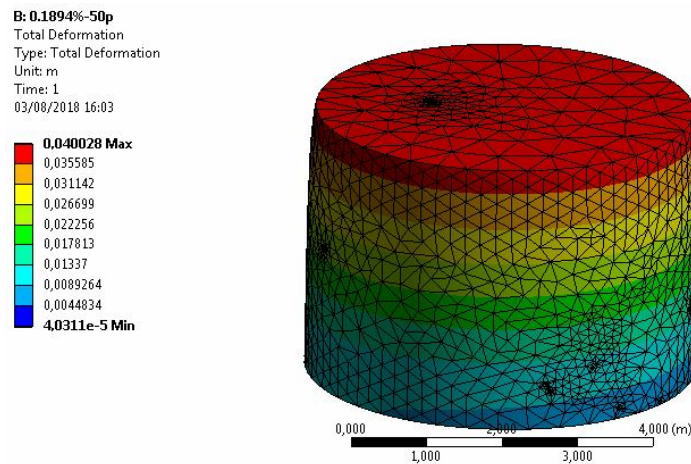


Figura A.1: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1894 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

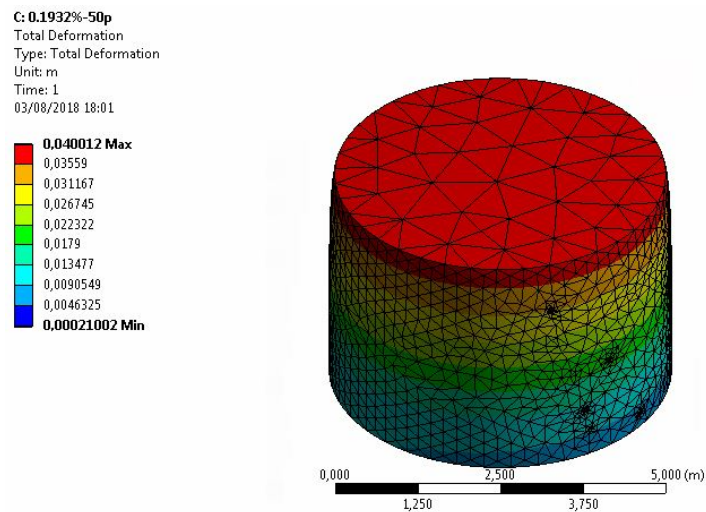


Figura A.2: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.1932 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

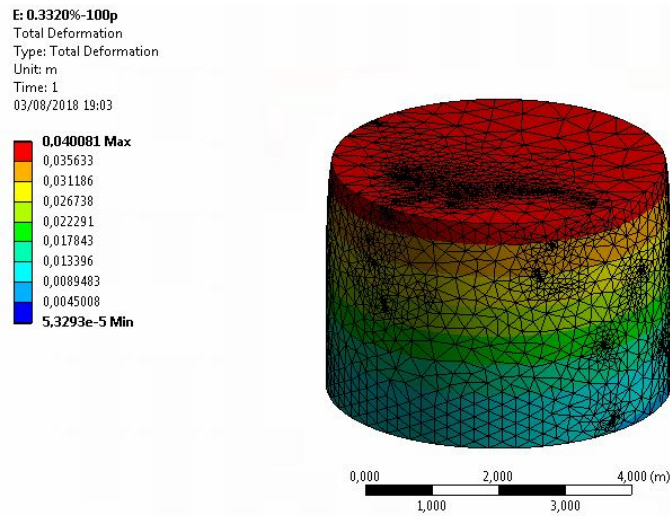


Figura A.3: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.332 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

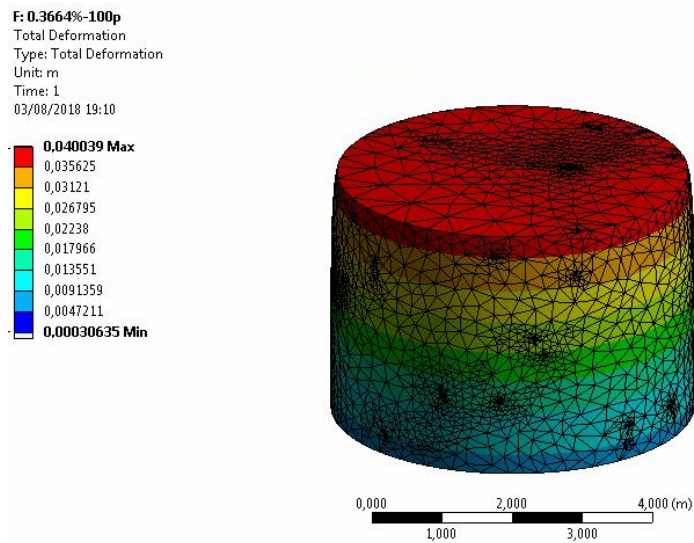


Figura A.4: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3664 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

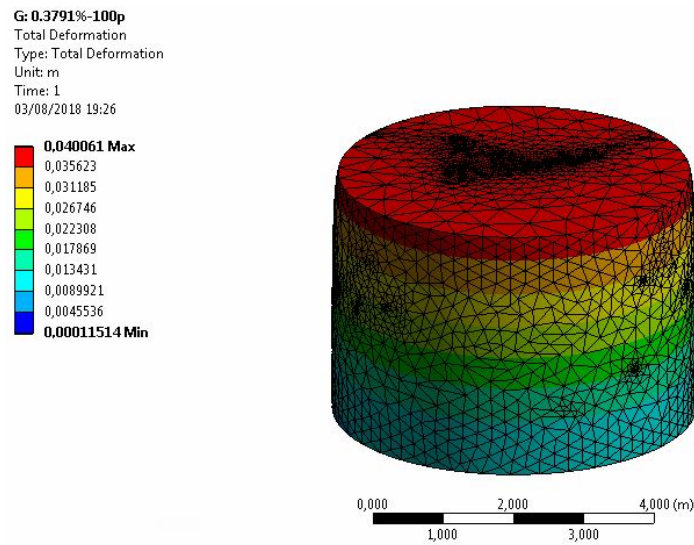


Figura A.5: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3791 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

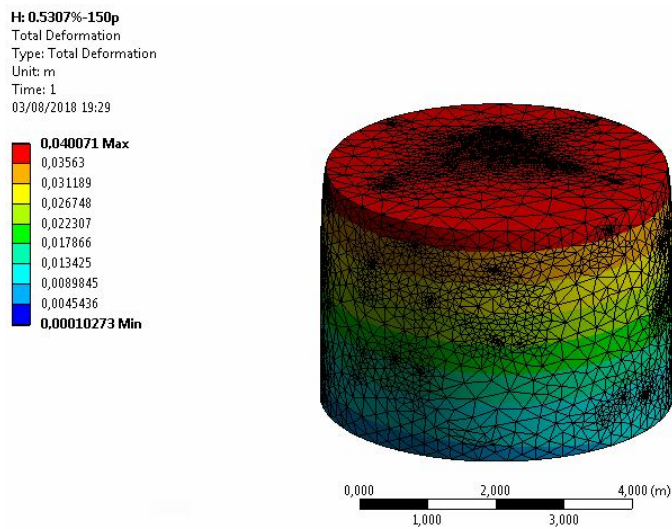


Figura A.6: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5307 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

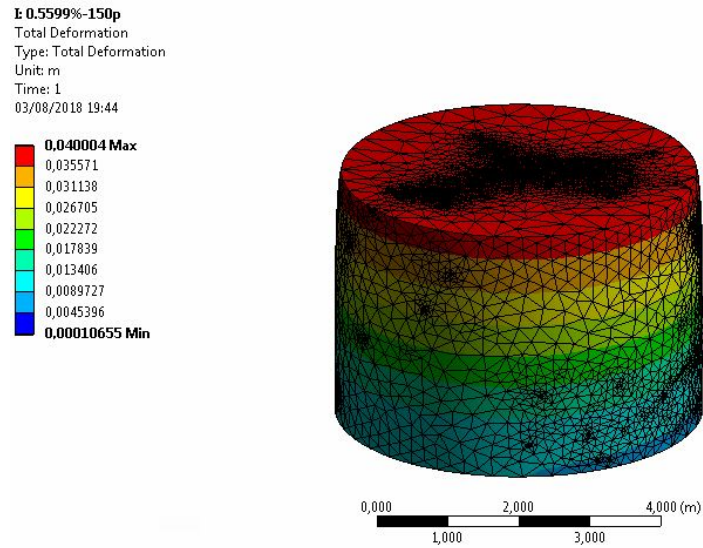


Figura A.7: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5599 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

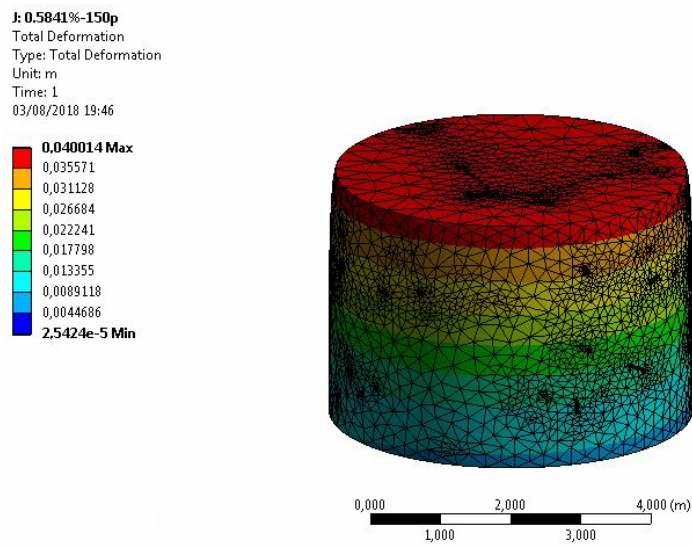


Figura A.8: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5841 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

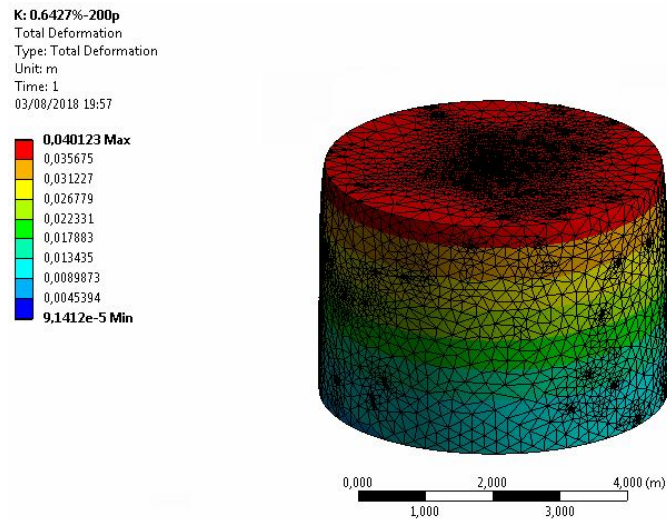


Figura A.9: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6427 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

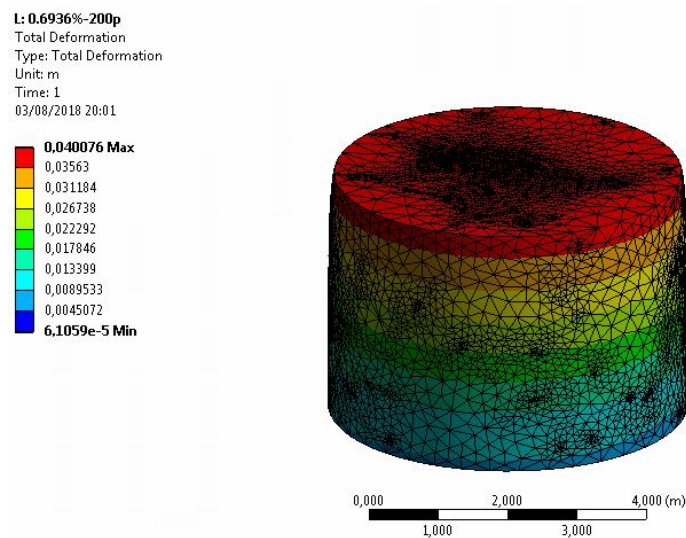


Figura A.10: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6936 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

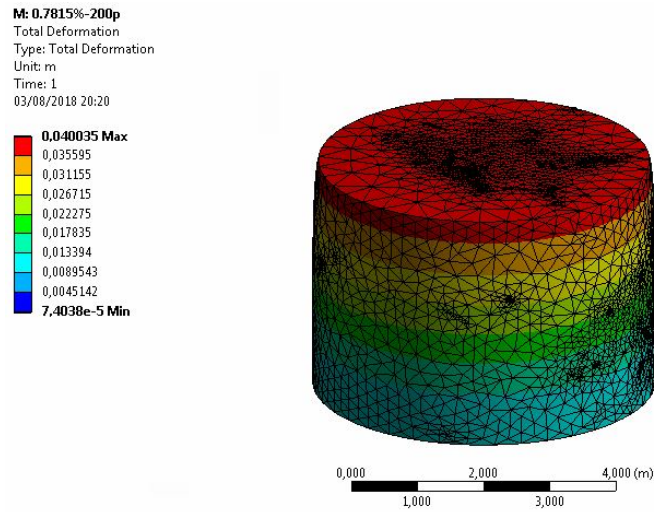


Figura A.11: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7815 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

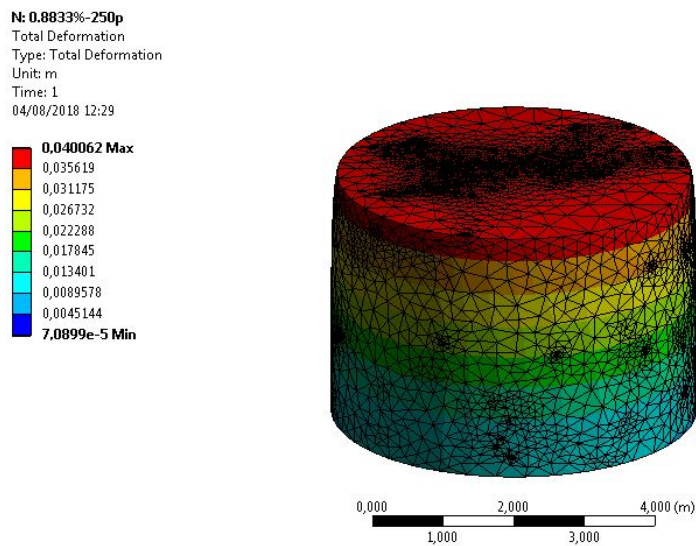


Figura A.12: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8833 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

O: 0.9534%-250p
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 04/08/2018 13:02

0.040069 Max
 0,035627
 0,031184
 0,026742
 0,0223
 0,017857
 0,013415
 0,0089723
 0,0045299
 8.7533e-5 Min

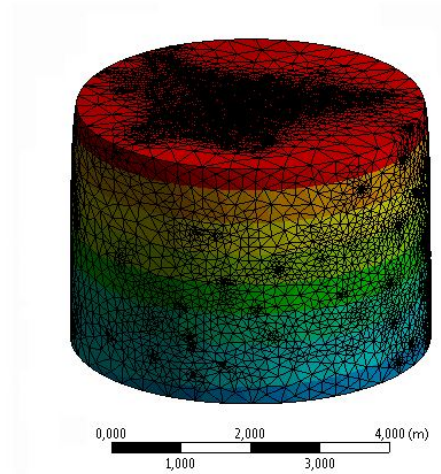


Figura A.13: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9534 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

P: 0.9572%-250p
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 04/08/2018 13:29

0.040125 Max
 0,035677
 0,031229
 0,026781
 0,022332
 0,017884
 0,013436
 0,0089878
 0,0045396
 9.1398e-5 Min

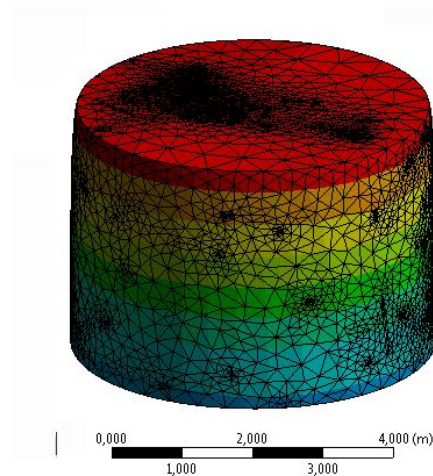


Figura A.14: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9572 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

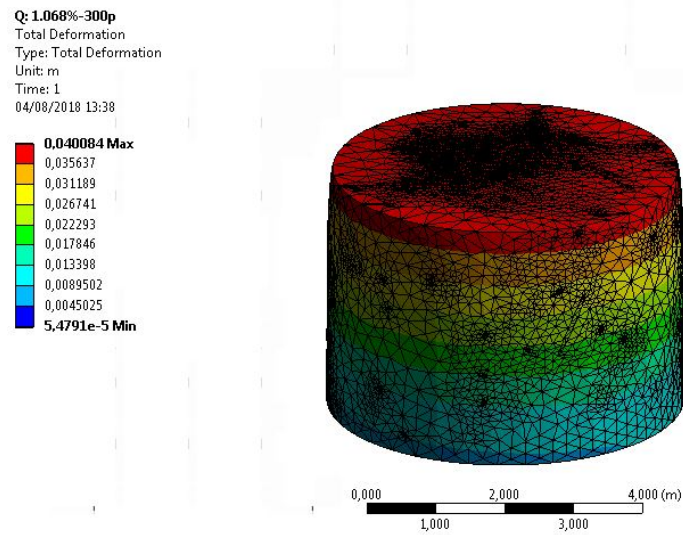


Figura A.15: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.068 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

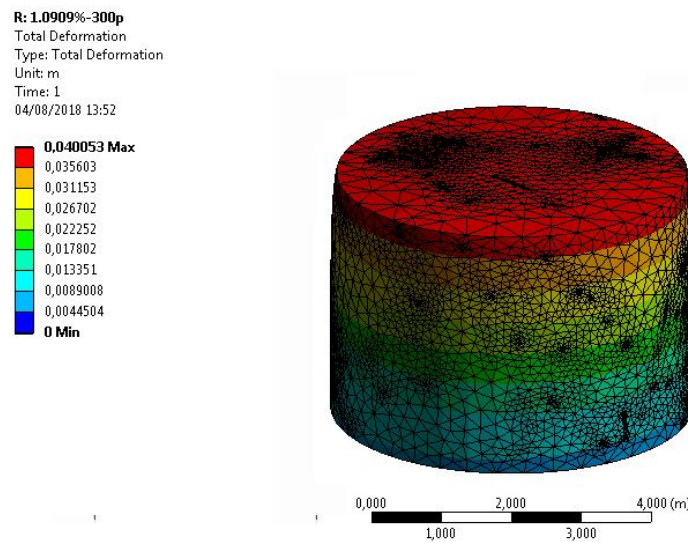


Figura A.16: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0909 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

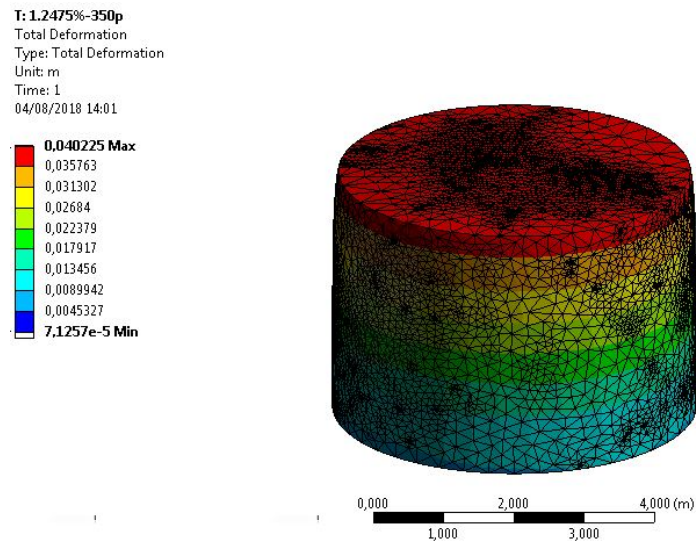


Figura A.17: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2475 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

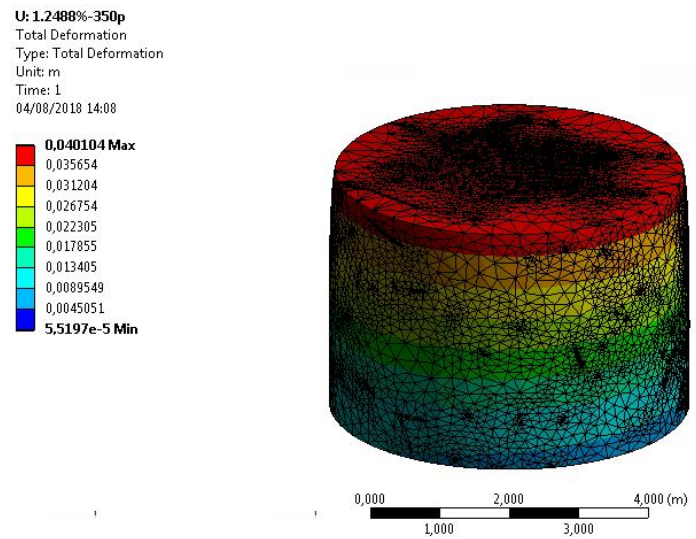


Figura A.18: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2488 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

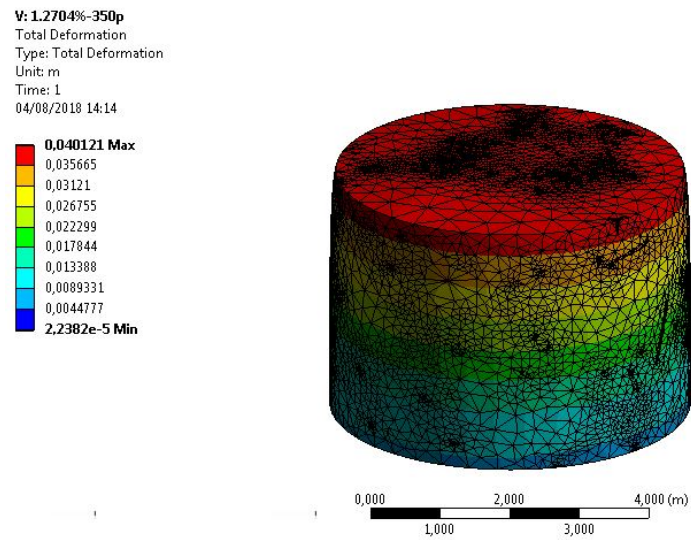


Figura A.19: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2704 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

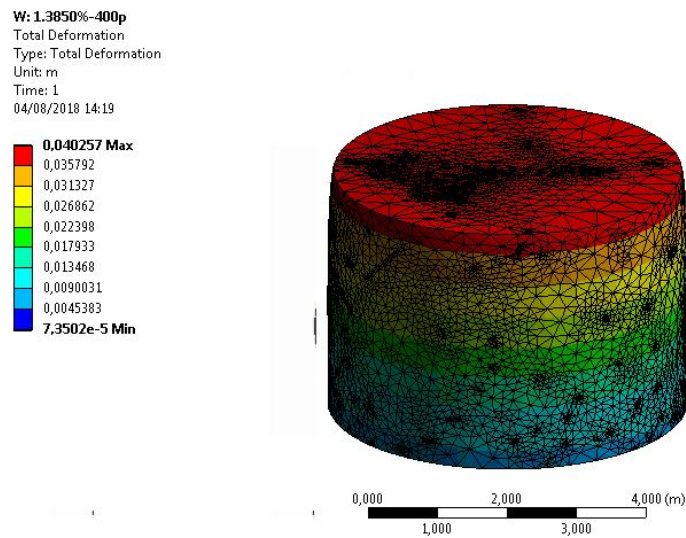


Figura A.20: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.385 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

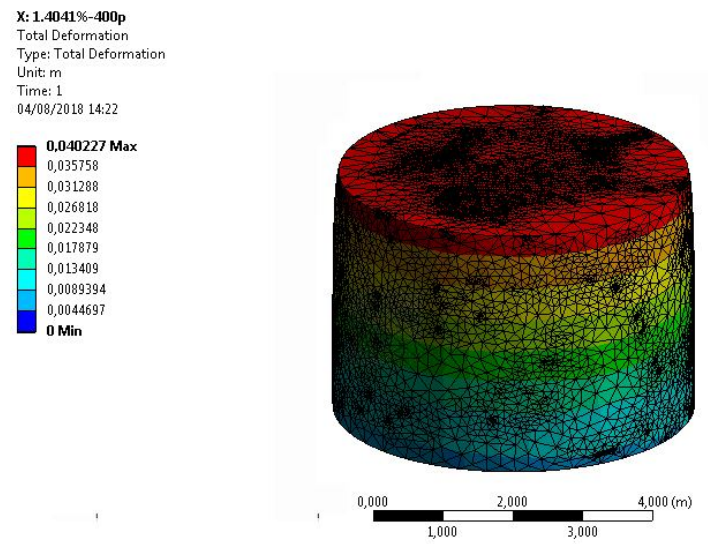


Figura A.21: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4041 % de refuerzo de NTC con una capa de 1 [nm] de Al_4C_3 .

A.2.2. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 5 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo

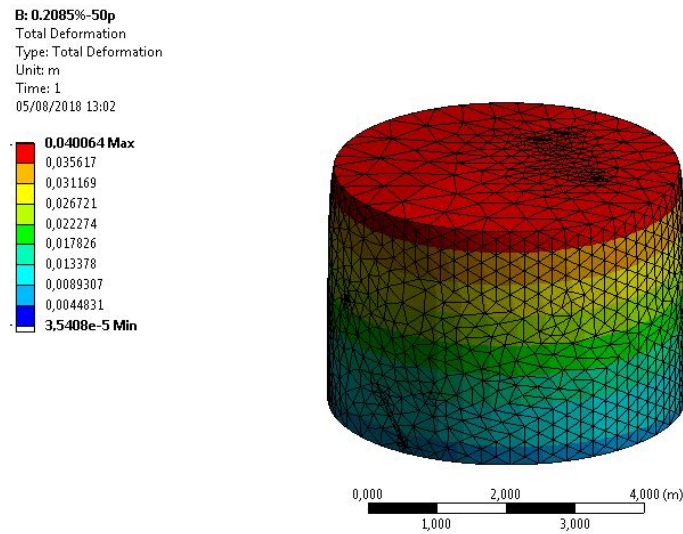


Figura A.22: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2085 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

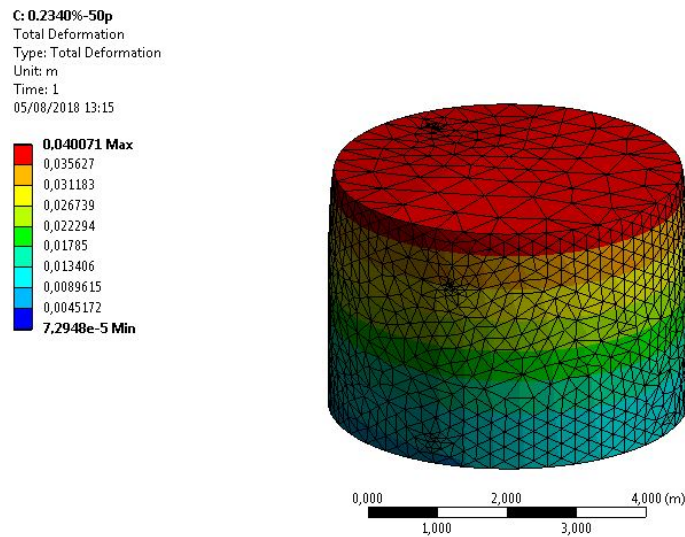


Figura A.23: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2340 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

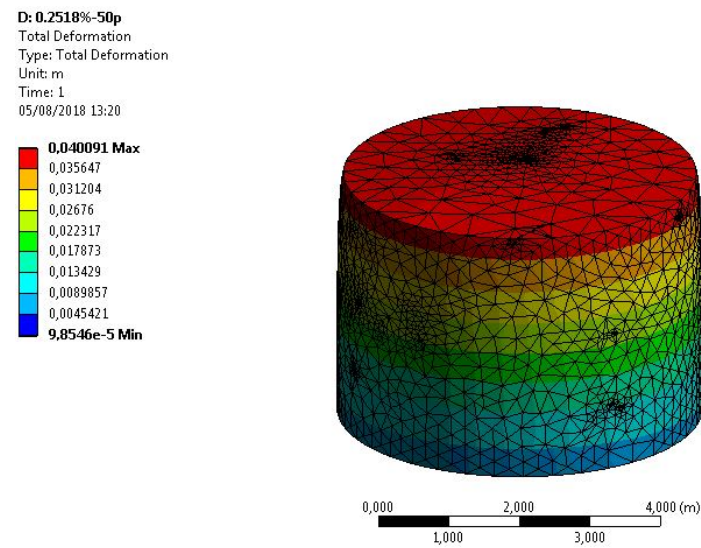


Figura A.24: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2518 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

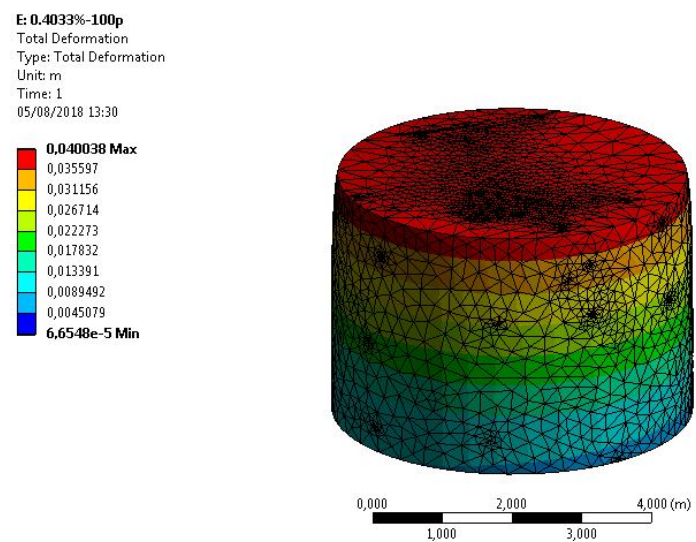


Figura A.25: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4033 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

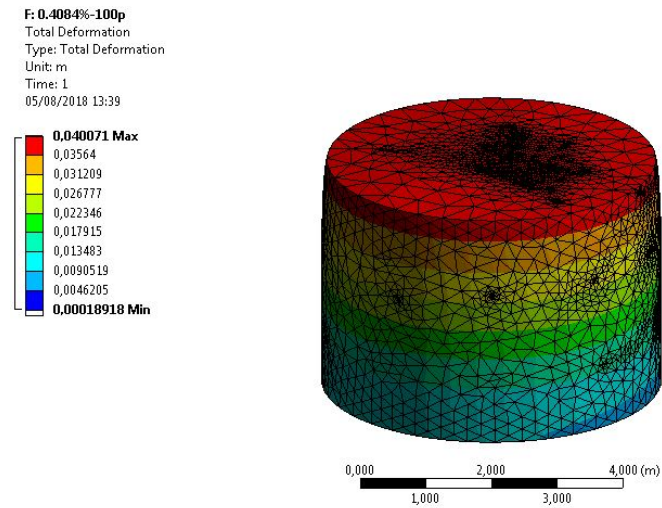


Figura A.26: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4084 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

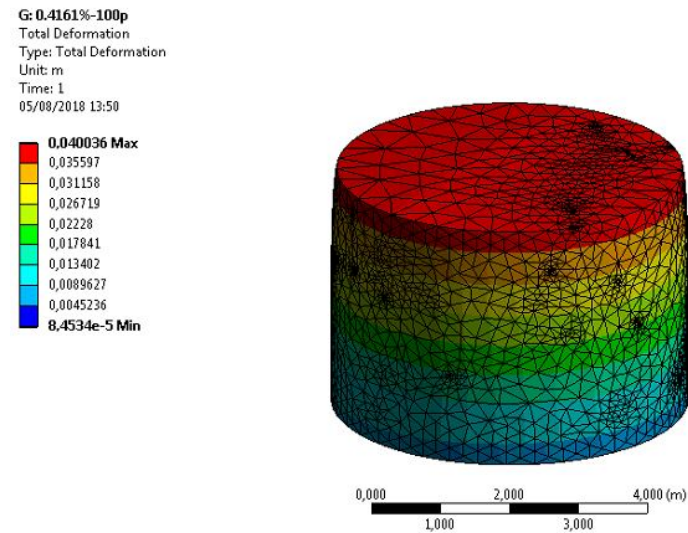


Figura A.27: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4161 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

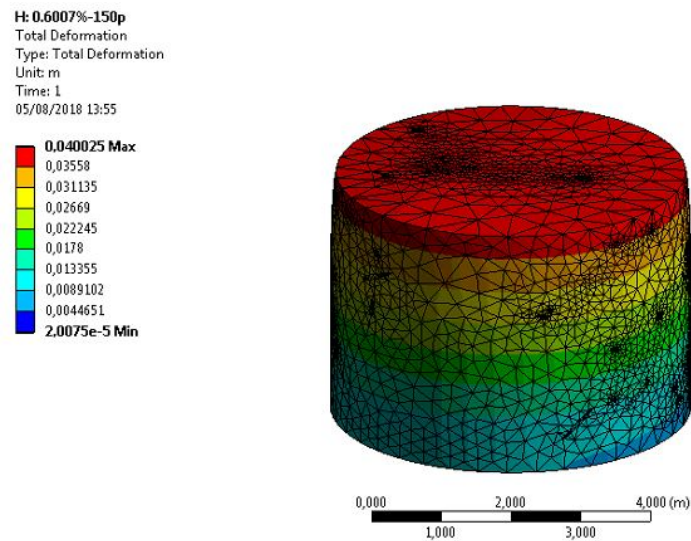


Figura A.28: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6007 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

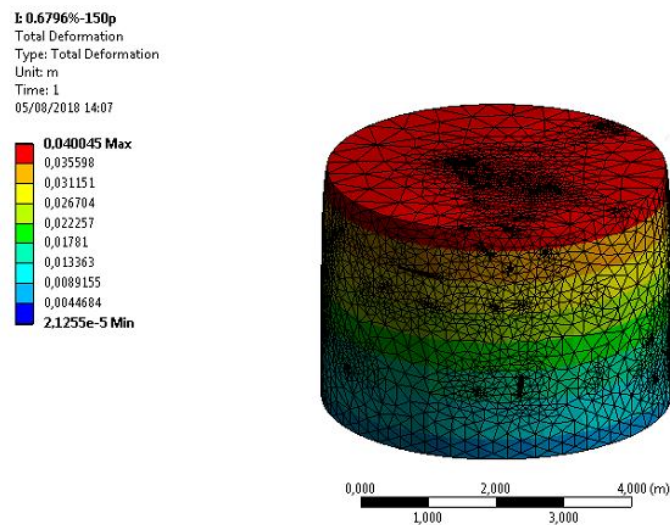


Figura A.29: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.6796 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

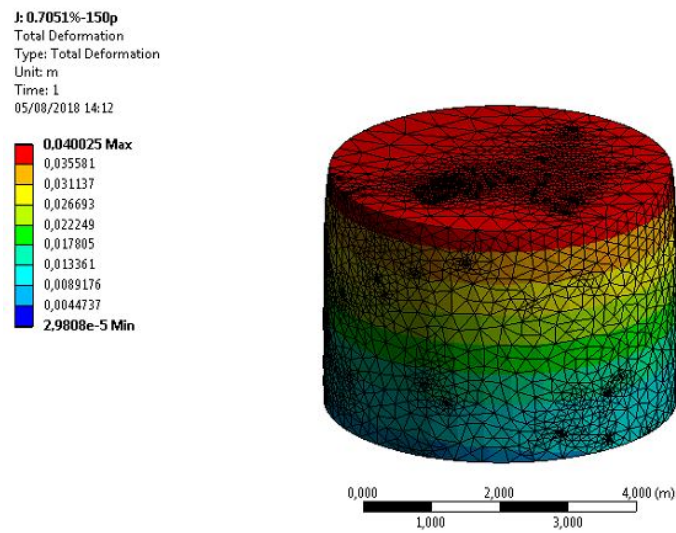


Figura A.30: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7051 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

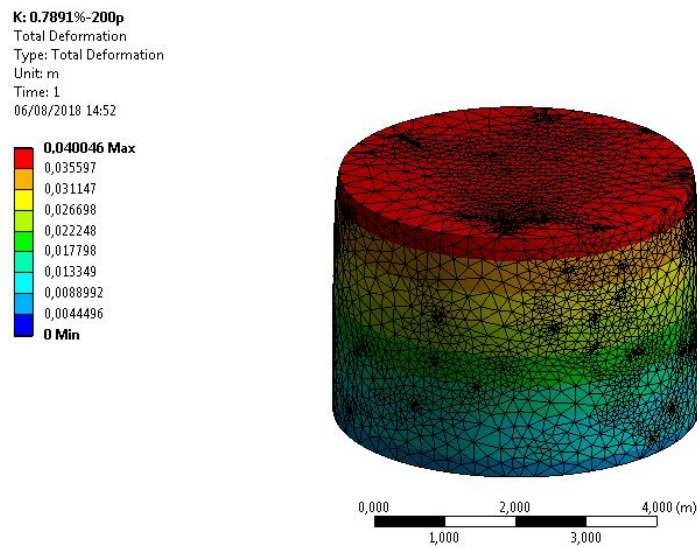


Figura A.31: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7891 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

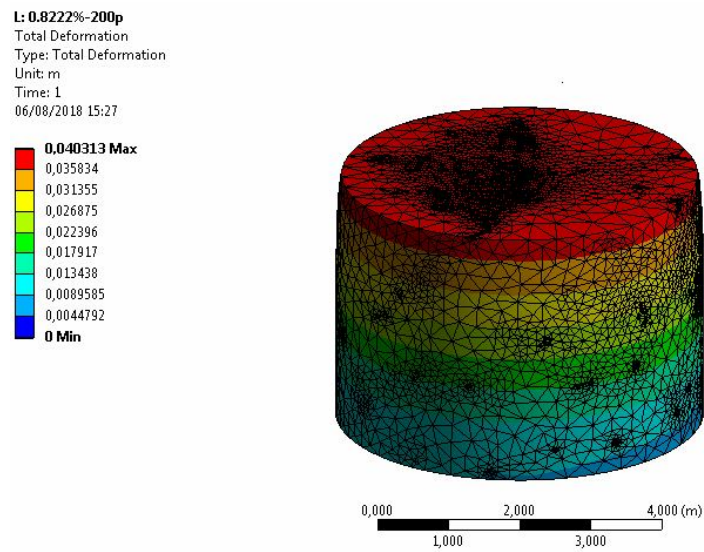


Figura A.32: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8222 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

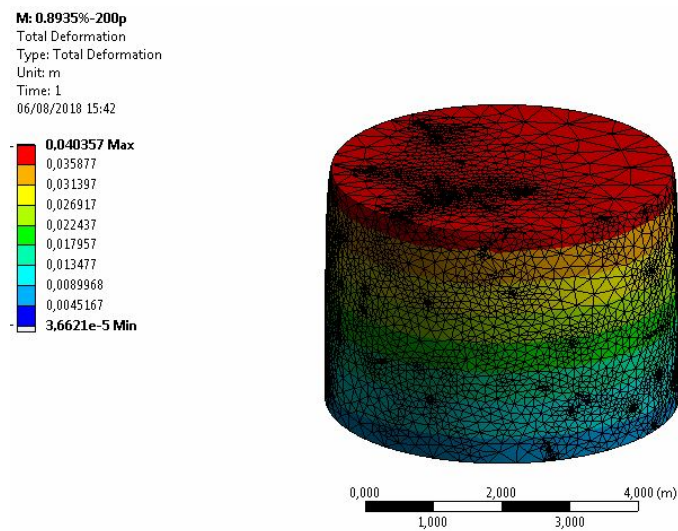


Figura A.33: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8935 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

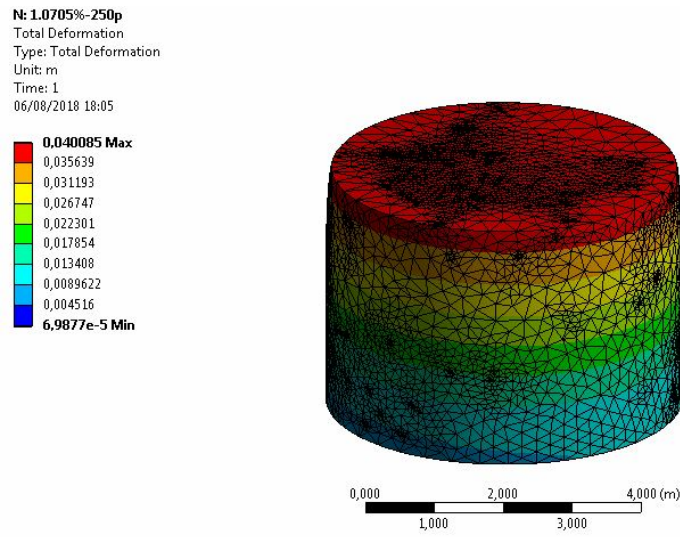


Figura A.34: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0705 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

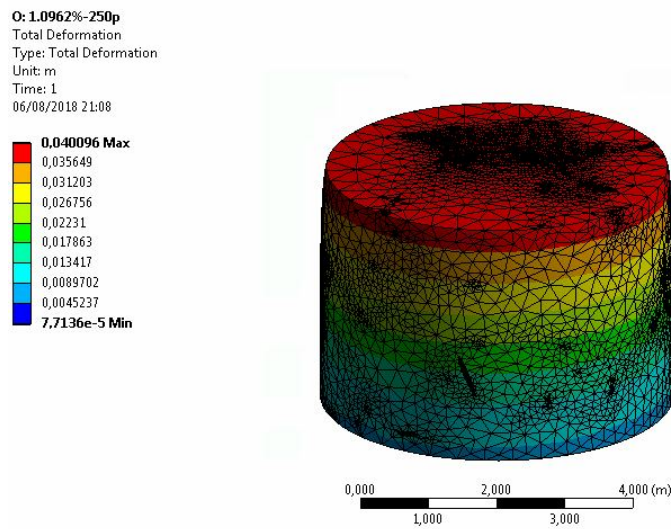


Figura A.35: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0962 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

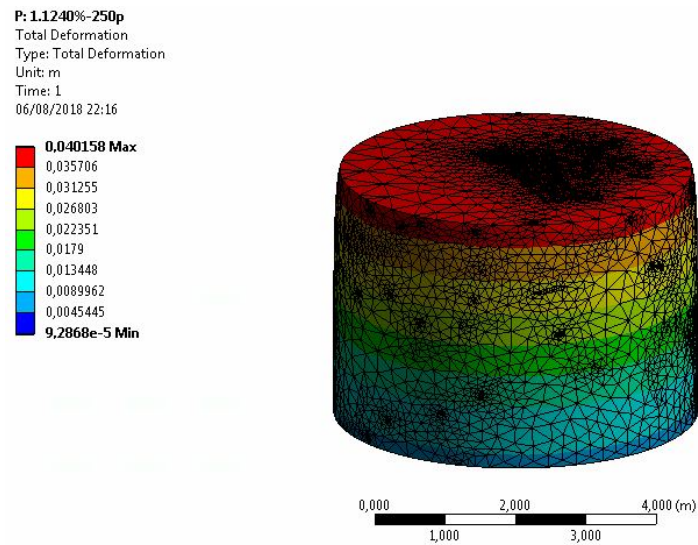


Figura A.36: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1240 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

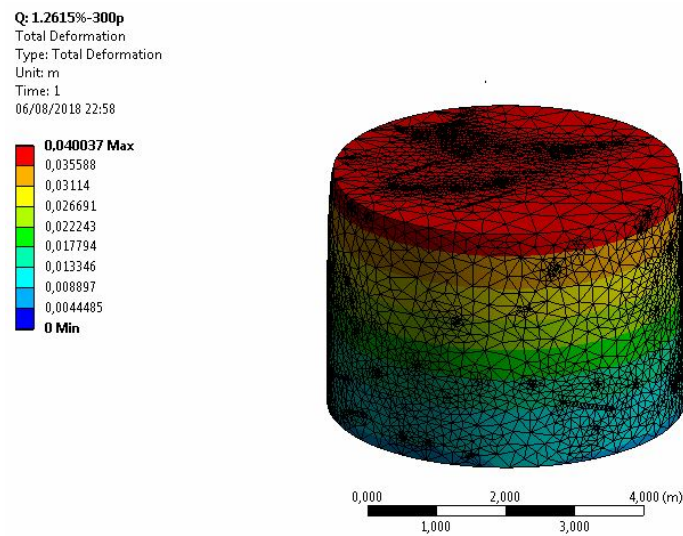


Figura A.37: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2615 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

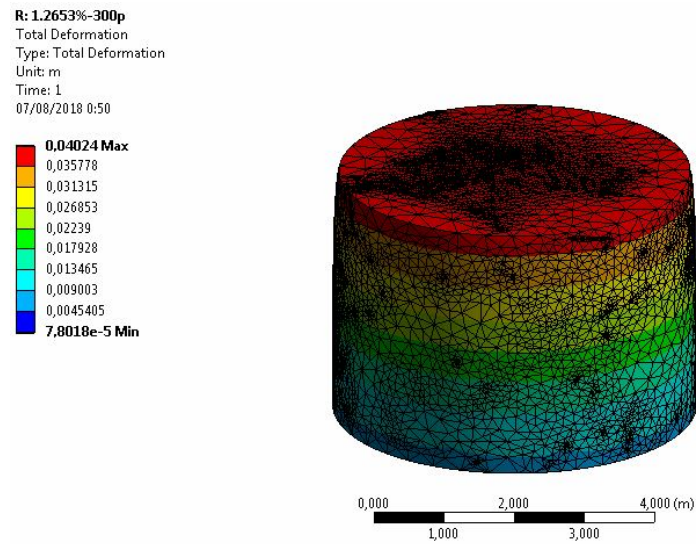


Figura A.38: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2653 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

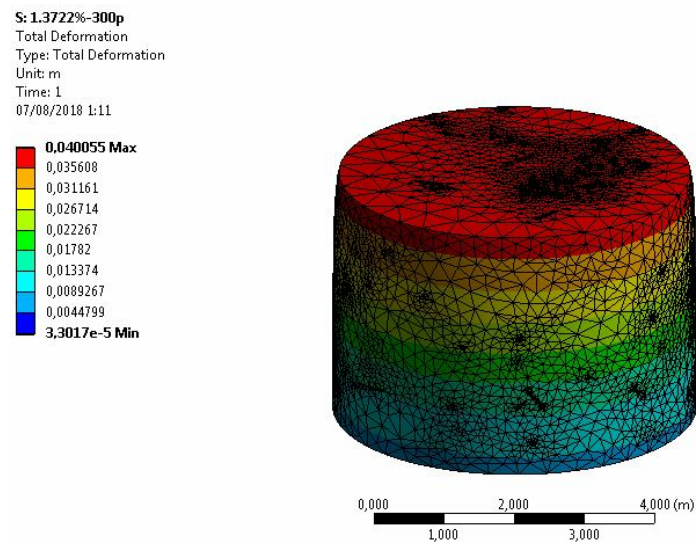


Figura A.39: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.3722 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

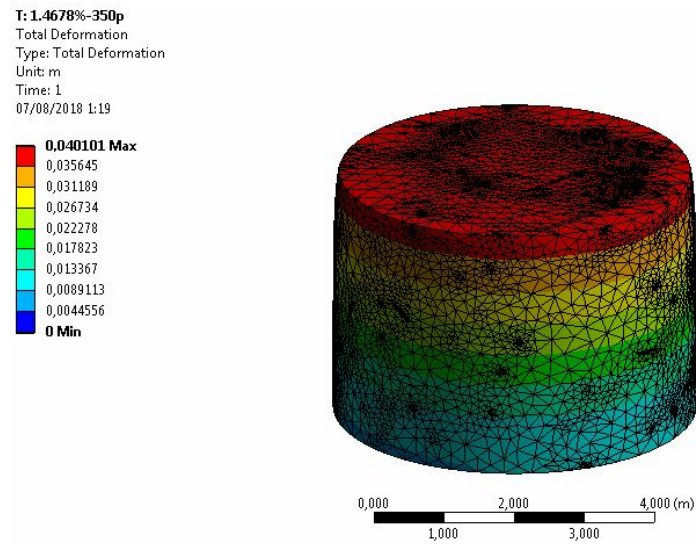


Figura A.40: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4678 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

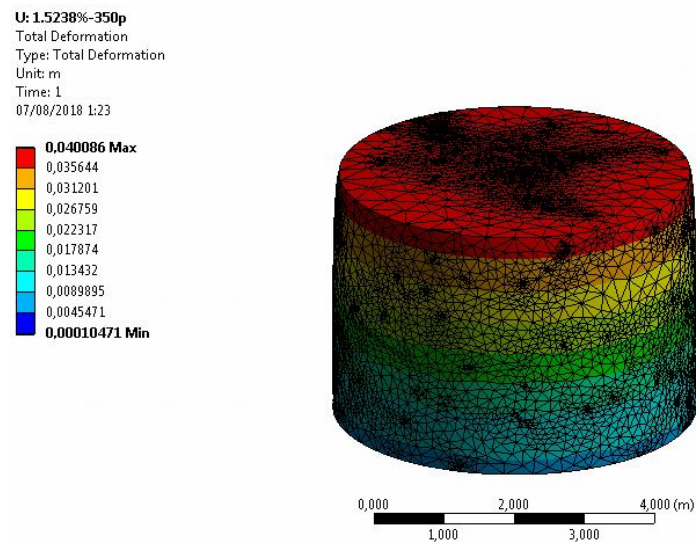


Figura A.41: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5238 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

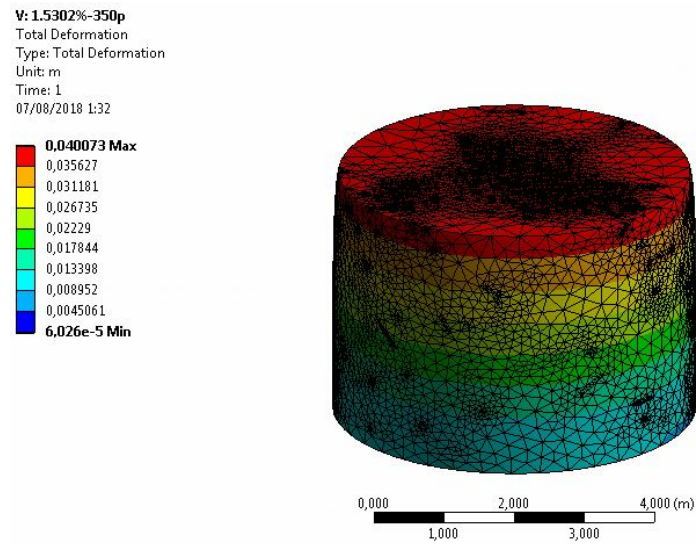


Figura A.42: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5302 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

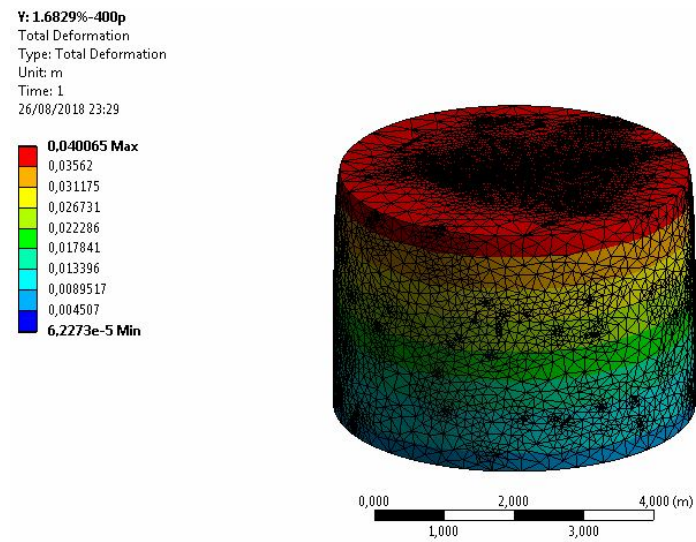


Figura A.43: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.6829 % de refuerzo de NTC con una capa de 5 [nm] de Al_4C_3 .

A.2.3. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 10 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo

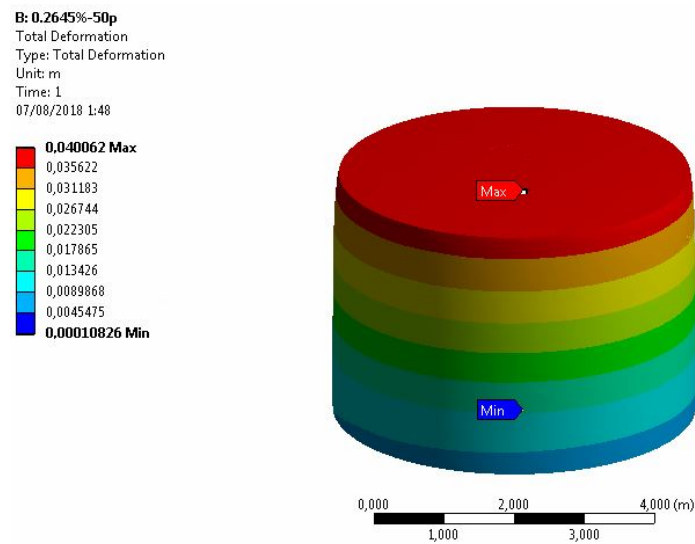


Figura A.44: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2645 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

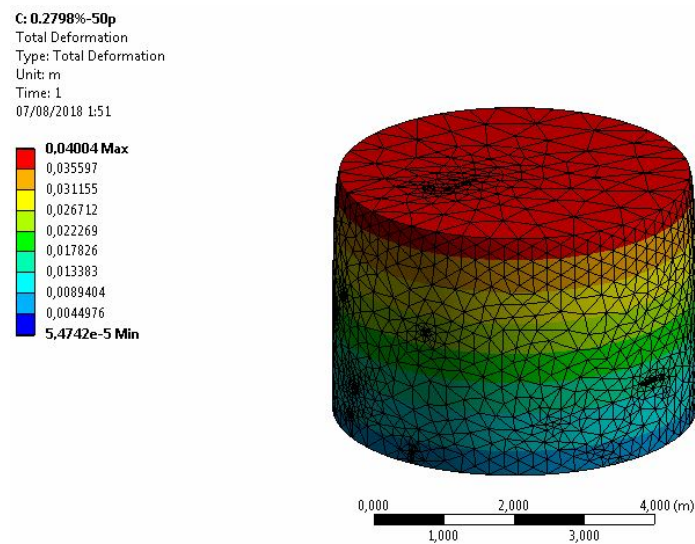


Figura A.45: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2798 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

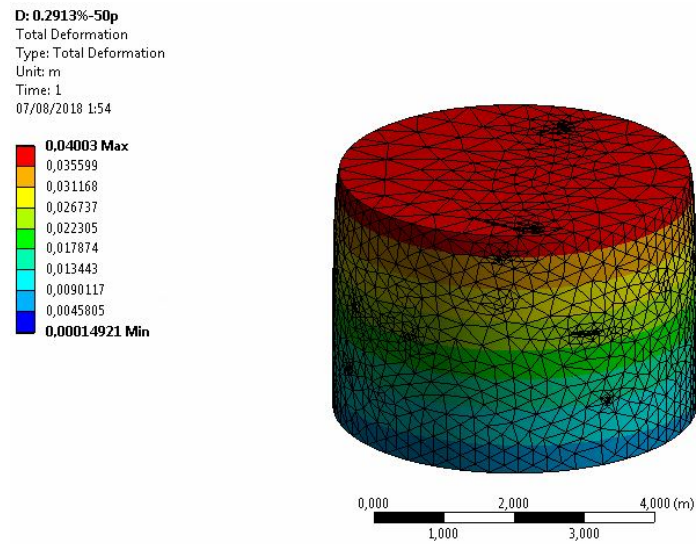


Figura A.46: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.2913 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

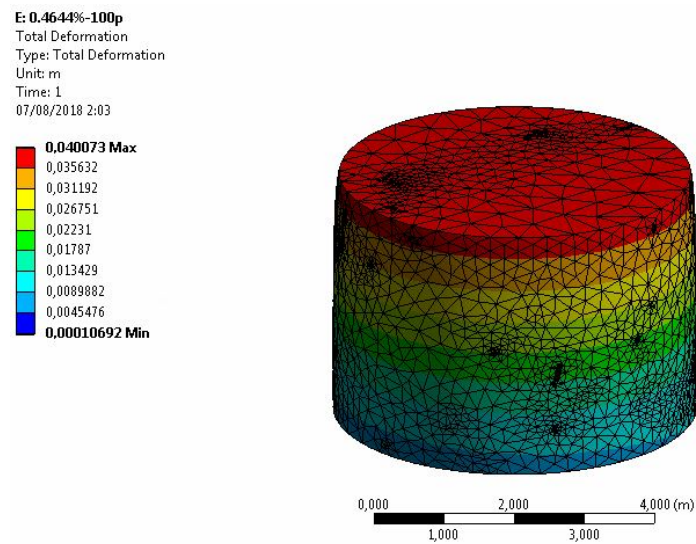


Figura A.47: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4644 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

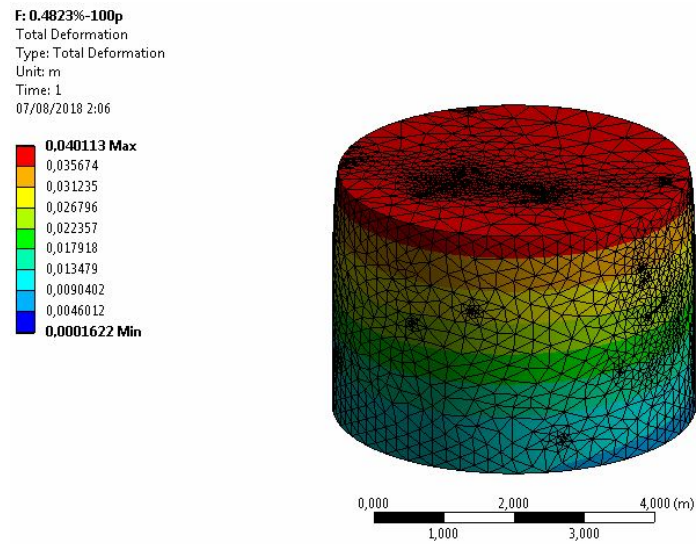


Figura A.48: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4823 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

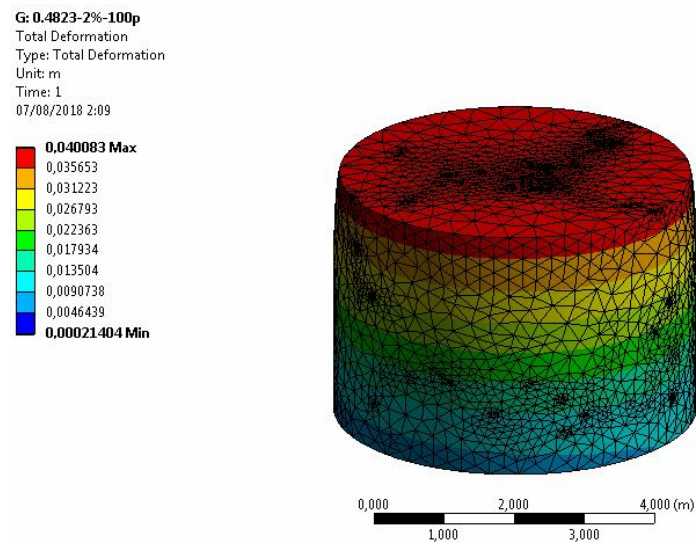


Figura A.49: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.4824 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

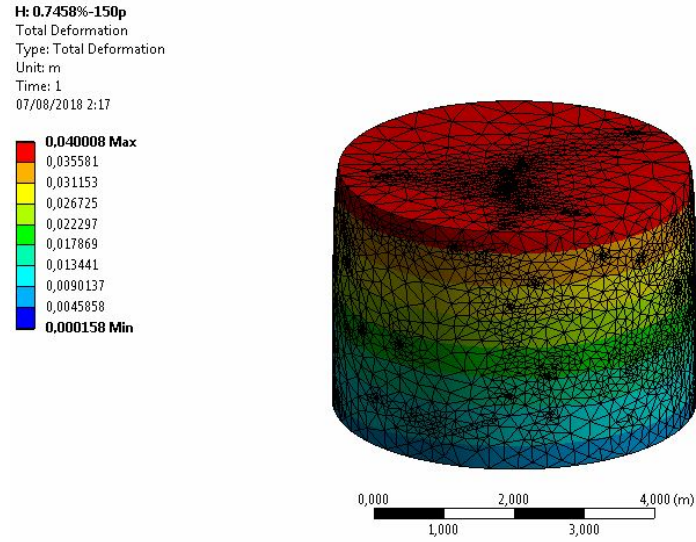


Figura A.50: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7458 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

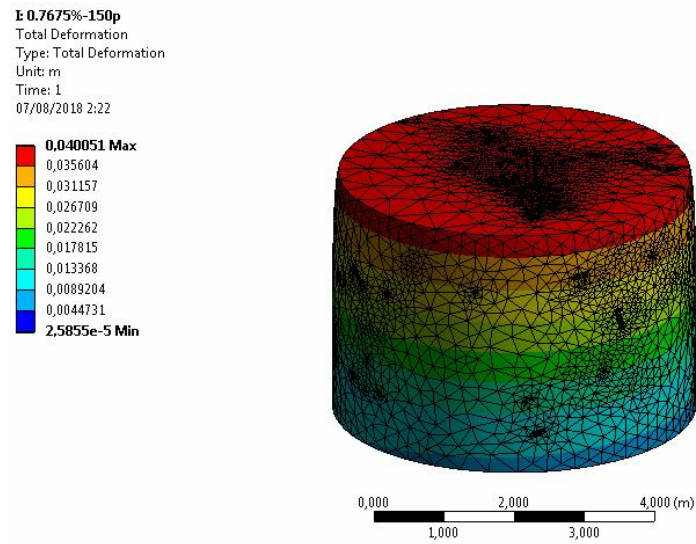


Figura A.51: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7675 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

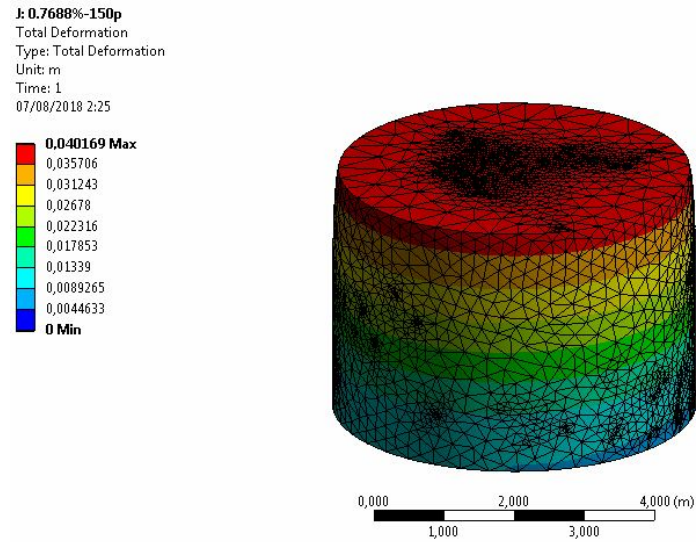


Figura A.52: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.7688 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

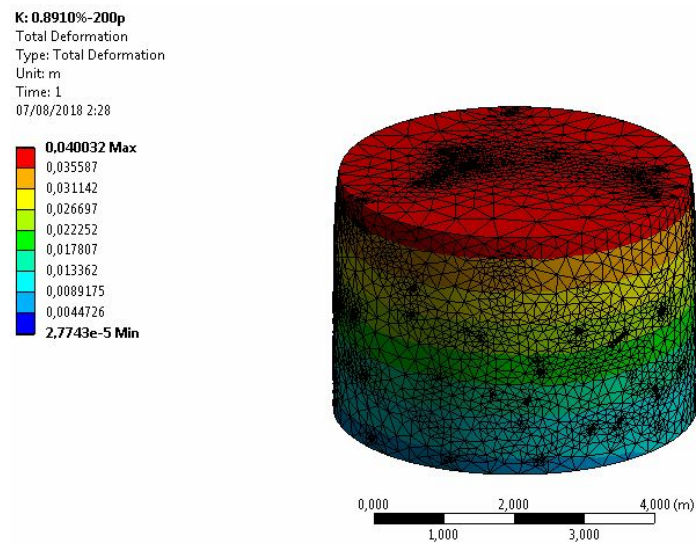


Figura A.53: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8910 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

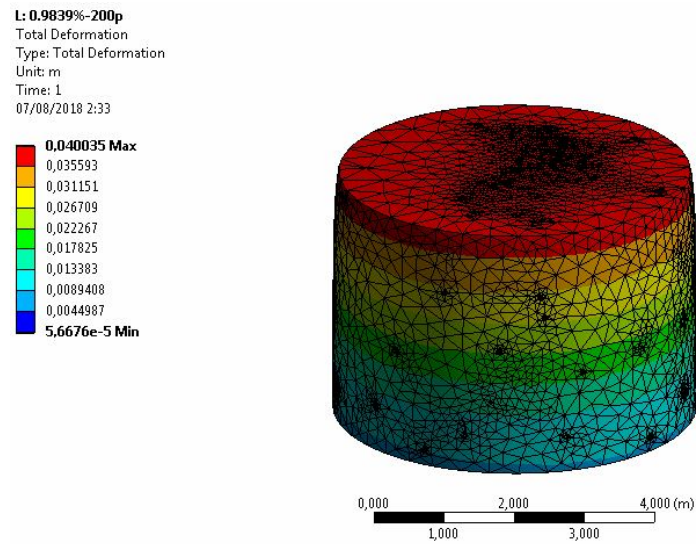


Figura A.54: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9839 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

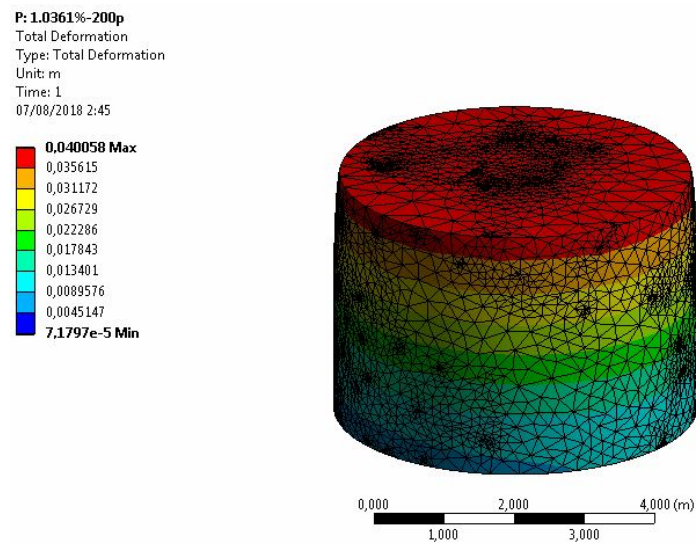


Figura A.55: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0361 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

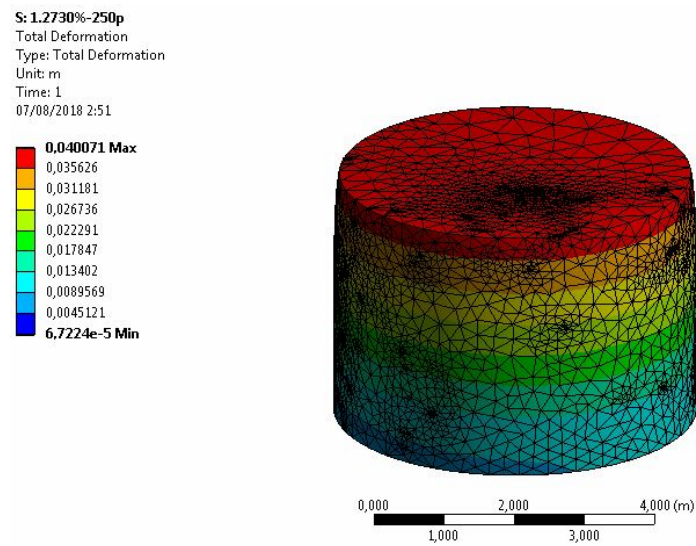


Figura A.56: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2730 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

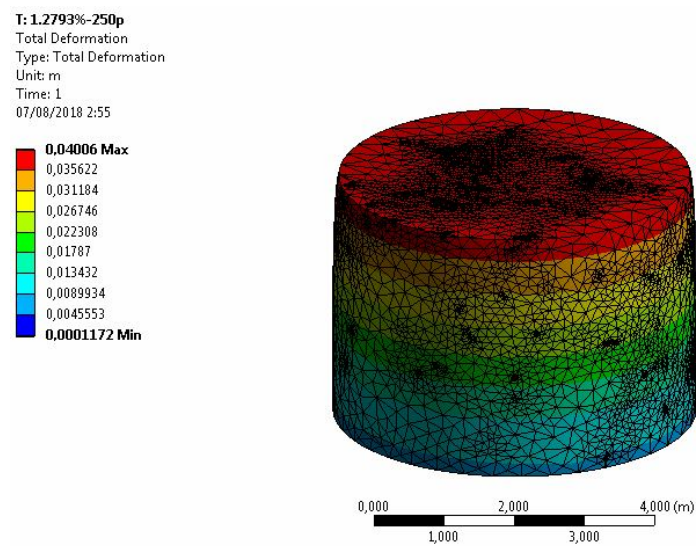


Figura A.57: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.2793 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

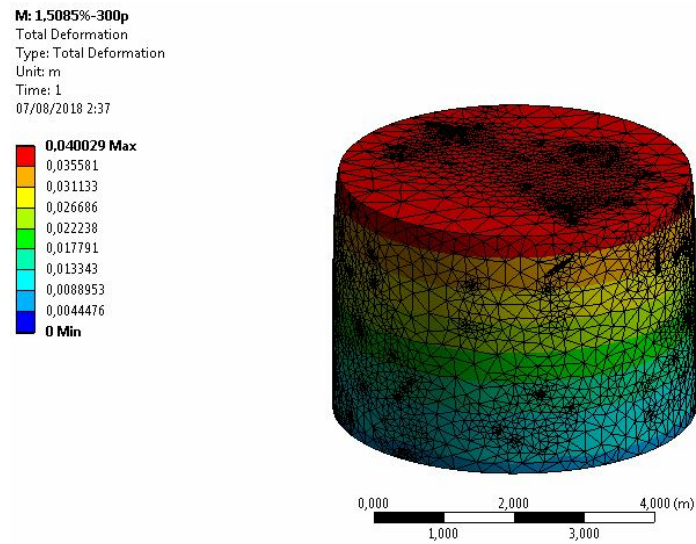


Figura A.58: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5085 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

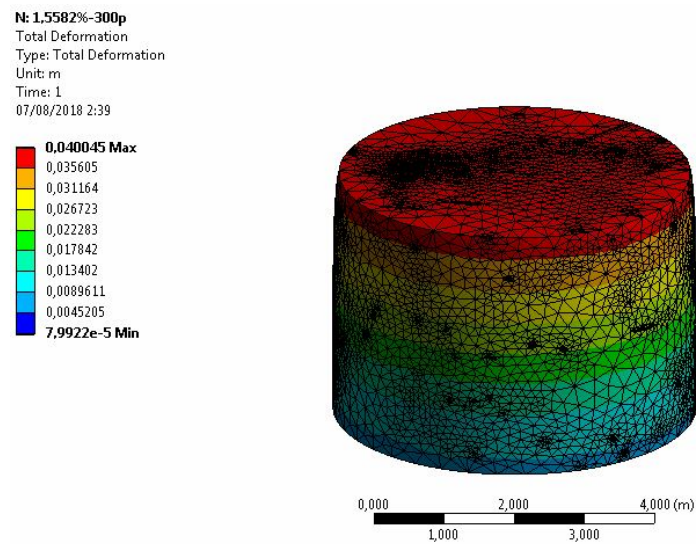


Figura A.59: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5582 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

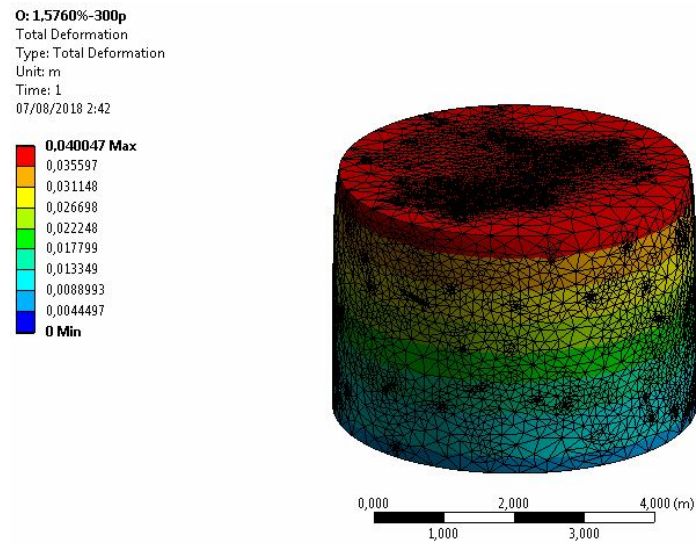


Figura A.60: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5760 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

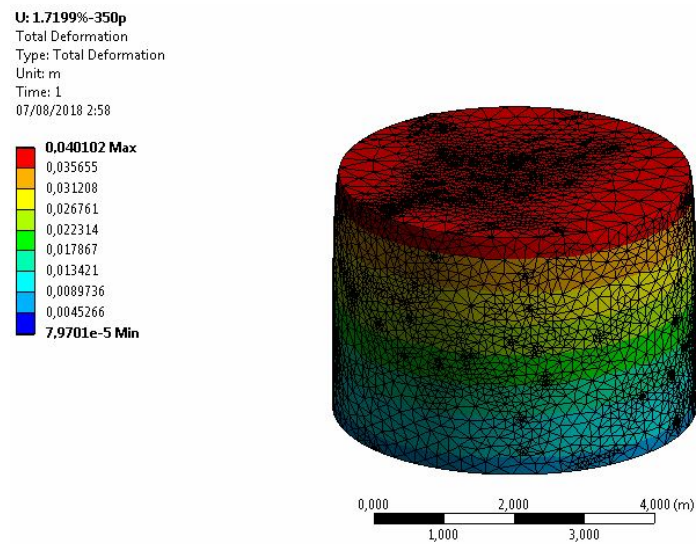


Figura A.61: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7199 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

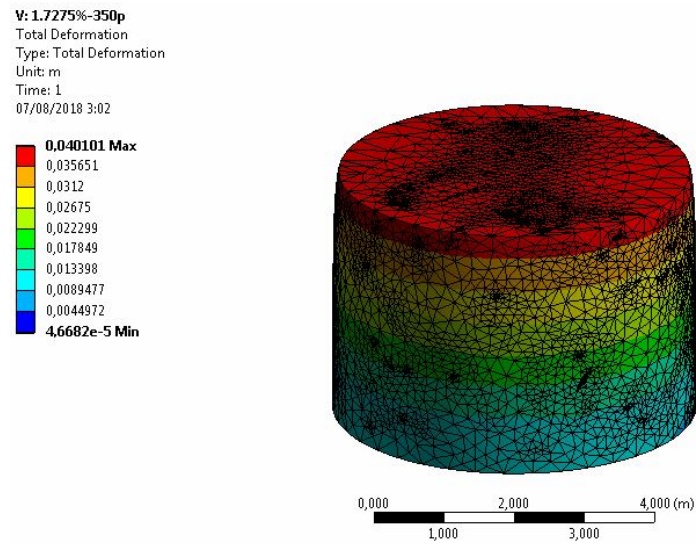


Figura A.62: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7275 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

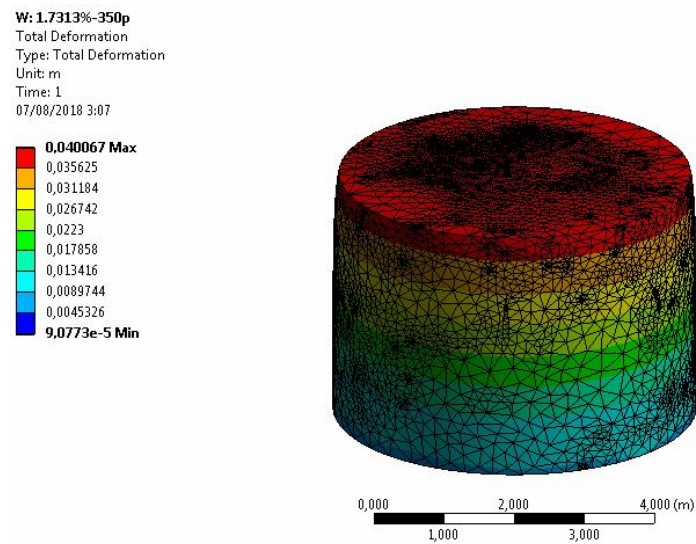


Figura A.63: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7313 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

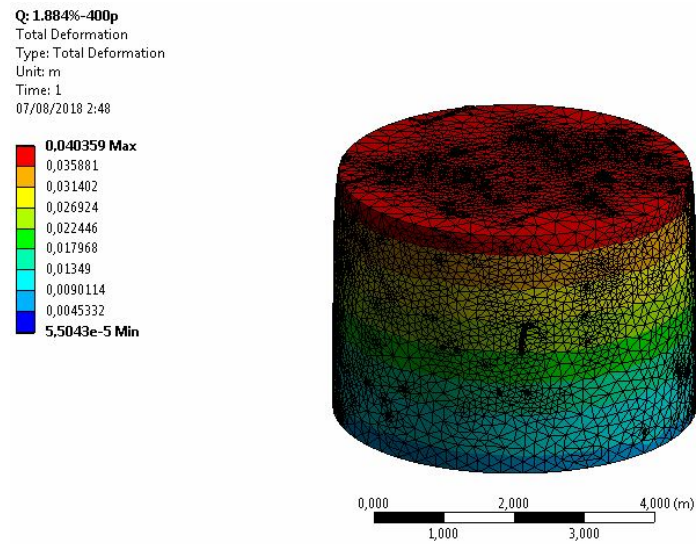


Figura A.64: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.8840 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

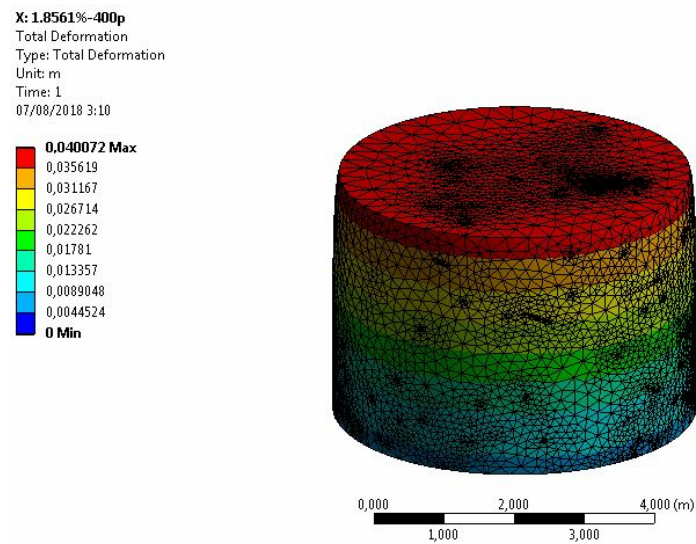


Figura A.65: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.8561 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

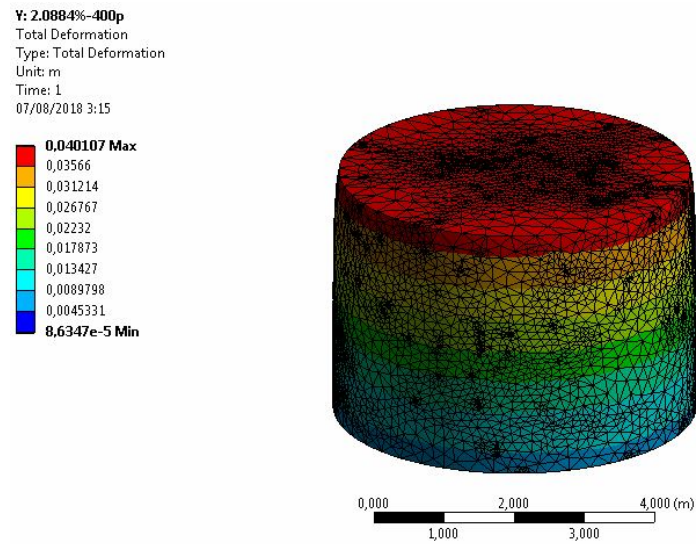


Figura A.66: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.0884 % de refuerzo de NTC con una capa de 10 [nm] de Al_4C_3 .

A.2.4. Desplazamiento longitudinal para matrices afectas a capa de 15 [nm] de Al_4C_3 en su refuerzo

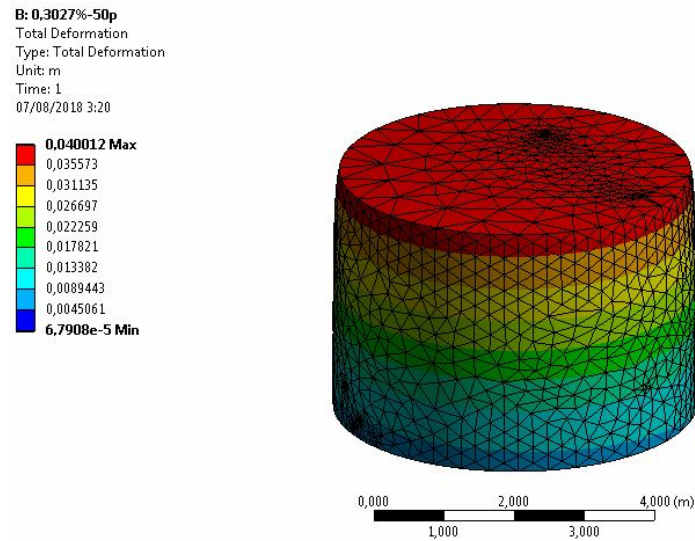


Figura A.67: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3027% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

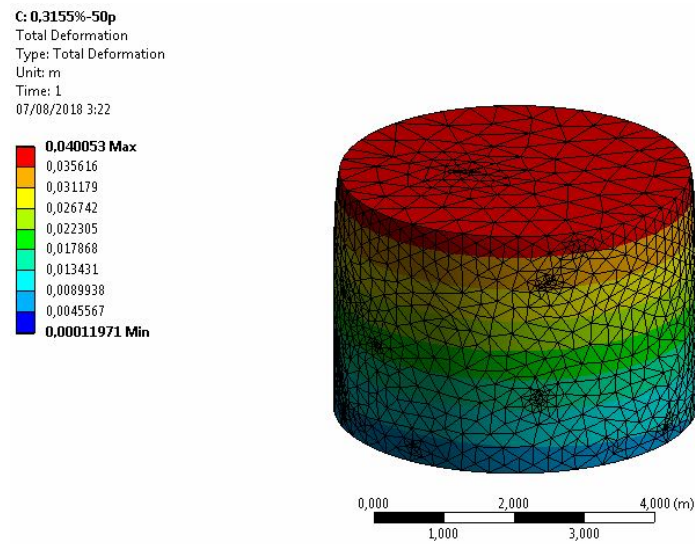


Figura A.68: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3151% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

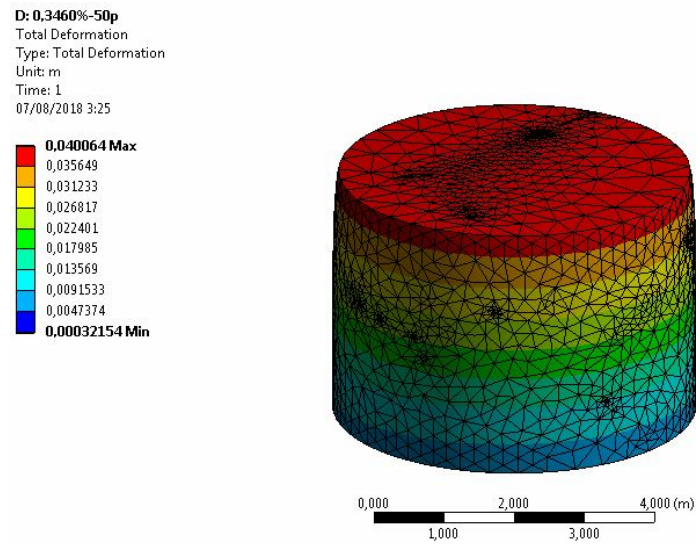


Figura A.69: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.3460 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

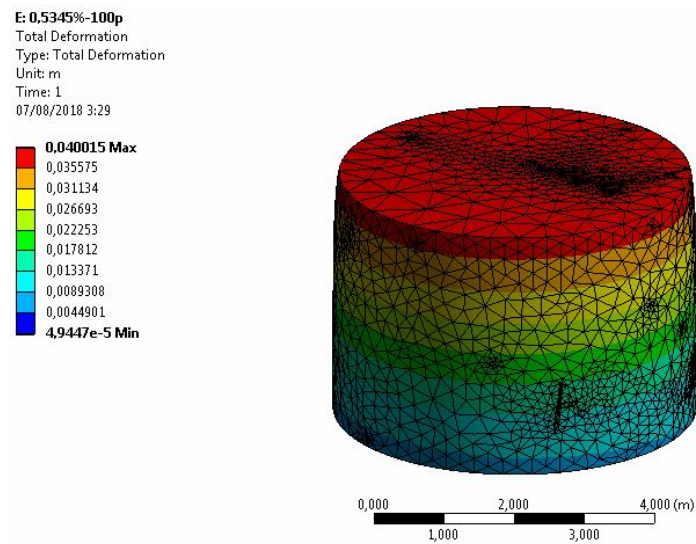


Figura A.70: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5345 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

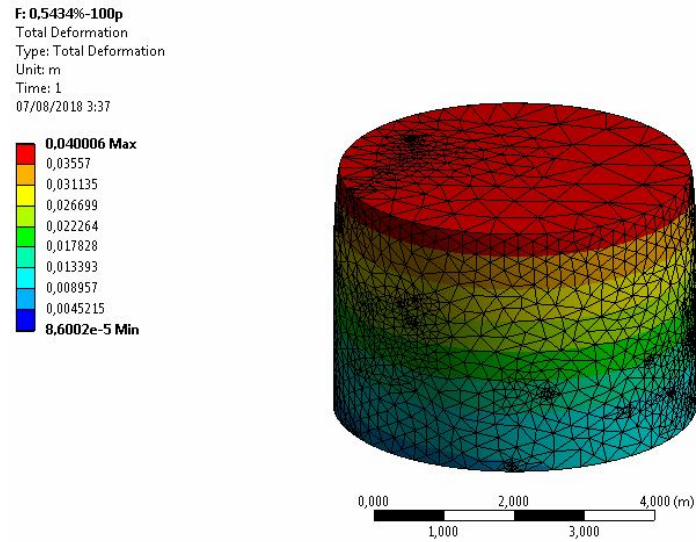


Figura A.71: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5434 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

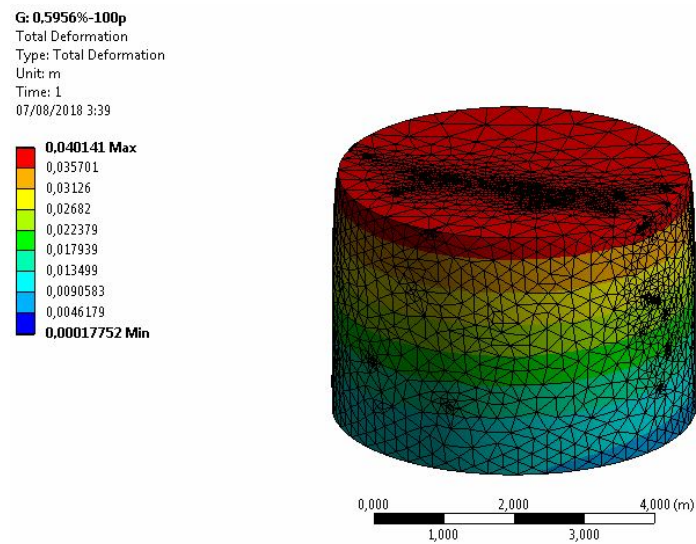


Figura A.72: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.5956 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

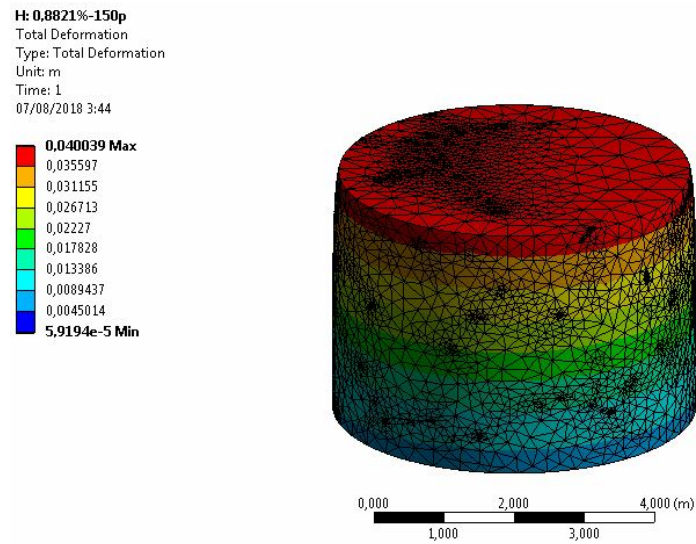


Figura A.73: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.8821 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

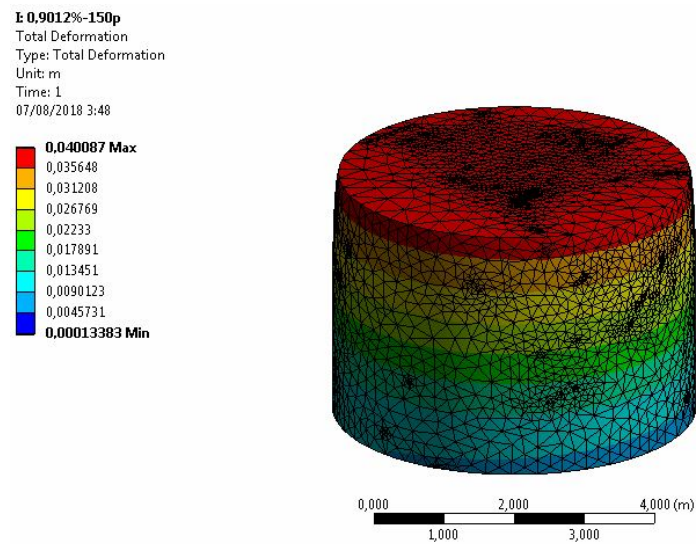


Figura A.74: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9012 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

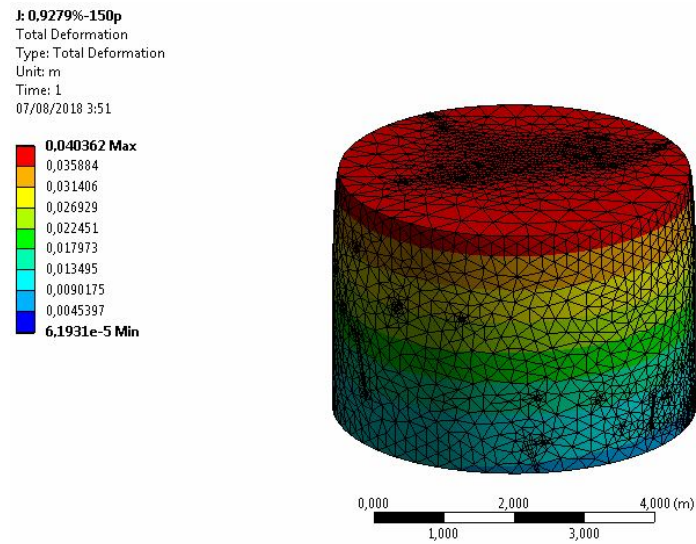


Figura A.75: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 0.9279 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

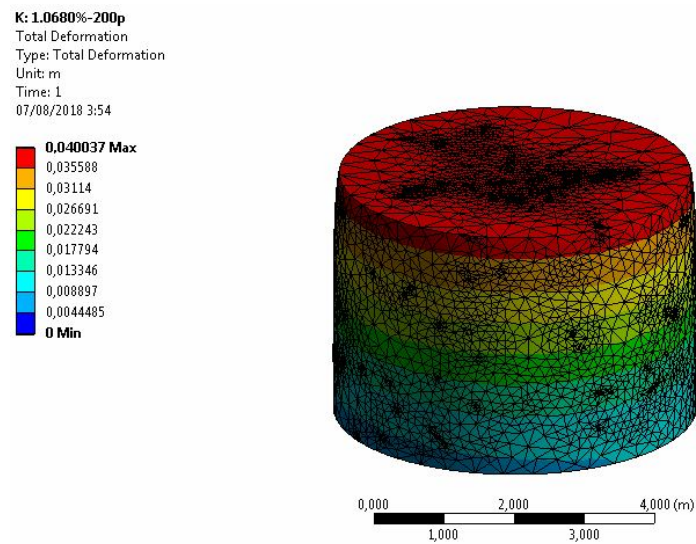


Figura A.76: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.0680 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

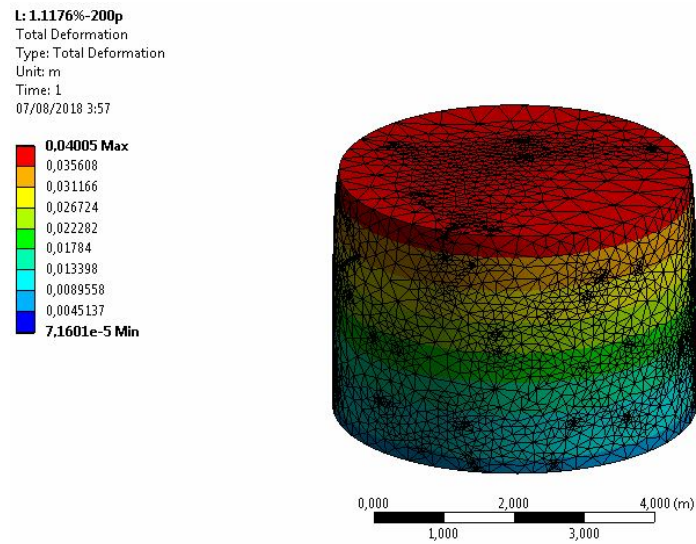


Figura A.77: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1176 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

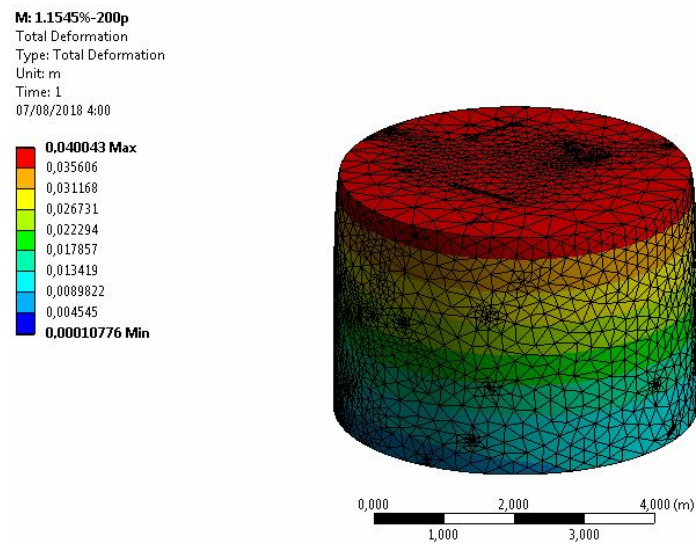


Figura A.78: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.1545 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

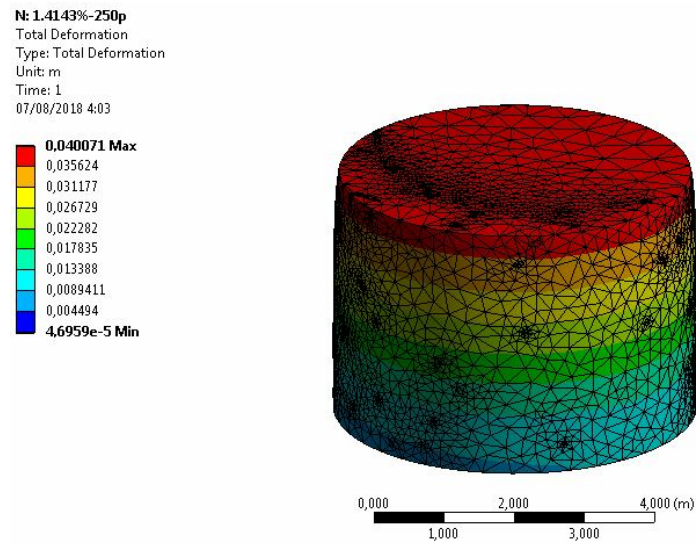


Figura A.79: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4143 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

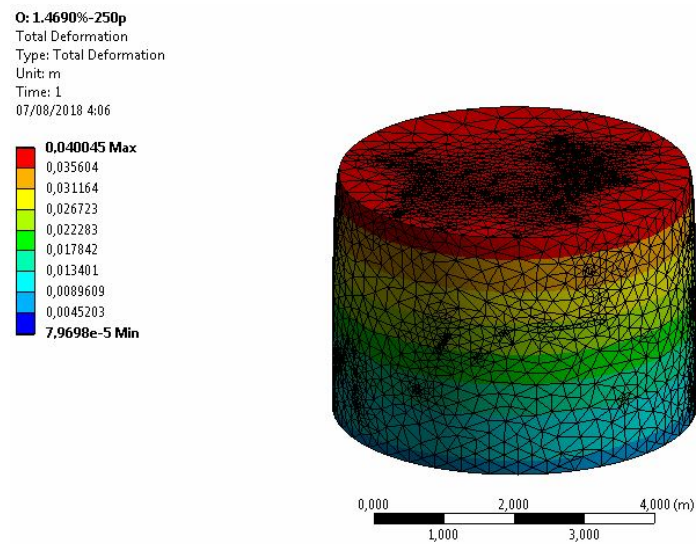


Figura A.80: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.4690 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

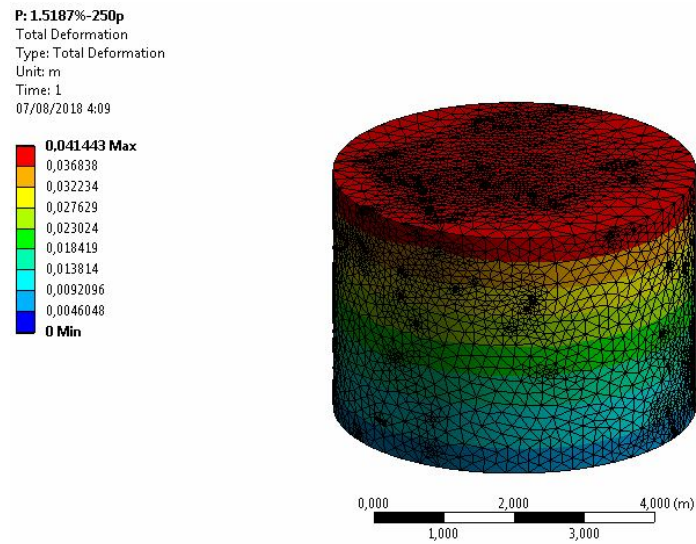


Figura A.81: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.5187% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

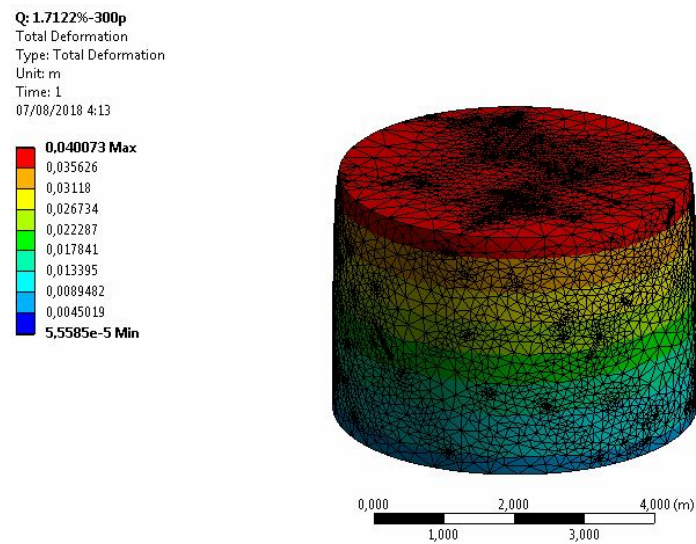


Figura A.82: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7122% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

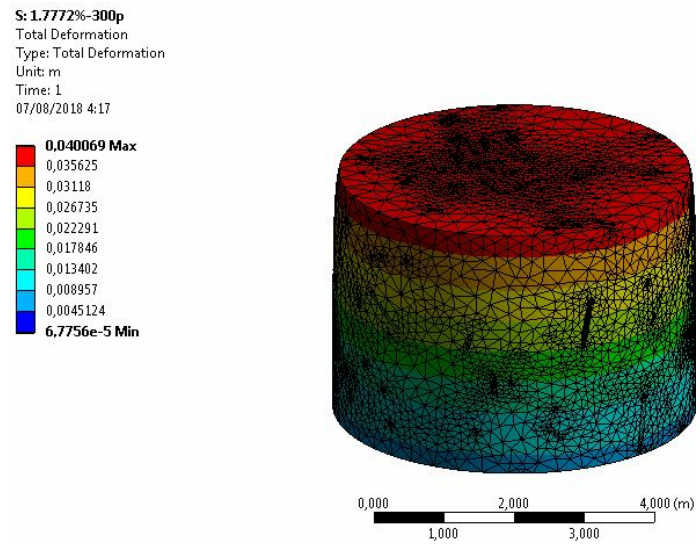


Figura A.83: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.7772% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

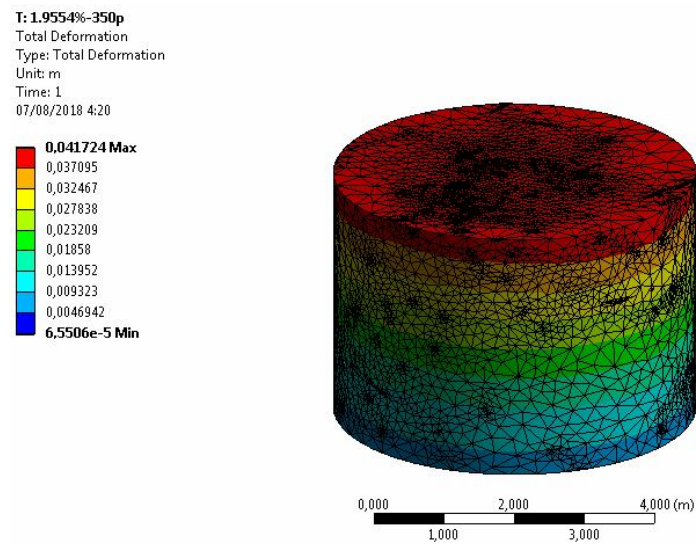


Figura A.84: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.9554% de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

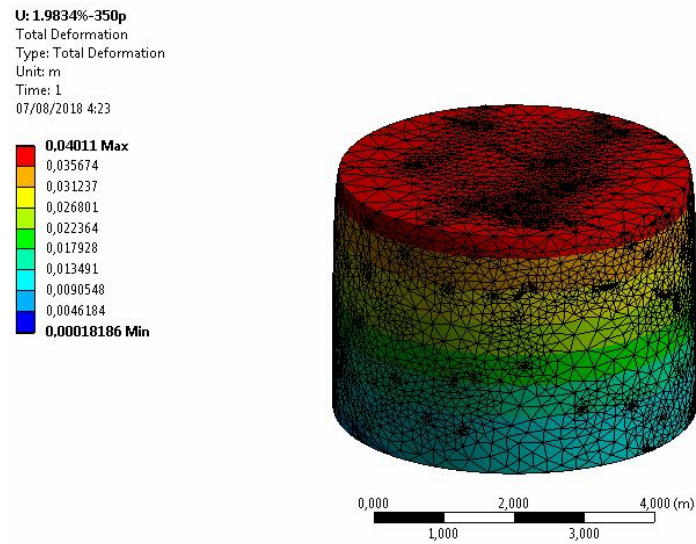


Figura A.85: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 1.9834 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

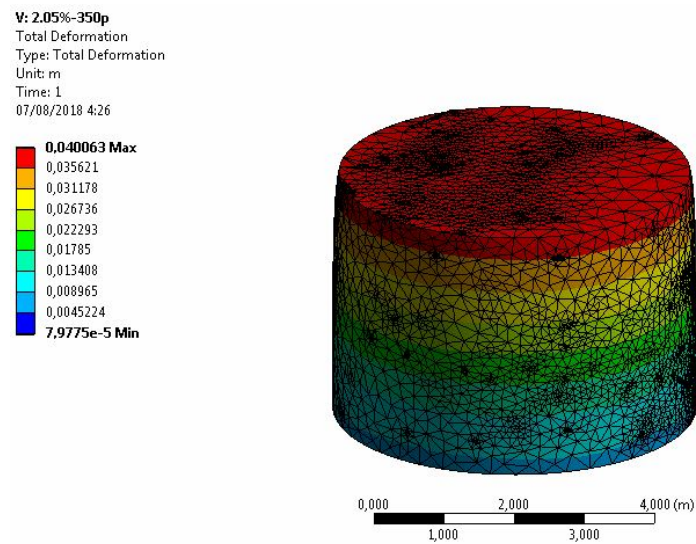


Figura A.86: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.0500 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

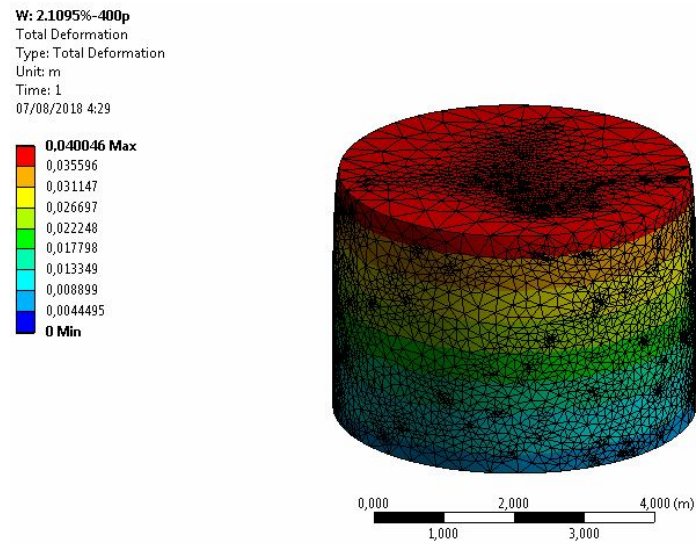


Figura A.87: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.1095 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

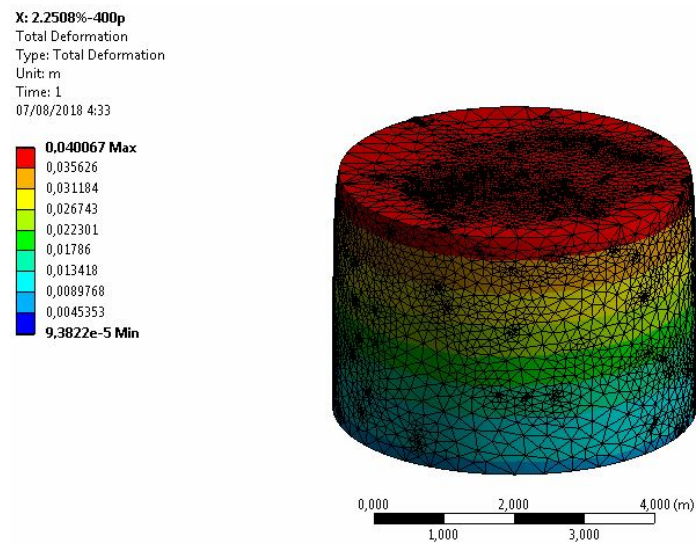


Figura A.88: Desplazamiento longitudinal de un RVE de Al-12wt %Si reforzado con 2.2508 % de refuerzo de NTC con una capa de 15 [nm] de Al_4C_3 .

B. Anexos B

A continuación se presentan algunos indicadores de la calidad de la malla de los modelos, así como también algunos RVE mallados y su respectiva distribución de refuerzos al interior.

B.1. Asimetría

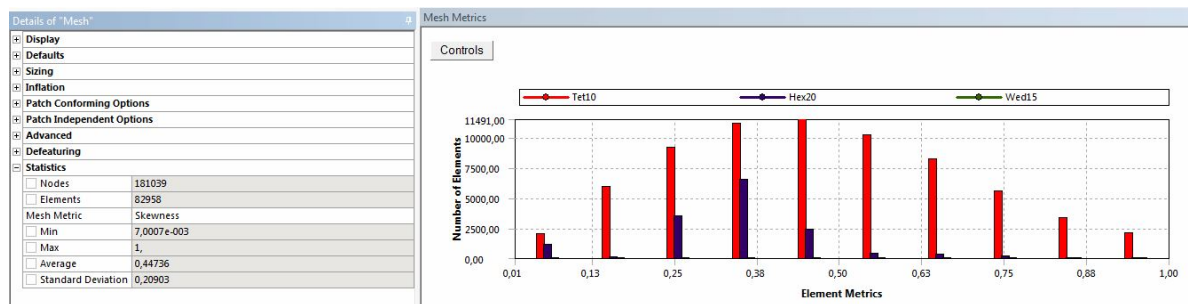


Figura B.1: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

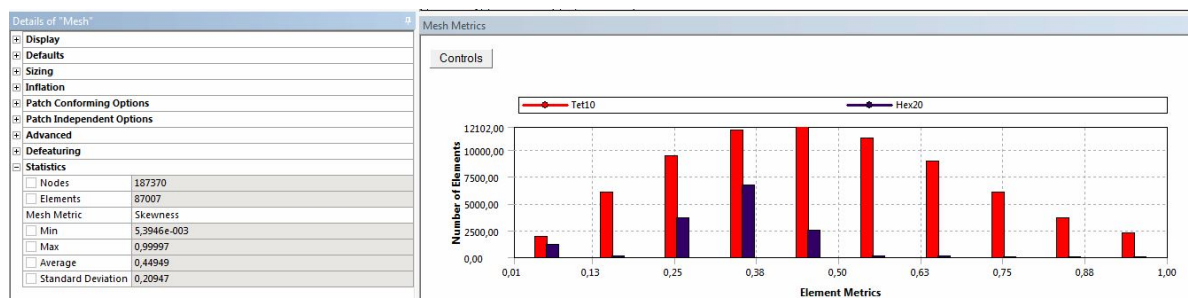


Figura B.2: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

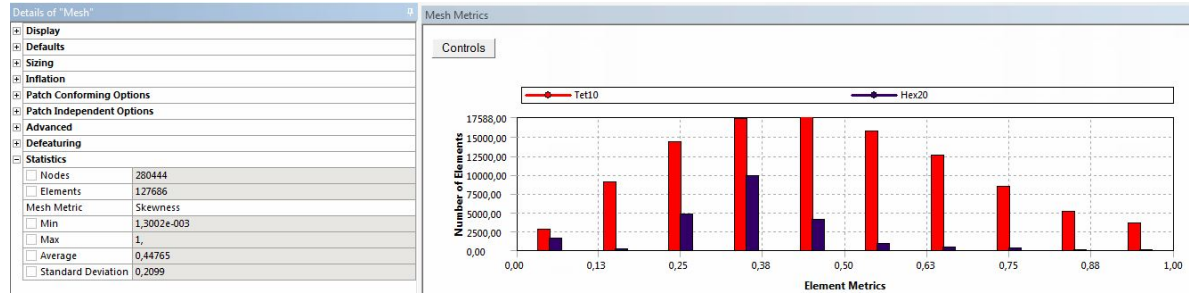


Figura B.3: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

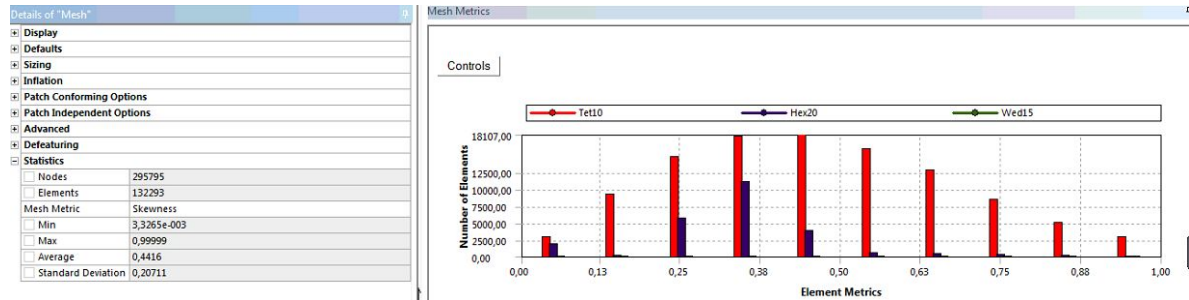


Figura B.4: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

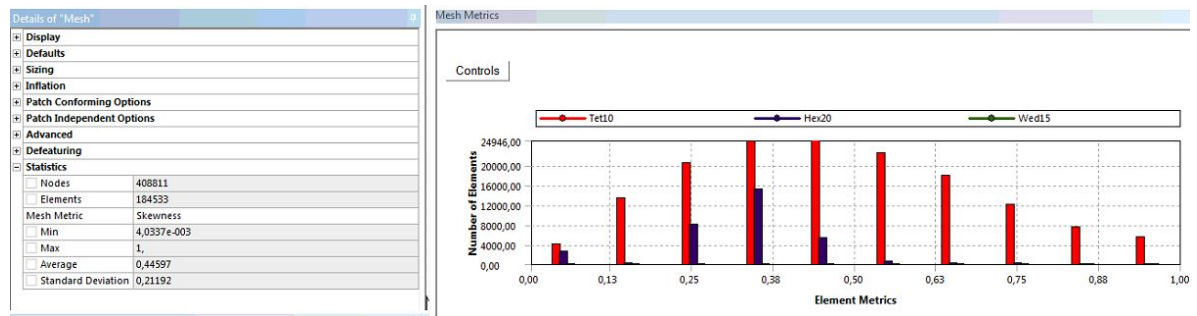


Figura B.5: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

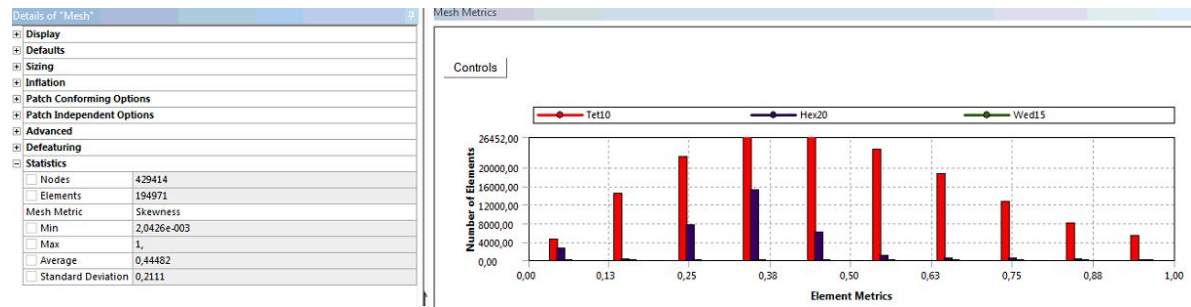


Figura B.6: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

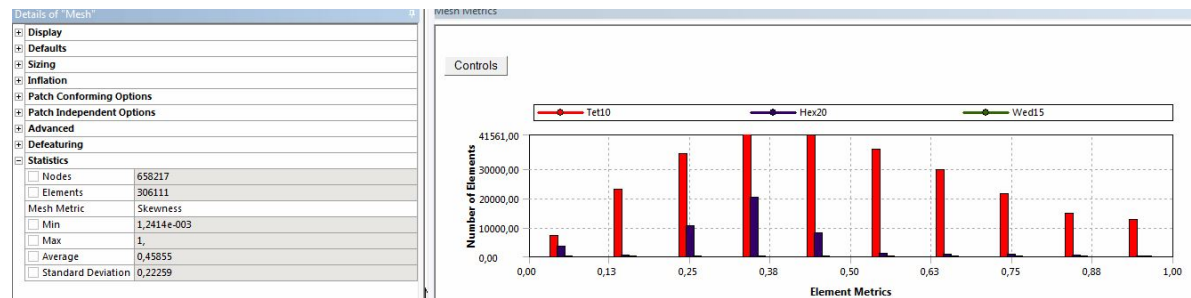


Figura B.7: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

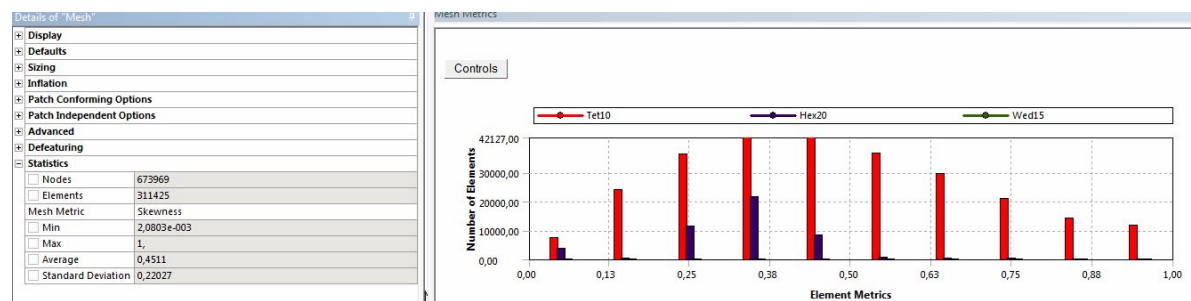


Figura B.8: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

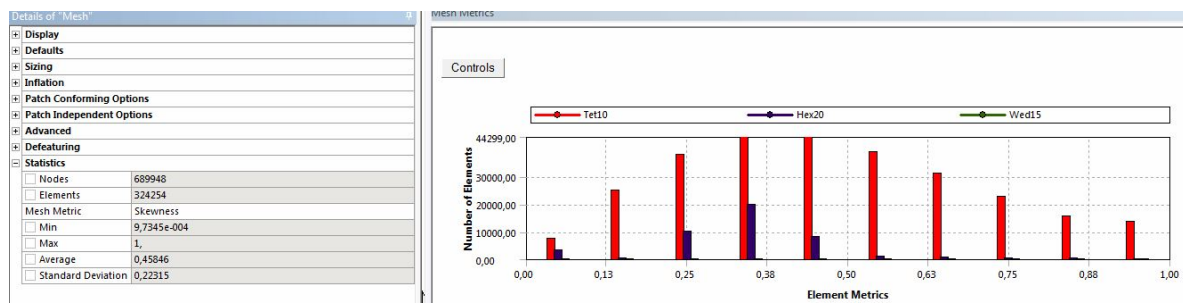


Figura B.9: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

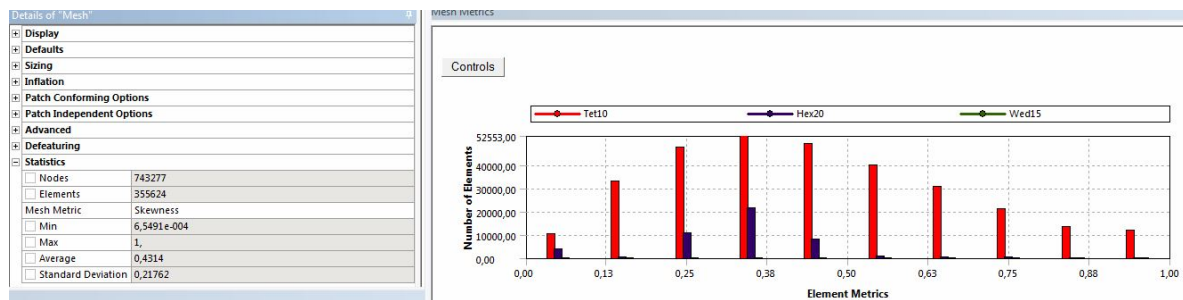


Figura B.10: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

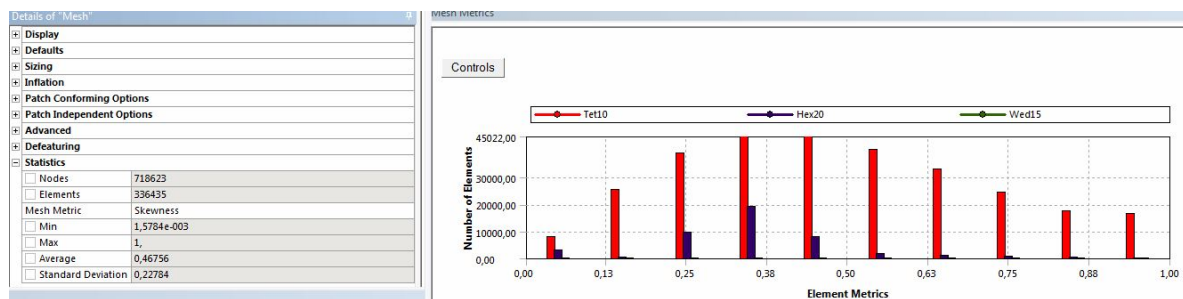


Figura B.11: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

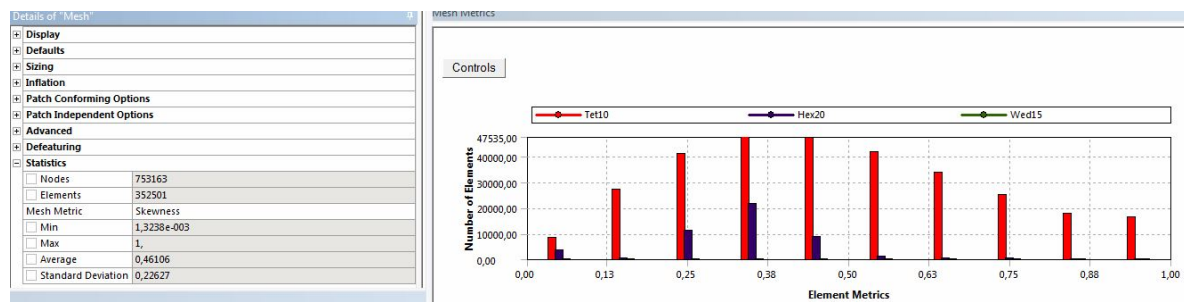


Figura B.12: Indicador de asimetría de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

B.2. Calidad de elemento

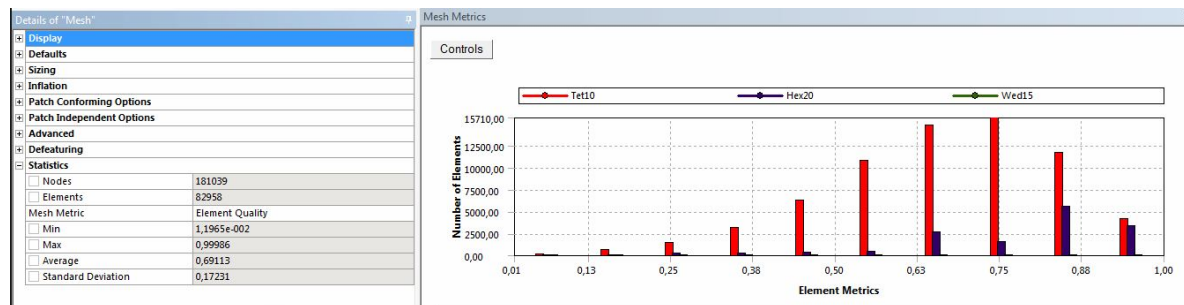


Figura B.13: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

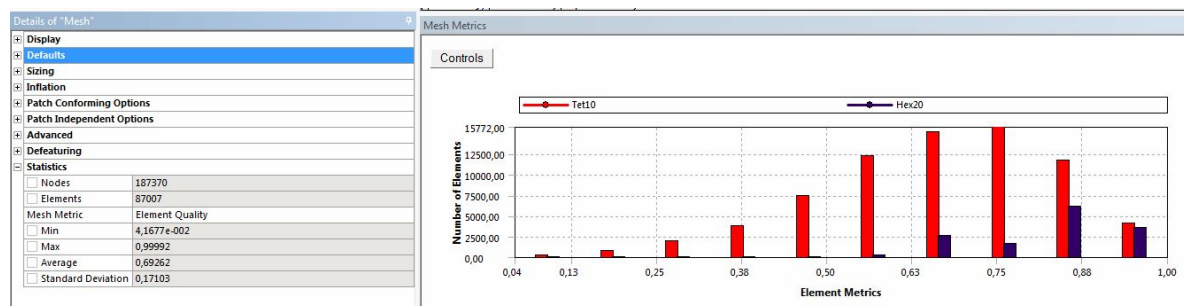


Figura B.14: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

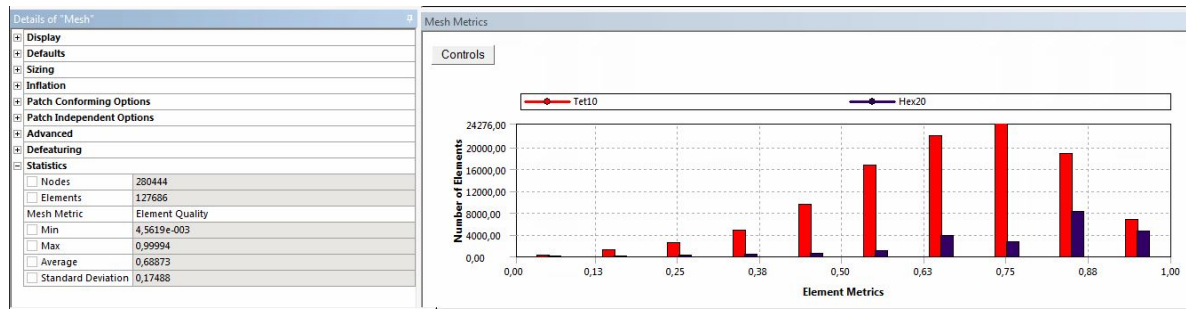


Figura B.15: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

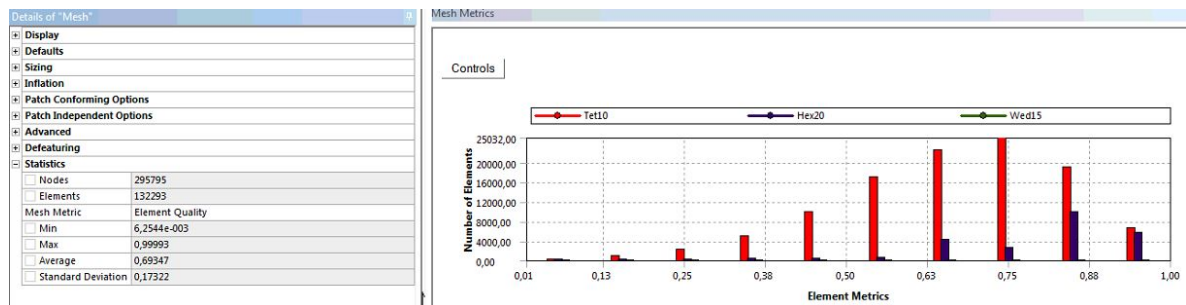


Figura B.16: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

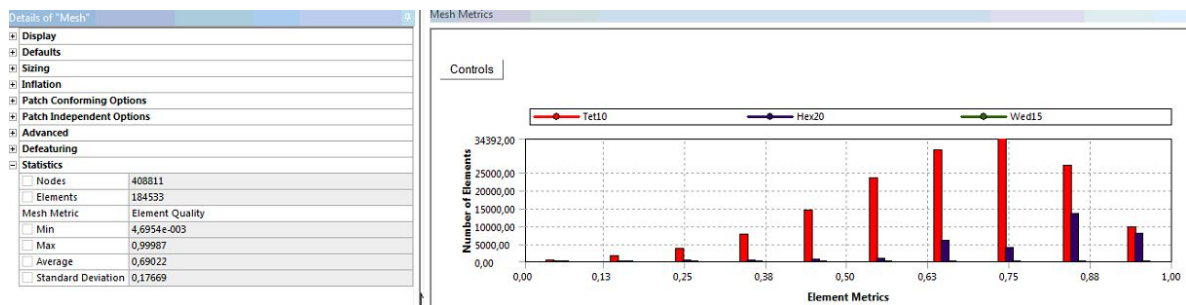


Figura B.17: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

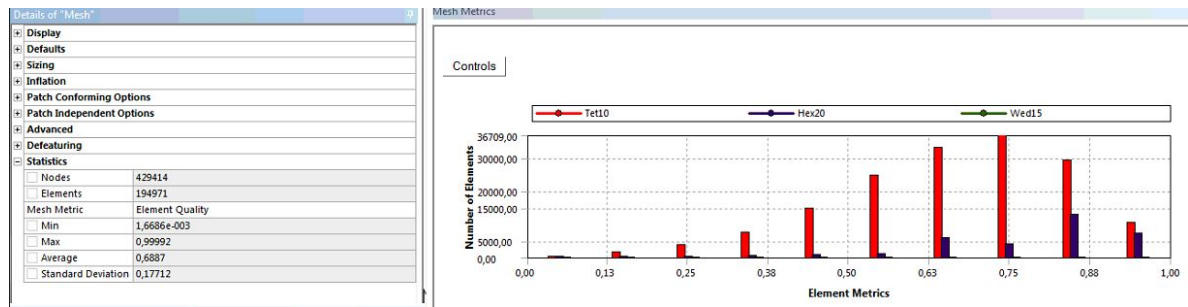


Figura B.18: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

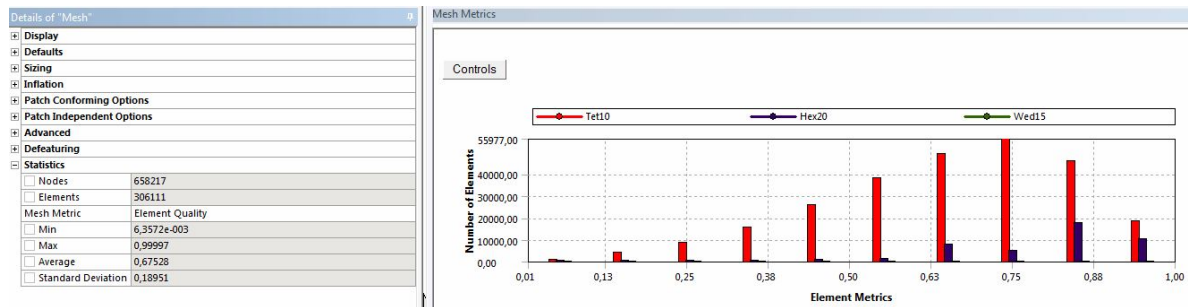


Figura B.19: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

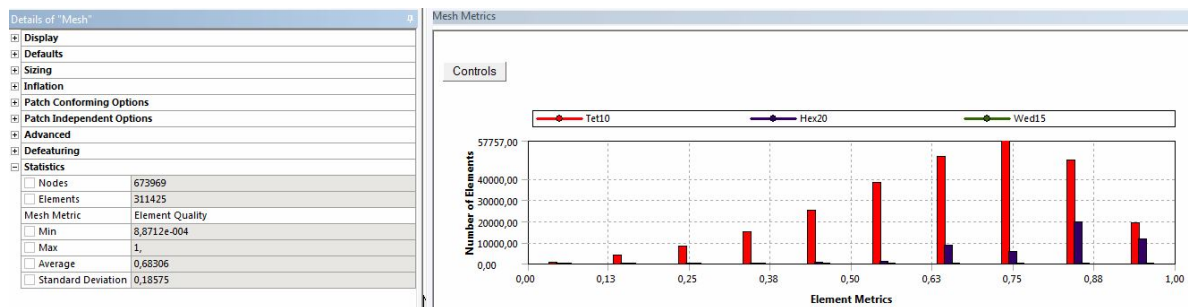


Figura B.20: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

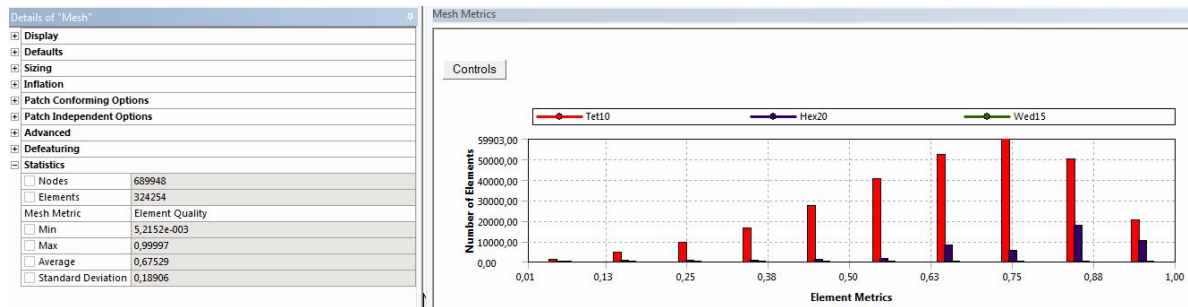


Figura B.21: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

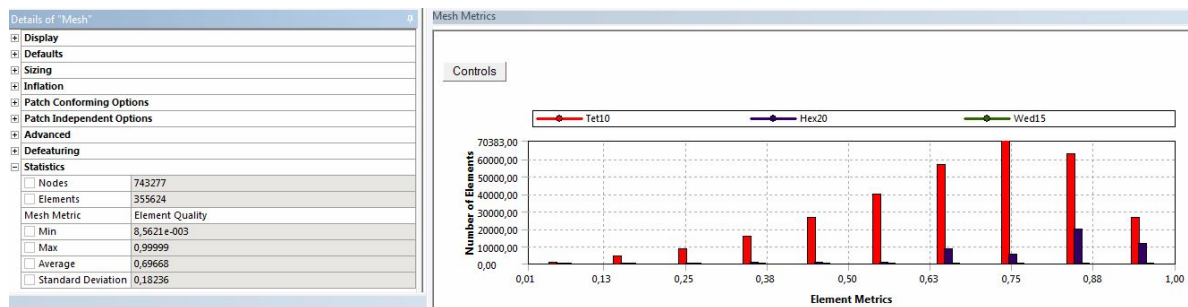


Figura B.22: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

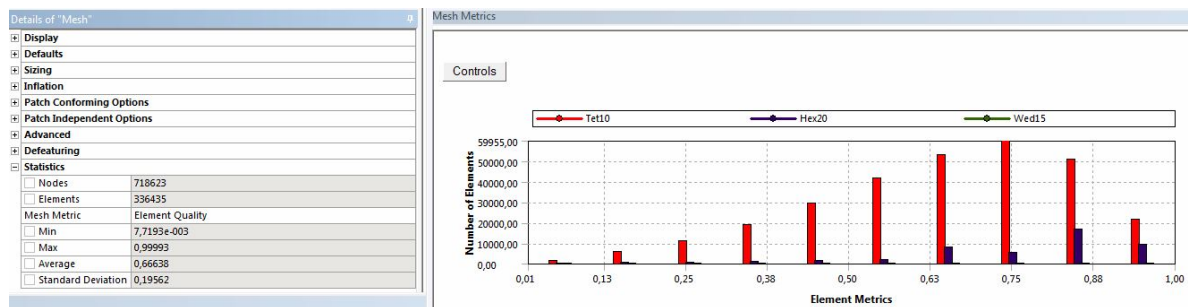


Figura B.23: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

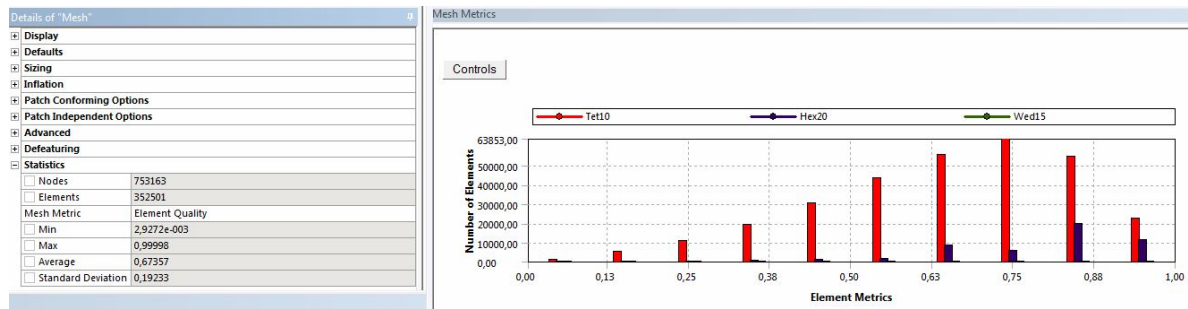


Figura B.24: Indicador de calidad de elemento de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

B.3. Calidad ortogonal

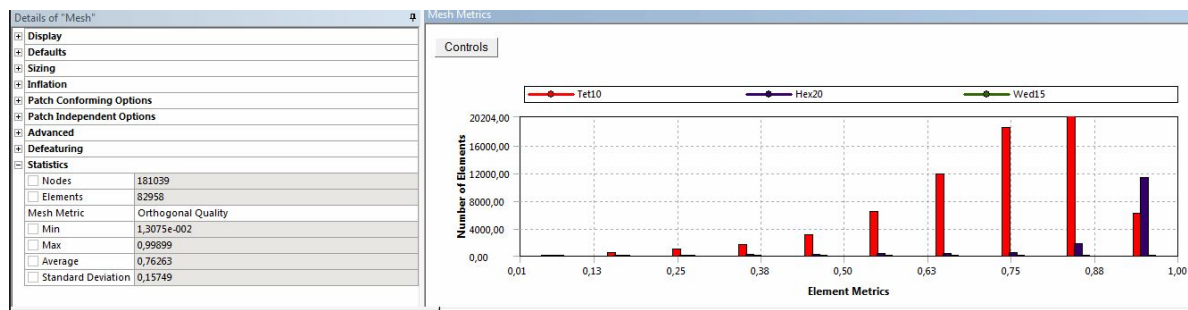


Figura B.25: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

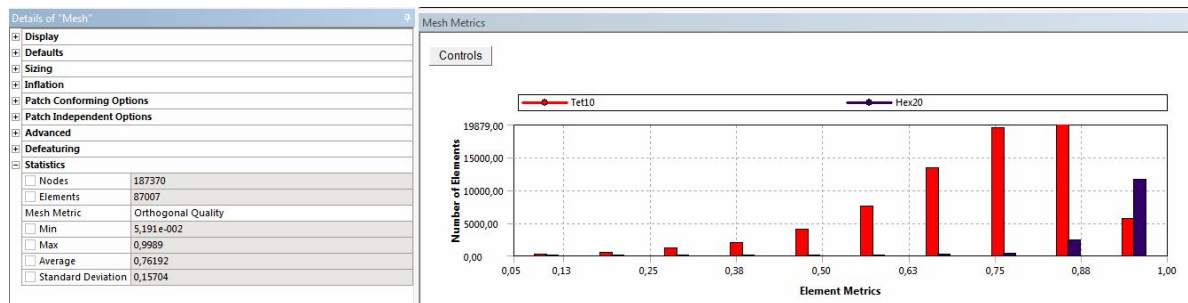


Figura B.26: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

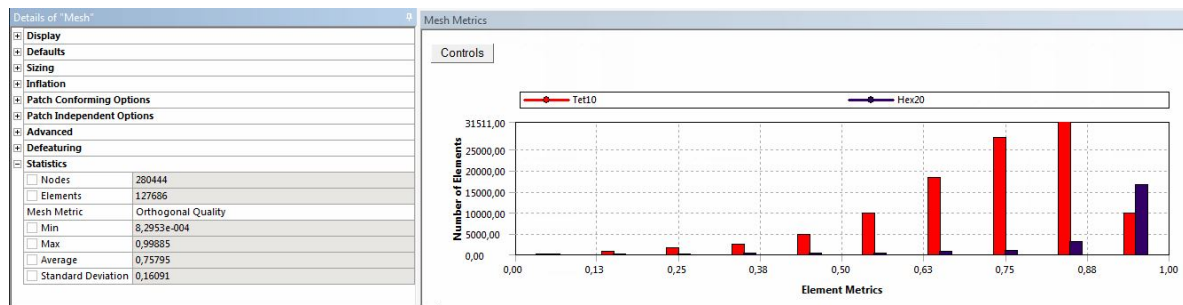


Figura B.27: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

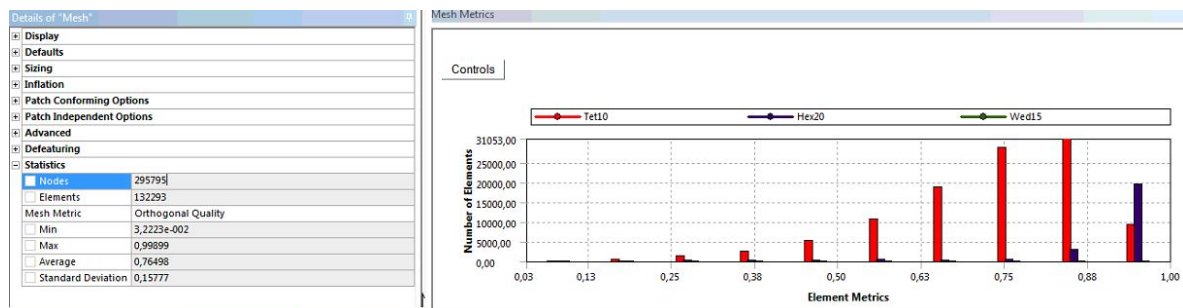


Figura B.28: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

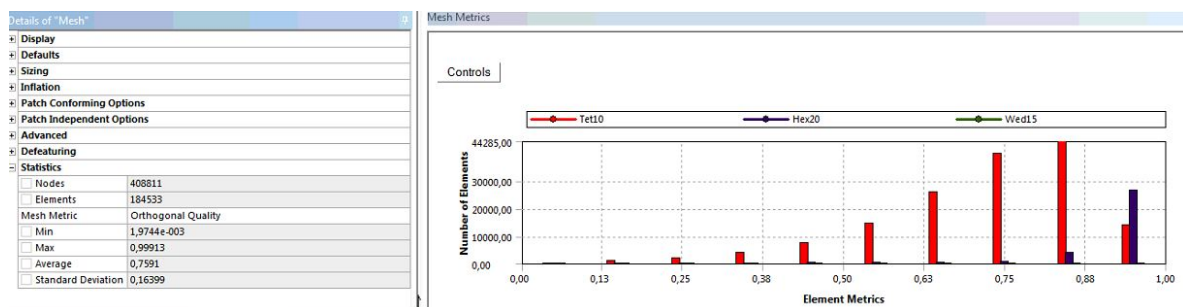


Figura B.29: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

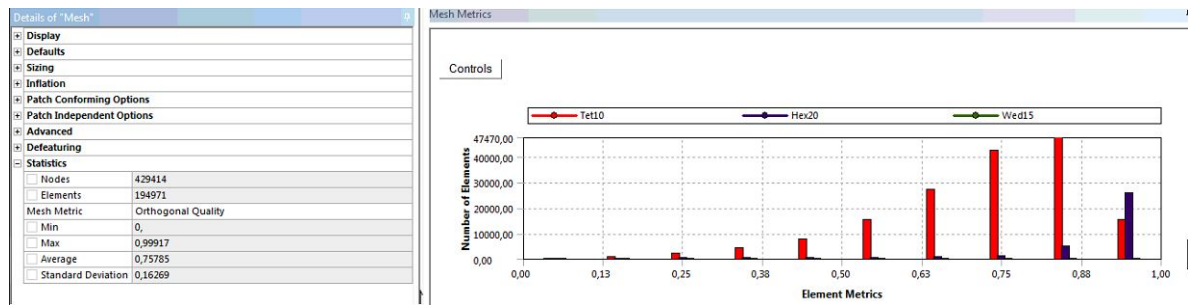


Figura B.30: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

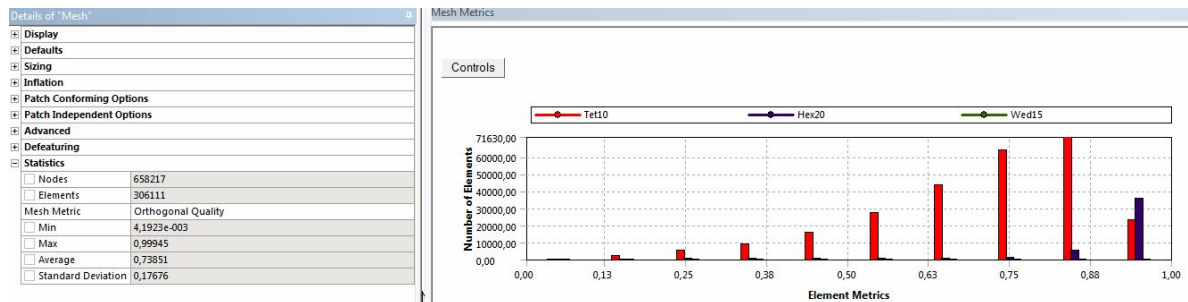


Figura B.31: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

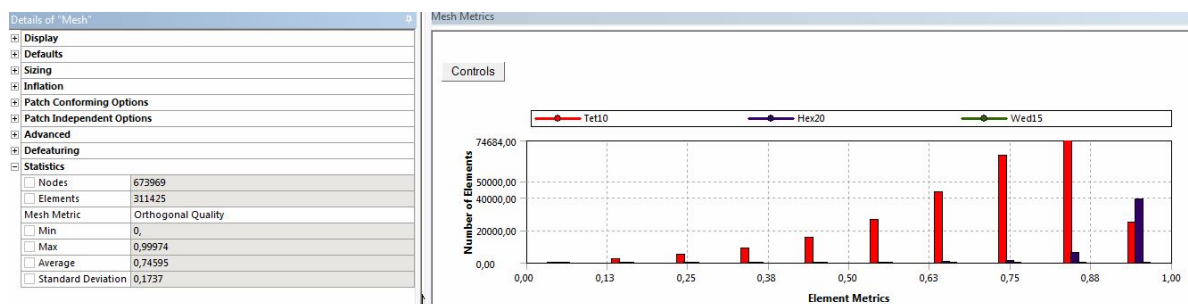


Figura B.32: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

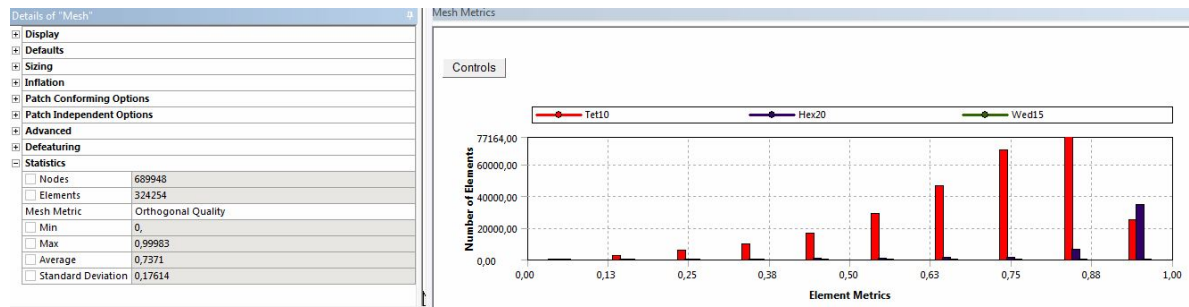


Figura B.33: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

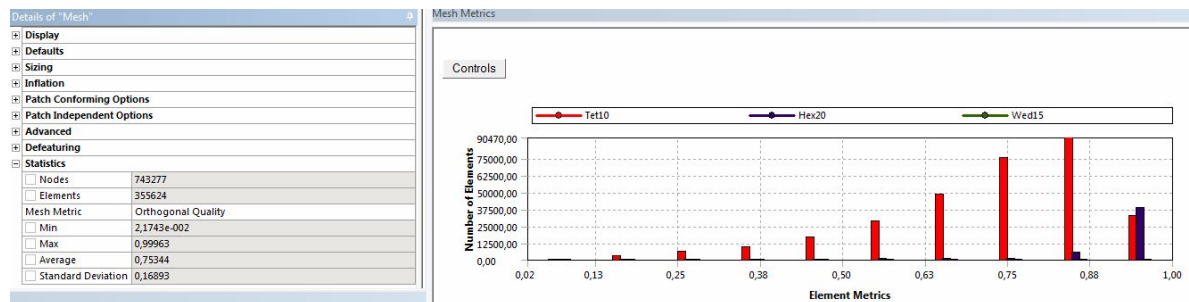


Figura B.34: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

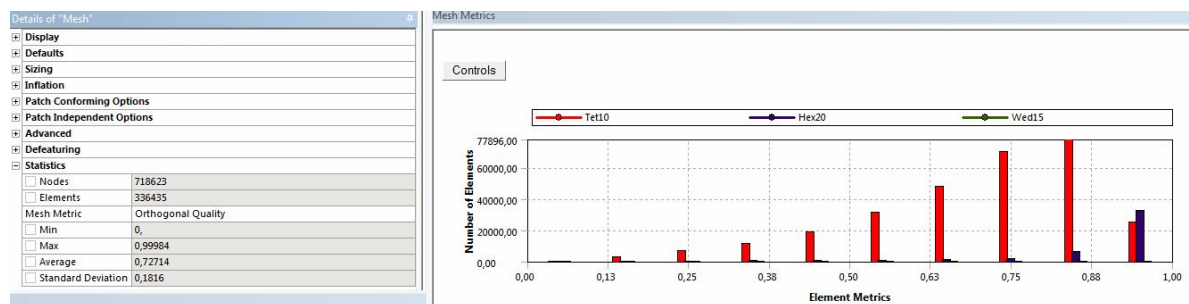


Figura B.35: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

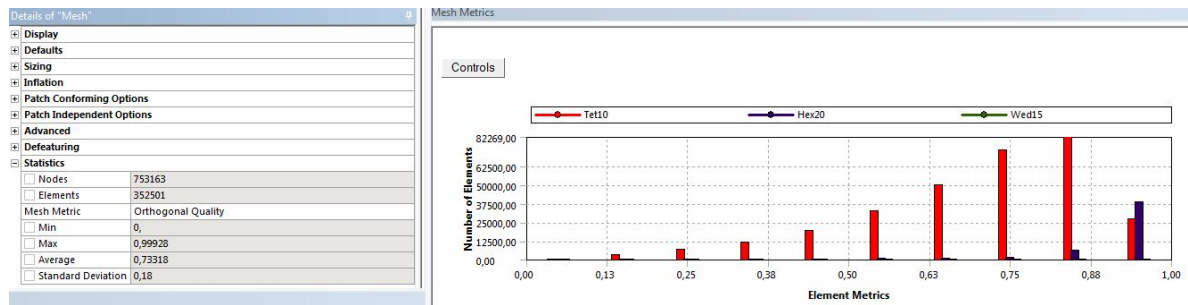


Figura B.36: Indicador de calidad ortogonal de los elementos de la malla del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

B.4. Mallado

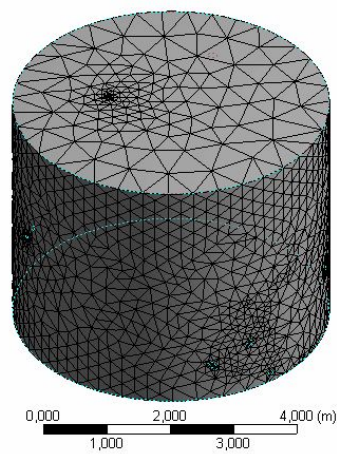


Figura B.37: Mallado del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

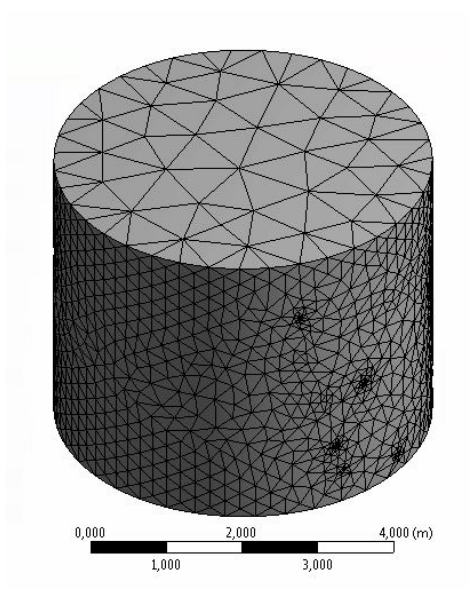


Figura B.38: Mallado del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

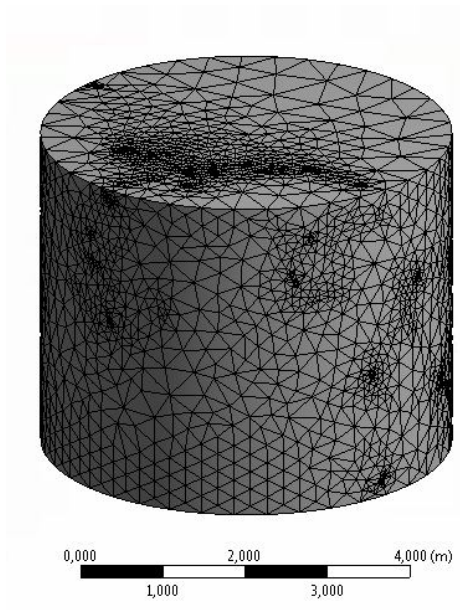


Figura B.39: Mallado del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

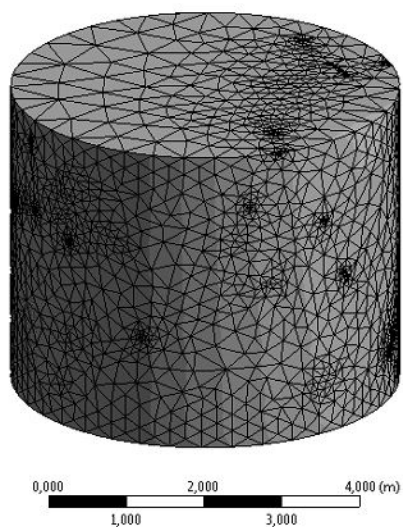


Figura B.40: Mallado del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

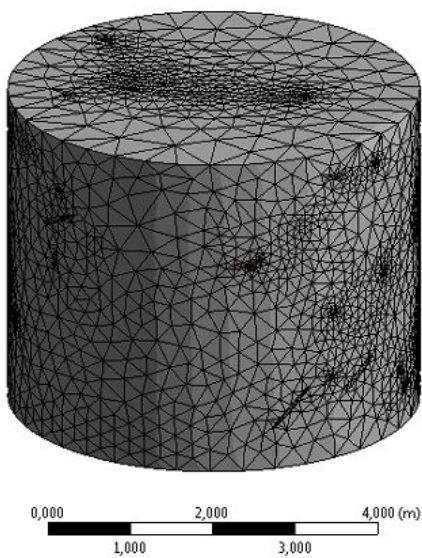


Figura B.41: Mallado del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

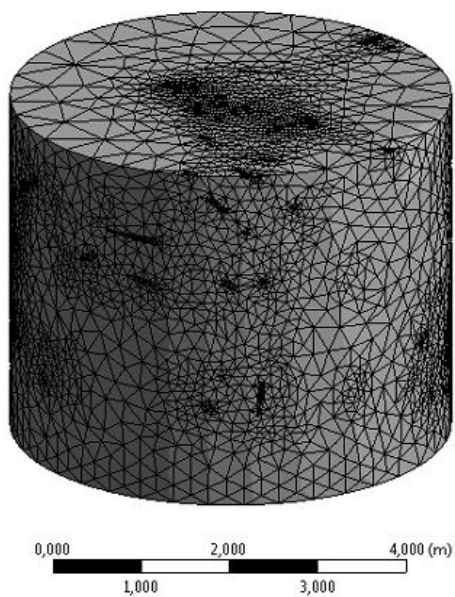


Figura B.42: Mallado del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

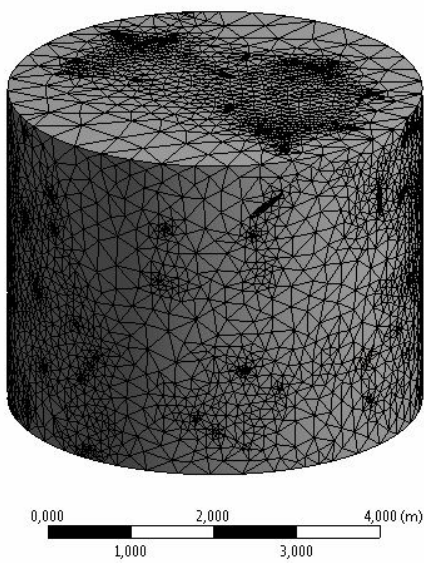


Figura B.43: Mallado del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

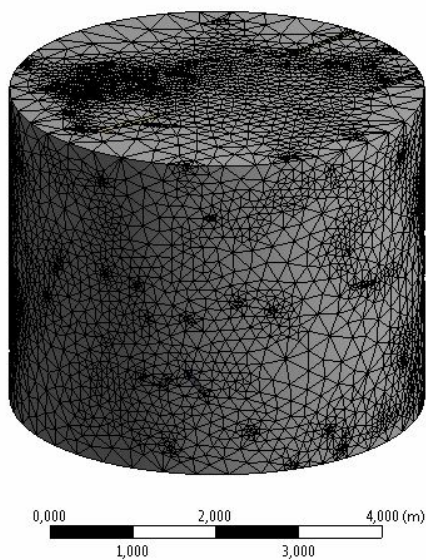


Figura B.44: Mallado del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

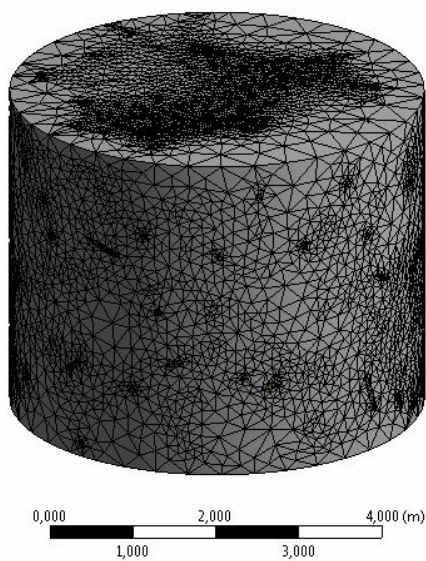


Figura B.45: Mallado del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

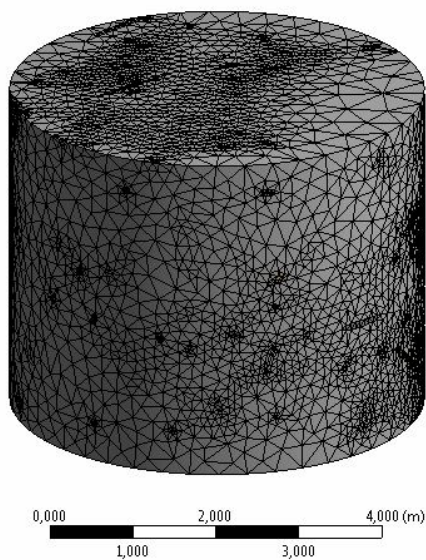


Figura B.46: Mallado del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

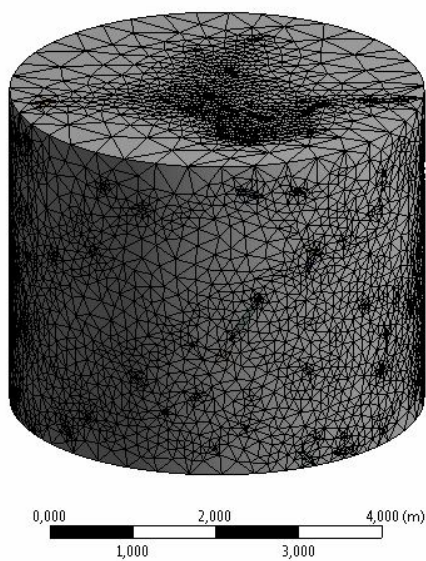


Figura B.47: Mallado del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

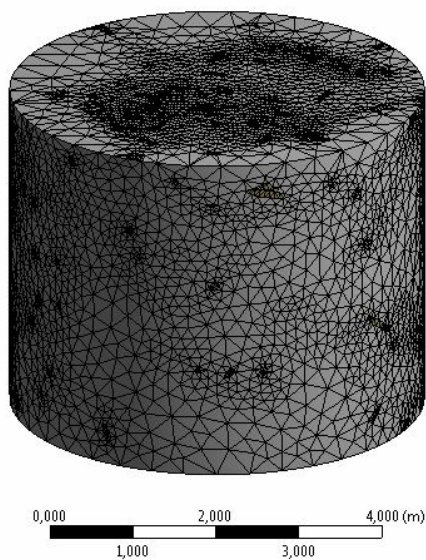


Figura B.48: Mallado del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

B.5. Distribución de refuerzos

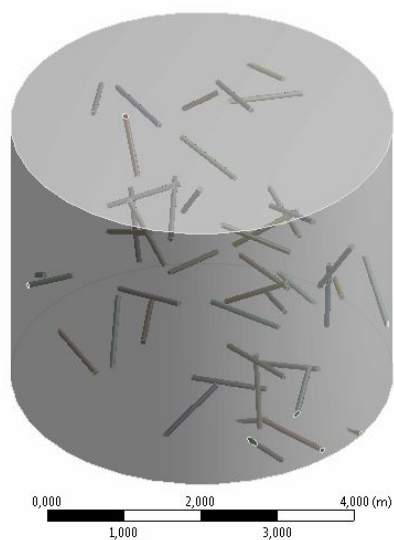


Figura B.49: Distribución de refuerzo del RVE de 0.1894 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .



Figura B.50: Distribución de refuerzo del RVE de 0.1932 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

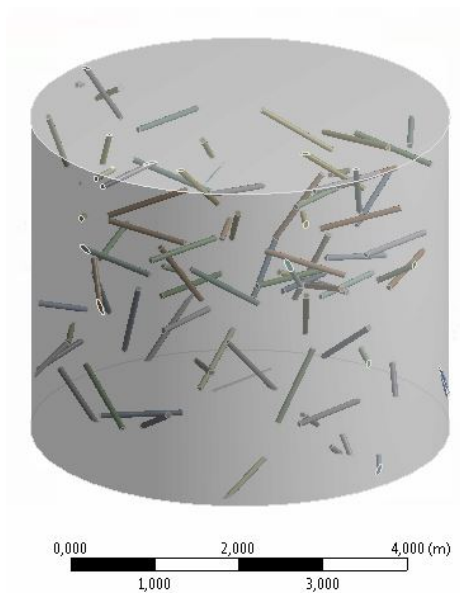


Figura B.51: Distribución de refuerzo del RVE de 0.3320 % de refuerzo, para una capa de 1 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

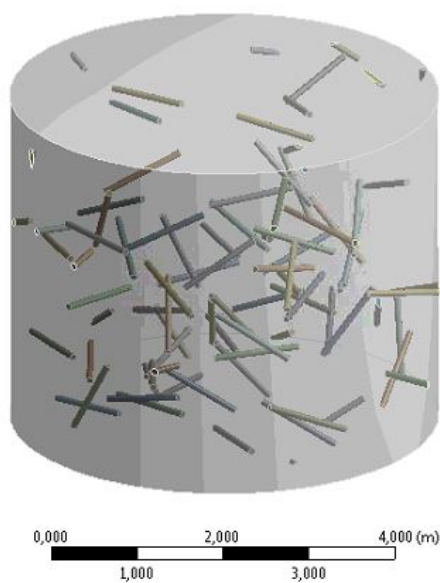


Figura B.52: Distribución de refuerzo del RVE de 0.4161 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

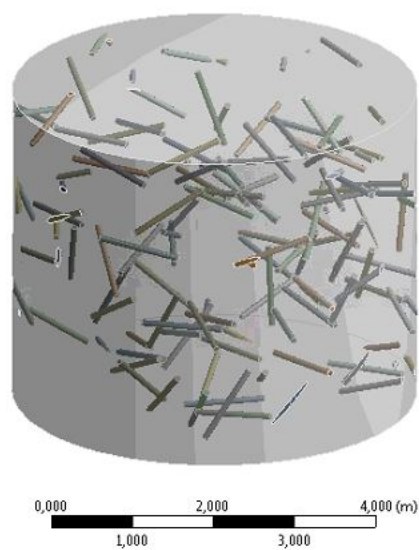


Figura B.53: Distribución de refuerzo del RVE de 0.6007 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

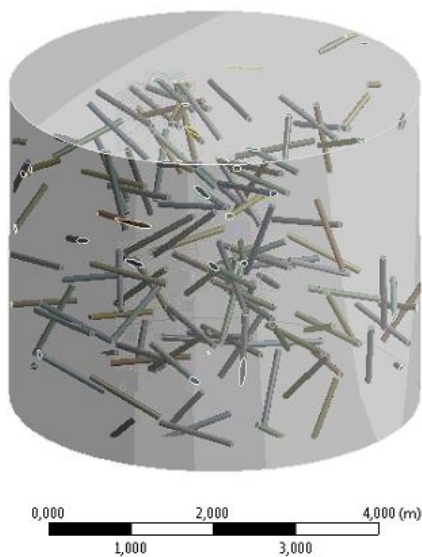


Figura B.54: Distribución de refuerzo del RVE de 0.6796 % de refuerzo, para una capa de 5 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

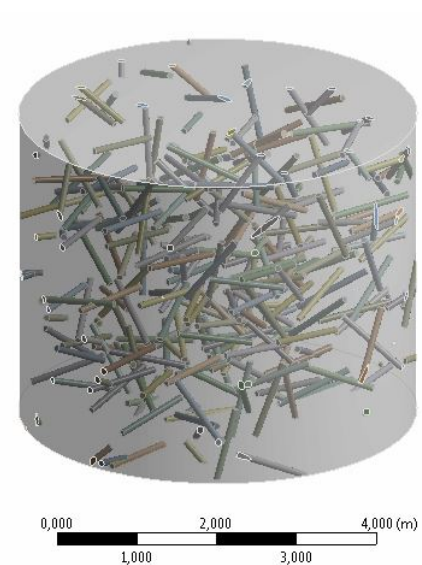


Figura B.55: Distribución de refuerzo del RVE de 1.5085 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

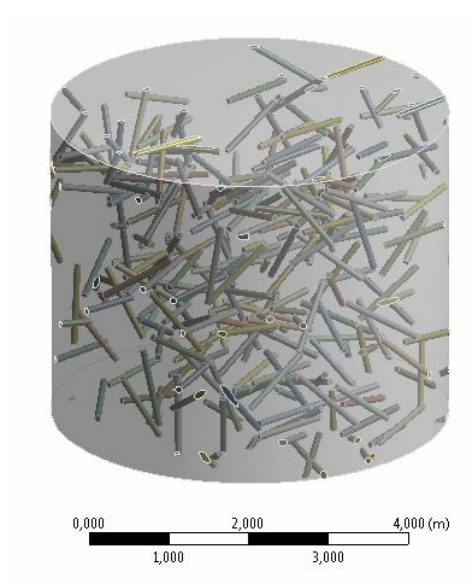


Figura B.56: Distribución de refuerzo del RVE de 1.5582 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

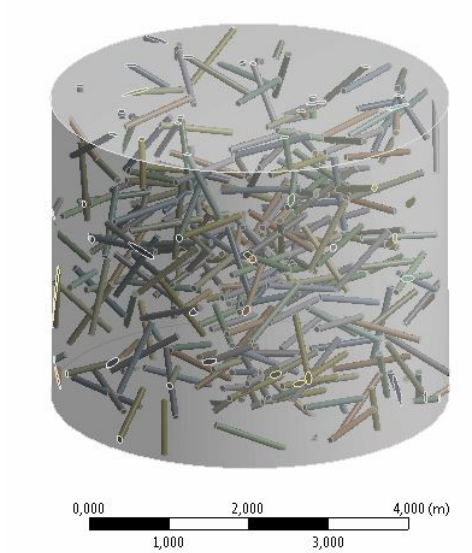


Figura B.57: Distribución de refuerzo del RVE de 1.5760 % de refuerzo, para una capa de 10 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

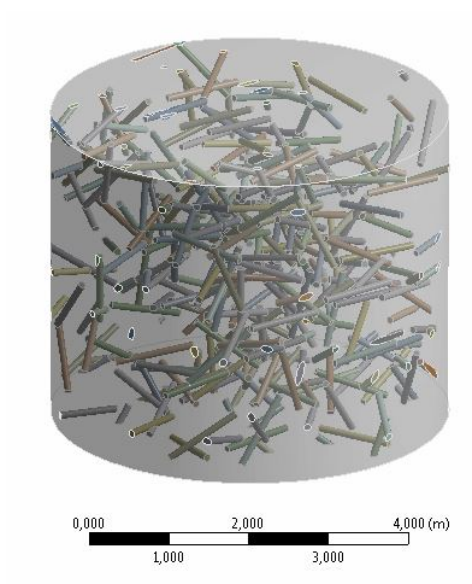


Figura B.58: Distribución de refuerzo del RVE de 2.0500 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

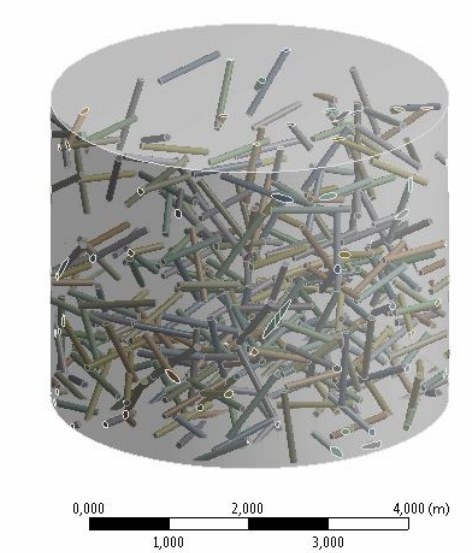


Figura B.59: Distribución de refuerzo del RVE de 2.1095 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

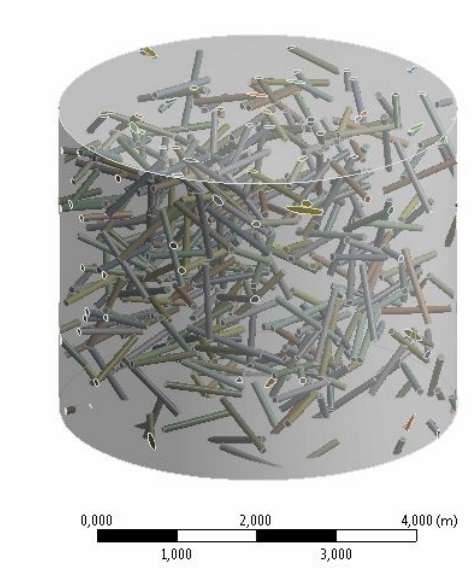


Figura B.60: Distribución de refuerzo del RVE de 2.2508 % de refuerzo, para una capa de 15 [nm] de espesor de Al_4C_3 .

Bibliografía

- [1] Michael F Ashby and David Rayner Hunkin Jones. *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, 4^a ed. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] Juan Troncoso. Historia de la fundición. https://elcrisoluspt.files.wordpress.com/2008/09/historia_fundicion.pdf, 2008. [Online; accessed 12-1-2018].
- [3] M Dhanashekar and VS Senthil Kumar. Squeeze casting of aluminium metal matrix composites-an overview. *Procedia Engineering*, 97:412–420, 2014.
- [4] P Senthil and KS Amirthagadeswaran. Experimental study and squeeze casting process optimization for high quality ac2a aluminium alloy castings. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(3):2215–2225, 2014.
- [5] Ahmad Aqel, Kholoud MM Abou El-Nour, Reda AA Ammar, and Abdulrahman Al-Warthan. Carbon nanotubes, science and technology part (i) structure, synthesis and characterisation. *Arabian Journal of Chemistry*, 5(1):1–23, 2012.
- [6] Jannik Meyer de Herdecke. Structure and properties of carbon nanotubes. Master’s thesis, Fakultät für Mathematik und Physik, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 2006.
- [7] BG Demczyk, YM Wang, J Cumings, M Hetman, W Han, A Zettl, and RO Ritchie. Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 334(1):173–178, 2002.
- [8] Ray H Baughman, Anvar A Zakhidov, and Walt A De Heer. Carbon nanotubes—the route toward applications. *science*, 297(5582):787–792, 2002.
- [9] Editorial Salvat. *Enciclopedia de Ciencia y Técnica. 1985*. Salvat Editorial, 1985. ISBN 84-345-4491-1.
- [10] Andrew R Hind, Suresh K Bhargava, and Stephen C Grocott. The surface chemistry of bayer process solids: a review. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 146(1-3):359–374, 1999.
- [11] Aluminum Association et al. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM International, 1984.
- [12] Elwin L. Rooy J. Gilbert Kaufman. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes And Applications*. ASM International, 2004.

- [13] ASM International Committee. *ASM Metals Handbook, Vol 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990.
- [14] I. Alfonso, O. Navarro, J. Vargas, A. Beltrán, C. Aguilar, G. González, and I.A. Figueroa. Fea evaluation of the al4c3 formation effect on the young's modulus of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Composite Structures*, 127:420 – 425, 2015. ISSN 0263-8223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.032>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315002056>.
- [15] Oxana Vasilievna Kharissova Claramaría Rodríguez González. Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingenierías*, 11(38):7, 2008.
- [16] Sumio Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 354(6348):56, 1991.
- [17] Melissa Paradise and Tarun Goswami. Carbon nanotubes—production and industrial applications. *Materials & Design*, 28(5):1477–1489, 2007.
- [18] Veena Choudhary and Anju Gupta. Polymer/carbon nanotube nanocomposites. In *Carbon nanotubes-polymer nanocomposites*. Intech, 2011.
- [19] Catherine Journet and P Bernier. Production of carbon nanotubes. *Applied physics A: Materials science & processing*, 67(1):1–9, 1998.
- [20] JM Alford, GR Mason, and DA Feikema. Formation of carbon nanotubes in a microgravity environment. *Sixth International Microgravity Combustion Workshop.*, 2001.
- [21] Sandeep Kumar, Ruma Rani, Neeraj Dilbaghi, K Tankeshwar, and Ki-Hyun Kim. Carbon nanotubes: a novel material for multifaceted applications in human healthcare. *Chemical Society Reviews*, 46(1):158–196, 2017.
- [22] Abdulazeez. T. Lawal. Structure and properties of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors. Master's thesis, Materials Research Bulletin, Department of Chemical and Geological Science. Al-Hikmah University Ilorin, Nigeria, 2015.
- [23] V.M. Sivakumar, Abdul Mohamed, Ahmad Zuhairi Abdullah, and Siang-Piao Chai. Role of reaction and factors of carbon nanotubes growth in chemical vapour decomposition process using methane—a highlight. 2010, 05 2010.
- [24] Xuemei Ren, Changlun Chen, Masaaki Nagatsu, and Xiangke Wang. Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management: a review. *Chemical Engineering Journal*, 170(2-3):395–410, 2011.
- [25] Devanshu Singla, Kaza Amulya, and Qasim Murtaza. Cnt reinforced aluminium matrix composite—a review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5):2886–2895, 2015.
- [26] Grigorij Yakovlev, Jadvyga Kerienė, Albinas Gailius, and Ingrida Girnienė. Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. *Materials Science [Medžiagotyra]*, 12(2):147–151, 2006.
- [27] Srinivasa R Bakshi, Anup K Keshri, Virendra Singh, Sudipta Seal, and Arvind Agarwal. Interface in carbon nanotube reinforced aluminum silicon composites: Thermodynamic analysis and experimental verification. *Journal of Alloys and Compounds*, 481(1-2):207–213, 2009.

- [28] MR Ghomashchi and A Vikhrov. Squeeze casting: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1):1–9, 2000.
- [29] Doru Michael Stefanescu. *Science and Engineering of Casting Solidification, Second Edition*. Springer Science Business Media, 2008.
- [30] Shsanji. High-end squeeze casting parts. http://www.shsanji.com/en/product_01.aspx?cid=178&id=95, 2018. [Online; accessed 10-1-2018].
- [31] Servicio Industrial S.A. Acero sisa h13, acero para trabajo en caliente, catálogo. <http://sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20H13.pdf>, 2018. [Online; accessed 12-1-2018].
- [32] John Campbell. *Complete Casting Handbook, Second Edition: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. 2015.
- [33] Lévy Élie. *Diccionario de física*. Editorial Akal, 1993.
- [34] Buddy D Ratner, Allan S Hoffman, Frederick J Schoen, and Jack E Lemons. *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. Academic press, 2004.
- [35] David G. Rethwisch William D. Callister Jr. *Materials Science and Engineering, An introduction*. 2006. ISBN 978-1-118-32457-8.
- [36] The Library of Manufacturing. The metal casting operation. http://thelibraryofmanufacturing.com/metalcasting_operation.html, 2018. [Online; accessed 3-4-2018].
- [37] M-S Scholz, JP Blanchfield, LD Bloom, BH Coburn, M Elkington, JD Fuller, ME Gilbert, SA Mufahi, MF Pernice, SI Rae, et al. The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: a review. *Composites Science and Technology*, 71(16):1791–1803, 2011.
- [38] Santiago Poveda Martinez. Lecturas complementarias para materiales compuestos, curso de expresión gráfica en la ingeniería, programa opencourseware de la universidad politécnica de madrid. http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/materialescompuestos.pdf, 2009. [Online; accessed 21-10-2017].
- [39] Alejandro Besednjak and Alejandro Besednjak Dietrich. *Materiales compuestos*, volume 100. Univ. Politèc. de Catalunya, 2005.
- [40] Robert M Jones. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2014.
- [41] Sergio Oller. *Numerical simulation of mechanical behavior of composite materials*. Springer, 2014.
- [42] Ronald F Gibson. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite structures*, 92(12):2793–2810, 2010.
- [43] David C. Jiles. *Introduction to the Principles of Materials Evaluation*. CRC Press, 1 edition, 2007. ISBN 978-0-8493-7392-3, 978-1-4200-0736-7, 0849373921. URL <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=f5b233cd98ad657bb8d5fe48482d3a31>.

- [44] J Autillo, M A. Contreras, Cristina Rodríguez, and F Belzunce. Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (small punch test) en la caracterización mecánica de aceros. 23, 01 2006.
- [45] John Banhart and J Baumeister. Production methods for metallic foams. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 521, 1998.
- [46] Thomas Lüthi. *Non-Destructive Evaluation Methods*. Thomas Lüthi, 1 edition, 2014.
- [47] Ediguer E Franco, Juan M Meza, and Flavio Buiochi. Measurement of elastic properties of materials by the ultrasonic through-transmission technique. *Dyna*, 78(168):58–64, 2011.
- [48] John M Hodgkinson. *Mechanical testing of advanced fibre composites*. Elsevier, 2000.
- [49] Douglas T Queheillalt, David J Syneck, and Haydn NG Wadley. Ultrasonic characterization of cellular metal structures. *Materials Science and Engineering: A*, 323(1-2):138–147, 2002.
- [50] G Frantziskonis. Multiscale characterization of materials with distributed pores and inclusions and application to crack formation in an aluminum alloy. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17(4):359–367, 2002.
- [51] Martin Ostoja-Starzewski. *Microstructural Randomness and Scaling in Mechanics of Materials*. 2007.
- [52] Campillo. Canto. Mauricio. Simulación numérica mediante mef para el estudio del efecto de la presencia de una grieta cercana a la soldadura de una unión circular en t: Contrastación con datos experimentales. Master’s thesis, Tesis (Mg. Cs. Ingeniería Mecánica), Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Mecánica., 2014.
- [53] 3DS. Abaqus release notes. <http://media.3ds.com/support/simulia/public/v613/release-notes/books/rnb/default.htm>, 2017. [Online; accessed 22-6-2018].
- [54] Adina. Adina theory and modeling guide. http://www.adina.com/adinadownloads/docs/tmg-a_89.pdf, 2012. [Online; accessed 22-6-2018].
- [55] Comsol. Introduction de comsol multiphysics. <http://cdn.comsol.com/documentation/5.2.1.152/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>, 2017. [Online; accessed 22-6-2018].
- [56] Inc Ansys. Theory reference for the mechanical apdl and mechanical applications. <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5687835e5cd9e345098b4568&assetKey=AS%3A313357117132800%401451721566538>, 2009. [Online; accessed 22-6-2018].
- [57] Kiran H Shivanna, Srinivas C Tadepalli, Vincent A Magnotta, and Nicole M Grosland. A framework for finite element mesh quality improvement and visualization in orthopaedic biomechanics. pages 621–622, 2009.
- [58] M. Reza Eslami. *Finite Elements Methods in Mechanics*. Solid Mechanics and Its Applications 216. Springer International Publishing, 1 edition, 2014. ISBN 978-3-319-08036-9,978-3-319-08037-6.
- [59] Zhangxin Chen. *Finite Element Methods And Their Applications*. Scientific Computation. Springer, 1st edition. edition, 2010. ISBN 9783642063213,3642063217.

-
- [60] Roger T. Fenner. *Finite Element Methods for Engineers*. World Scientific Publishing Company, 1996. ISBN 9781860940163,1-86094-016-1.
- [61] Olek C Zienkiewicz and Robert L Taylor. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier, 2005.
- [62] Carlos A Felippa. Introduction to finite element methods, ch 7. *University of Colorado, USA*, 2001.
- [63] Simutech Group. Element quality in ansys mechanical 16.0. <https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/239-fea-tips-tricks-element-plots-ansys-16>, 2017. [Online; accessed 22-6-2018].
- [64] Inc SAS IP. Theory reference for the mechanical apdl and mechanical applications. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html, 2017. [Online; accessed 22-6-2018].
- [65] Srinivasa R Bakshi and Arvind Agarwal. An analysis of the factors affecting strengthening in carbon nanotube reinforced aluminum composites. *Carbon*, 49(2):533–544, 2011.
- [66] Hansang Kwon, Dae Hoon Park, Jean François Silvain, and Akira Kawasaki. Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Composites Science and Technology*, 70(3):546–550, 2010.
- [67] Hasan Alhashmy. *Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement*. PhD thesis, Université d’Ottawa/University of Ottawa, 2012.
- [68] International ASTM. *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. ASTM, 2000.
- [69] Christoph Kloss, Christoph Goniva, Alice Hager, Stefan Amberger, and Stefan Pirker. Models, algorithms and validation for opensource dem and cfd-dem. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 12(2-3):140–152, 2012.
- [70] L Pérez, S Lascano, C Aguilar, D Estay, U Messner, IA Figueroa, and I Alfonso. Dem-fea estimation of pores arrangement effect on the compressive young’s modulus for mg foams. *Computational Materials Science*, 110:281–286, 2015.