



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Simulación por Elementos Finitos del Ensayo Transverse Tensile Bundle Test en Materiales Compuestos

Agustín Felipe Escárate Cabezón

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr. Alexis Salas S.

Agosto 2025
Concepción, Chile

©2025 Agustín Felipe Escárate Cabezón

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Quisiera comenzar dando las gracias a todas las personas que de alguna u otra forma me han marcado en esta carrera, a mis tíos Natalia y Nacho que con su experiencia me convencieron de que estudiar Ingeniería Civil Mecánica, sería una opción que me desafiaría y me gustaría, a mis compañeros de carrera con los que intercambiamos palabras y bastantes risas, además de por supuesto ayuda en los estudios y a los profesores por entregar el conocimiento necesario para afrontar la carrera en especial a mi profesor guía Alexis Salas por la oportunidad de trabajar en el proyecto FONDECYT de iniciación 11251620 ***Recovery of mechanical and interfacial properties in recycled carbon fibers using functionalized ceramic nanostructures through a microscale to macroscale perspective*** .

Me quiero dar el tiempo de agradecer a mis compañeros con los que he estado trabajando este último tiempo Felipe, Scarlett, Ignacio, Bastian y Luis muchas gracias por los buenos momentos por las risas, las horas interminables de trabajo tanto en madera como configurando el Aramis, gracias por soportarme y por escucharme. A mis Watones Mecánica, Nico, JP, Haidar, Vale y Benk, gracias por todos los grandes momentos de estudios, trabajos, risas y compartir, su compañía a lo largo de la carrera a sido de las mejores experiencias que he tenido y agradezco haber tenido a mi lado gente como ustedes. Para mis amigos que los conozco desde el colegio Seba, Mati, Parrita, Nico Lagos, Sofi, Vale, les agradezco mucho su amistad, su compañía y los buenos ratos que pasamos, todos estos años de amistad significan mucho para mi. A mi familia les quiero dar las gracias por todo lo que han hecho por mi a lo largo de los años por su preocupación y entendimiento, en especial a mi tata Raul que para mi es un ejemplo a seguir de como se debe ser como persona.

También agradecer a dos personas que me han ayudado bastante en estos últimos 6 meses Janette y Carlos gracias por ayudarme ayudarme a estar y sentirme mejor con migo mismo.

Quiero dar las gracias especialmente a mi madre Patricia, me has dado mucho, me has apoyado en todo lo que necesito, siempre te preocupaste de que no nos faltase nada y nos has impulsado a lograr lo que nos proponemos, muchas gracias Mamá.

Finalmente y aunque sea ridículo gracias a mi notebook, mi Acer Nitro 5, mi nave que desde 2019 llevamos dando la batalla, me ha acompañado a recorrer el mundo, a realizar trabajos que nos llevaron al limite (literalmente a mi pc le dio un cortocircuito en la placa), agradezco que aunque a veces todo parecía que ya no querías más guerra seguiste firme conmigo.

Resumen

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo numérico basado en el método de elementos finitos para simular el ensayo **Transverse Tensile Bundle Test (TTBT)** en materiales compuestos, con el objetivo de evaluar la distribución de esfuerzos y el comportamiento mecánico en la interfaz fibra-matriz . Este estudio responde a las limitaciones de los ensayos en microescala, como la complejidad de la fabricación de probetas, los altos costos y el equipamiento especializado . La metodología incluyó la fabricación de probetas conforme a la norma *ASTM D638*, el uso del sistema de correlación de imagen digital (*DIC*) Aramis para la medición de deformaciones, y la implementación de un modelo numérico en ANSYS Workbench utilizando el *Cohesive Zone Model (CZM)* para simular la fractura .

Las propiedades de los materiales se obtuvieron a partir de ensayos experimentales y literatura especializada. El modelo fue validado comparando los resultados simulados con datos experimentales, logrando una buena concordancia . Los resultados de la simulación micromecánica permitieron identificar que la falla se inicia en los extremos de la hebra de fibra, donde se concentran los esfuerzos, coincidiendo con lo expuesto en la literatura. El valor obtenido para el esfuerzo normal interfacial (*INS*) fue de 20.3 [MPa], un rango coherente con los valores reportados en la literatura y que representa aproximadamente entre un 10% y 15% del esfuerzo cortante interfacial (*IFSS*) típico. Se concluye que la metodología propuesta es una alternativa viable para caracterizar la adhesión en la interfaz a mesoescala, ofreciendo ventajas en términos de costo, tiempo y simplicidad experimental

Abstract

In this work, a numerical model based on the finite element method was developed to simulate the **Transverse Tensile Bundle Test (TTBT)** in composite materials, aiming to evaluate stress distribution and mechanical behavior at the fiber-matrix interface . This study was motivated by the experimental limitations of microscale tests, such as complex specimen preparation, high costs, and the need for specialized equipment . The methodology involved fabricating specimens based on the *ASTM D638* standard, using the *digital image correlation (DIC)* system Aramis to measure deformations, and the implementation of a numerical model in ANSYS Workbench with the *Cohesive Zone Model (CZM)* to simulate fracture .

Material properties were determined from experimental tests and specialized literature . The model was validated by comparing simulated results with experimental data, showing good agreement. The micromodel simulation results identified stress concentrations at the fiber ends, associated with the onset of interfacial debonding. The estimated interfacial normal stress (INS) value was 20.3 [MPa], which is consistent with literature and represents approximately 10% to 15% of typical *interfacial shear stress (IFSS)* values. It is concluded that the proposed methodology is a viable alternative for the mesoscale characterization of fiber-matrix adhesion, offering advantages in cost, time, and experimental simplicity

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	4
1 Introducción	5
1.1 Contexto	5
1.2 Justificación	6
1.3 Hipótesis	7
2 Objetivos	7
2.1 Objetivo general	7
2.1.1 Objetivos específicos	7
3 Estado del arte y Marco teórico	7
3.1 Interfaz	7
3.1.1 Caracterización de la interfaz	8
3.1.2 Métodos para mejorar la adhesión fibra/matriz	10
3.2 Ensayos en microescala	12
3.3 Ensayos en mesoescala	16
3.4 Simulaciones	21
3.4.1 Método de los Elementos Finitos	21
3.4.2 Generalized Method of Cell	23
3.4.3 Cohesive Zone Model	24
3.4.4 Boundary Element Method	28
3.4.5 Extended finite element method	29
3.4.6 Phase-field Model	29
3.4.7 Elemento de Volumen Representativo	30
3.5 Aramis (DIC)	32
3.5.1 Calculo de las deformaciones con GOM Aramis	32
4 Metodología	35
4.1 Parte I: Investigación	35
4.1.1 Modelos y software	35
4.1.2 Propiedades mecánicas	35
4.2 Parte II: Preparación de muestras	36
4.2.1 Geometría y moldes	36
4.2.2 Fabricación	36
4.2.3 Maquinado CNC	37
4.2.4 Técnica de medición óptica: Aramis GOM	37
4.2.5 Preparación probetas Aramis	39
4.3 Parte III: Ensayos	39
4.3.1 Transverse Fiber Bundle	39
4.3.2 Implantación Aramis	39
4.4 Parte IV: Simulación en Mesoescala	40
4.4.1 Geometria y materiales	40

4.4.2	Mallado, Definición de contactos y Fractura	42
4.4.3	Análisis de Sensibilidad	45
4.5	Parte VI: Simulación Micromecánica	46
4.5.1	Geometria y materiales	46
4.5.2	Mallado y Definición de contactos y elementos	48
4.5.3	Condiciones de Borde	49
4.6	Parte VII: Análisis de resultados	50
4.6.1	Validación del modelo	51
4.7	Cronograma	51
5	Resultados y Discusiones	53
5.1	Caracterización mecánica de la matriz	53
5.2	Resultados Experimentales Transverse Fiber Bundle	53
5.3	Resultados de la Simulación en Mesoescala	54
5.3.1	Análisis de Sensibilidad	54
5.3.2	Resultados de los esfuerzos en la simulación	57
5.3.3	Resultados de las deformaciones en la simulación	58
5.4	Resultados de la Simulación en Microescala	60
5.4.1	Resultados de los esfuerzos en la simulación	60
5.5	Resultados Esfuerzo Normal Interfacial Transverse Fiber Bundle	62
6	Conclusiones	64
	Anexo A Carta Gantt	70
	Anexo B Código APDL	71

Lista de Figuras

Figura 3.1	Esquema de Interfaz/Interface[27].	8
Figura 3.2	(a) Imágenes <i>SEM</i> de los patrones de grietas y superficies fracturadas de fibra de carbono recubierto con ANF [30] y (b) imágenes <i>AFM</i> de compuesto de CF-CNTs y topografía de material antes de tratamiento térmico [31, 32]. .	9
Figura 3.3	(a) Imagen de probeta de fibra de carbono usando <i>EELS</i> [33] y (b) <i>TEM</i> de matriz cerca de fibra en ensayo de fibra única [34].	10
Figura 3.4	Resultados espectroscopía Raman en fibras activadas, a) pirólisis en dos pasos y b) pirólisis Microondas [35].	10
Figura 3.5	Métodos de modificación superficial para fibra de carbono [37].	11
Figura 3.6	Métodos húmedo de modificación superficial [40].	11
Figura 3.7	Método seco de modificación superficial [41].	12
Figura 3.8	Método de nanopartículas [42].	12
Figura 3.9	Esquema de (a) el proceso de preparación de muestras, (b) muestras tipo "dog-bone" de una y dos fibras, y (c) geometría y orientación relativa de las fibras. Las dimensiones de las muestras para tracción fueron consistentes con la norma ASTM D638. grosor de 6 mm en todos los casos[47].	14
Figura 3.10	Evolución del campo de deformación longitudinal (ε) en las cercanías de una única macrofibra de vidrio bajo distintos niveles de esfuerzo global. La carga de tracción fue aplicada en la dirección y [47].	14
Figura 3.11	Evolución de los campos de deformación longitudinal (ε_{yy}) bajo distintos niveles de esfuerzo global en la proximidad de muestras con doble fibra de vidrio: (a) FF-1 φ 0°, (b) FF-1 φ 30°, (c) FF-1 φ 45°, (d) FF-1 φ 60° y (e) FF-1 φ 90°. Los mapas de contorno en la columna derecha fueron extraídos en niveles de esfuerzo global justo antes de la falla de la matriz en todos los casos. Barra de escala: 5 mm [47].	15
Figura 3.12	Dimensiones de la probeta <i>TTSF</i> (mm)[48].	16
Figura 3.13	Micrografías SEM de especímenes <i>TTSF</i> antes y durante la aplicación de carga (el eje de carga es vertical). (a) Especimen antes de la carga, (b) iniciación del despegue (especimen 3), (c) propagación extensa del despegue (especimen 2), (d) desvío de una grieta de despegue fuera de la interfaz (especimen 4) [48].	17
Figura 3.14	Especímenes <i>TTBT</i> después del desmoldeo (a), mecanizado (b) y ensayo (c) [52].	18
Figura 3.15	Preparación de especímenes <i>FBC</i> para (a) tracción transversal y (b) corte tipo <i>Iosipescu</i> , y dimensiones de los especímenes <i>FBC</i> para (c) ensayo de tracción transversal y (d) ensayo de corte tipo <i>Iosipescu</i> [53].	19

Figura 3.16 eDistribuciones de esfuerzo a lo largo de la interfaz fibra–matriz en el ensayo de tracción transversal. Distribución del esfuerzo normal y del esfuerzo cortante a lo largo de la interfaz fibra–matriz extraída del espécimen con distintos ángulos iniciales del haz de fibras: (a) 90° , (b) $76,0^\circ$, (c) $63,4^\circ$, y (d) $45,0^\circ$ [50].	21
Figura 3.17 Modelo macro de elementos finitos para un octavo del espécimen TFB en (a) y (b), y microcelda representativa unitaria (micro-RUC) que contiene subceldas de fibra, matriz e interfase en (c) [23].	22
Figura 3.18 Resultados del micromodelo en la iniciación de la falla: distribución de las tensiones interfaciales T_n y T_t del elemento amarillo en (a), y tensión normal interfacial máxima $T_{n,m\acute{a}x}$ de los elementos verdes enfocados en (b) [23].	24
Figura 3.19 Distribución de tensiones en la interfaz del haz de fibras en la dirección y en la carga máxima: (a) distribución de la tensión normal de los especímenes <i>TFBT</i> , y (b) distribución del esfuerzo de corte de los especímenes <i>LFBSs</i> [54].	25
Figura 3.20 Una celda unitaria representativa (RUC) típica dividida en $N_b \times N_c$ subceldas en el modelo GMC (a) e ilustración del módulo de la interfase (b) [23].	26
Figura 3.21 Diferentes formas de la ley de tracción–separación: (a) exponencial, (b) bilineal, (c) polinómica y (d) trapezoidal [57].	27
Figura 3.22 Distribución aleatoria de fibras observada en la sección transversal de un compuesto unidireccional real [61].	31
Figura 3.23 Elemento de volumen representativo [62].	31
Figura 3.24 Representación de la topología utilizada para la deformación.	34
Figura 4.1 Procedimiento para creación de geometría y moldes.	36
Figura 4.2 Maquinado CNC.	37
Figura 4.3 Configuración Aramis.	38
Figura 4.4 Probeta con patrón de puntos.	39
Figura 4.5 (a) Probeta ASTM D638 sin el volumen de la hebra de fibra (b) Un octavo de probeta usada en la simulación.	40
Figura 4.6 Geometría de la hebra de fibra de carbono.	42
Figura 4.7 Geometría RVE cuadrado.	42
Figura 4.8 (a) Elementos con nodos coincidentes (b) Elementos con nodos desfasados.	43
Figura 4.9 Mallado de la geometría donde va el material compuesto de fibra de carbono.	44
Figura 4.10 (a) Sección con los elementos mas pequeños variando de 0.1 a 1 [mm] y (b) Mallado de la geometría con elementos de 1.6 [mm].	45
Figura 4.11 (a) Desplazamiento (b) Simetría en X (c) Simetría en Z (d) Simetría en Y sobre la hebra de compuesto (e) Simetría en Y sobre la probeta de resina.	46
Figura 4.12 Representación del <i>RVE</i> usado en la simulación.	47

Figura 4.13 Representación de la división de las líneas donde las líneas rojas corresponden a las divisiones de la fibra, las líneas azules son las divisiones de las líneas frontales a la fibra y las líneas negras son las líneas con divisiones libres. . . .	50
Figura 4.14 a) Vista frontal del <i>RVE</i> mallado distinguiéndose sus tres componentes b) Elementos de interfaz <i>INTER205</i> c) Vista Isometrica del <i>RVE</i> completo. . .	51
Figura 4.15 Ilustración de las condiciones de borde periódicas.	51
Figura 4.16 Metodología	52
Figura 5.1 Ensayo muestras de Resina Epo200/813.	54
Figura 5.2 Campo de deformacion, probeta TFB	55
Figura 5.3 Curva esfuerzo deformación, probeta TFB	56
Figura 5.4 Deformación normal máxima en Y con respecto el amortiguamiento y el exponente de ley de potencia.	57
Figura 5.5 Esfuerzo normal máximo en Y con respecto el amortiguamiento y el exponente de ley de potencia.	58
Figura 5.6 Distintos mallados usados en analisis de sensibilidad (a) nodos casi coincidentes (b) nodos coincidentes en el exterior pero no en interior	59
Figura 5.7 Diagrama 1/8 de hebra (a) Esfuerzo normal en Y (b) Esfuerzo normal en X (c) Esfuerzo normal en Z.	59
Figura 5.8 (a) Esfuerzo normal en Y (b) Esfuerzo normal en X (c) Esfuerzo normal en Z. Largo de referencia correspondiente a el grosor de la hebra de carbono. . .	60
Figura 5.9 Diagrama 1/8 de hebra (a) Deformación normal en Y (b) Deformación normal en X (c) Deformación normal en Z.	61
Figura 5.10 Detalle deformación de un elemento en X.	61
Figura 5.11 Esfuerzos en el eje Y (a) Fibra (b) Resina.	62
Figura 5.12 Esfuerzos en la Interfaz fibra-matriz.	62
Figura 5.13 Curva esfuerzo deformación para la simulación y el resultados de los experimentos.	63
Figura A.1 Carta Gantt	70

Lista de Tablas

Tabla 3.1	Propiedades mecánicas de los materiales constituyentes [53]	20
Tabla 3.2	Resistencia a la tracción transversal de sistemas compuestos [MPa] [53] . . .	20
Tabla 3.3	Rangos resumidos de resistencia interfacial [50]	22
Tabla 3.4	Propiedades mecánicas y térmicas de los componentes [23].	23
Tabla 3.5	Contraste de la resistencia normal interfacial calculada en el composite TFB y la resistencia al corte interfacial en el composite de una sola fibra/epoxi. . .	23
Tabla 3.6	Propiedades elásticas de compuestos unidireccionales carbono/epoxi y de la resina [54].	25
Tabla 4.1	Parámetros del sistema de medición.	38
Tabla 4.2	Parámetros utilizados en las pruebas Iosipescu y $45^\circ/0^\circ$	40
Tabla 4.3	Propiedades mecánicas de los materiales.	41
Tabla 4.4	Configuraciones utilizadas en el análisis micromecánico.	43
Tabla 4.5	Propiedades del material compuesto de fibra de carbono (CFR).	44
Tabla 4.6	Tamaño de los elementos en la probeta de resina.	45
Tabla 4.7	Parámetros del modelo de delaminación cohesiva.	46
Tabla 4.8	Medidas de un octavo del <i>RVE</i>	48
Tabla 4.9	Propiedades mecánicas de los materiales en APDL.	48
Tabla 4.10	Propiedades mecánicas del material cohesivo en APDL.	49
Tabla 4.11	Carta Gantt	52
Tabla 5.1	Resultados caracterización mecánica.	53
Tabla 5.2	Porcentaje de influencia de cada parámetro sobre los modelos.	56
Tabla 5.3	Comparación de resistencias a la tracción transversal.	62

1 Introducción

1.1 Contexto

En la actualidad, los materiales compuestos reforzados con fibra (*Fiber Reinforced Composite* o *FRC*, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel fundamental en diversas industrias gracias a su capacidad para combinar resistencia mecánica, tenacidad y bajo peso. Este conjunto de propiedades ha permitido su uso sostenido durante más de tres décadas, impulsando una creciente producción y consumo a nivel mundial, pasando de 8.2 billones de dólares en 2014 a un tamaño de mercado estimado de 189.8 billones de dólares para 2032 [1, 2, 3]. Este incremento en el uso de los materiales compuestos se ve reflejado en sectores como la construcción, la aeronáutica, la aviación, artículos deportivos y la industria eólica [2, 4, 5]. Ejemplos destacados de su aplicación incluyen los automóviles BMW i3 e i8 en el sector automotriz y los aviones Boeing 787 y Airbus A350 XWB en el ámbito aeroespacial [6].

Los materiales compuestos están formados por un refuerzo, generalmente fibras, y una matriz polimérica que puede ser termoestable o termoplástica, dependiendo de los requerimientos específicos de la aplicación. Las matrices termoestables, como las resinas epoxi, se han consolidado como la opción preferida para estructuras de alto rendimiento en las industrias aeroespacial y automotriz debido a sus propiedades mecánicas superiores. Por su parte, las matrices termoplásticas, al ser reutilizables, presentan ventajas significativas en términos de sostenibilidad y reciclaje, lo que amplía sus posibilidades de aplicación [7, 8].

Los refuerzos hoy en día están formados en su mayoría por fibras, las cuales pueden mejorar las cualidades mecánicas del material, como rigidez, resistencia a la fatiga, dureza, etc. En general, se utiliza la fibra de carbono en compuestos avanzados, seguido por aramidas en compuestos intermedios y fibra de vidrio en materiales compuestos de uso más genérico.[9].

Un componente clave en estos materiales es la interfaz fibra-matriz, responsable de transferir la carga mecánica. Se ha comprobado que un gran número de modos de falla, incluida la delaminación, ocurre en la interfaz fibra-matriz [10]. Para mejorar su resistencia, se emplean tratamientos superficiales como recubrimientos y agentes de acoplamiento, siendo el *sizing* uno de los más utilizados. Este tratamiento consiste en la aplicación de un revestimiento fino, generalmente de materiales orgánicos, que protege las fibras durante el procesamiento, lo cual mejora su manejo y optimiza la adhesión con la matriz [11, 12].

La interfaz fibra-matriz suele ser el punto más vulnerable frente a fallos mecánicos, ya que tiende a ceder antes que los componentes individuales. Por esta razón, la resistencia al corte interfacial (*Interfacial Shear Stress* o *IFSS*, por sus siglas en inglés) se utiliza como una medida para cuantificar la calidad de la interacción físico-química entre la fibra y la matriz, siendo un factor crítico para determinar el rendimiento global del material compuesto [11, 12].

Dentro de los métodos utilizados para determinar el *IFSS*, se emplean enfoques en distintas escalas. A nivel micro, se analiza la interacción entre una fibra individual y la matriz mediante ensayos como el *microbond test* [13, 14]. A nivel meso, se estudia el comportamiento de múltiples fibras a través de pruebas como el *fiber bundle pull-out test* [15] y el *Iosipescu shear test* [16]. Si bien la obtención de un valor cuantitativo de la resistencia interfacial puede resultar compleja y costosa debido al equipamiento requerido en el caso del ensayo a microescala, estos ensayos

permiten la comparación entre distintos tratamientos, como el *sizing* [17].

Los test anteriores solo se limitan a caracterizar el esfuerzo en la interfaz bajo una carga cortante, mientras que se tiene conocimiento de que los materiales compuestos tienden a fallar también bajo cargas normales o producto de una combinación de modos de carga en la interfaz fibra-matriz [18]. Diferentes métodos experimentales han sido creados para solucionar este problema tales como *Broutmann test* [19], *Transverse tensile test* [20] y el *Cruciform tensile test* [21].

La característica en común que comparten tanto los test con cargas de corte y el de cargas transversales es la escala a la que se realizan, la cual es la microescala. Para el caso de las últimas pruebas mencionadas, el resultado que se obtiene es el esfuerzo normal interfacial (*Interfacial Normal Stress* o *INS*, por sus siglas en inglés). Sin embargo, a mesoescala no es posible obtener estos valores de forma directa, lo que plantea la necesidad de verificar la correlación entre los ensayos a diferentes escalas para garantizar resultados precisos. Además, se ha observado que algunos métodos, como el mencionado *single fiber pull-out test*, requieren una preparación experimental más compleja y presentan altas tasas de fallos, lo que los hace menos eficientes en términos de tiempo y recursos. Aunque este método permite una mejor estimación más detallada del comportamiento fibra-matriz a microescala, su alta variabilidad y la complejidad experimental destacan la importancia de desarrollar técnicas más consistentes y comparables para evaluar los esfuerzos a distintas escalas [22].

Dentro de la literatura de los ensayos transversales no es posible encontrar fórmulas directas para calcular los esfuerzos en la interfaz. Llevado esto a mesoescala, se vuelve más complicado encontrar una relación que determine una aproximación al *INS*, por lo que se requiere de un análisis teórico para encontrar un valor numérico. La simulación mediante el método de elementos finitos se utiliza como herramienta para estudiar la distribución de esfuerzos en la interfaz fibra-matriz, además de permitir el análisis multiescala, lo que permite obtener el esfuerzo normal interfacial [23].

1.2 Justificación

Como se menciono los ensayos a microescala tienen la diversas dificultades una de ellas asociada a la fabricación debido a que dependiendo del ensayo esta consume mucho tiempo debido al cuidado que se debe tener al fabricar la probeta, luego hay tiempo asociado al mecanizado y pulido de estas. Otra complicación es la maquina que se necesita la cual para algunos test no se encuentra en la universidad, lo que haría de su realización un proceso muy caro, por lo cual se abre la posibilidad de buscar alternativas en mesoescala que sean más rápidas, fáciles y baratas de realizar para medir la resistencia interfacial, además si bien se puede encontrar bastante información sobre los ensayos para medir el *IFSS*, no es el caso para el *INS*, por lo que existe una oportunidad de investigación usando los ensayos de esfuerzos transversales y ver si es que son comparables a los ensayos que miden el *IFSS*. Por este motivo, se elige como opción el ensayo *transverse tensile bundle test*, debido a que su geometría es fácil de fabricar, ya que se obtiene de la norma ASTM-D638, luego del curado solo requiere de mecanizado y para ensayar la probeta se usa una máquina de ensayos universal la cual se encuentra en la universidad.

Como se expuso anteriormente, no existe una fórmula matemática directa para la mayoría de los ensayos en mesoescala que midan la adhesión fibra-matriz, estos requieren de la simulación por el método de elementos finitos, la cual tiene la flexibilidad de acoplarse con otras formulaciones

teóricas para permitir obtener aproximaciones a los valores deseados, también permite analizar cómo se distribuyen los esfuerzos en la interfaz, cómo se propaga la falla, etc. Otro uso que se le puede dar es el de simular distintos tratamientos de *sizing* y analizar como se comporta el material compuesto con el nuevo tratamiento. Esto puede ser de utilidad en el caso del reciclaje de fibras de carbono debido a que estas no poseen ningún tratamiento químico para mejorar la adhesión de la fibra y la matriz.

1.3 Hipótesis

En este trabajo se espera encontrar una aproximación al *INS* utilizando el método de los elementos finitos que este en un rango de 10% a 15% del valor del *IFSS* medido en los ensayos de fragmentación de fibra única.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Simular mediante el método de elementos finitos el ensayo *Transverse Tensile Bundle Test*, evaluando la distribución de esfuerzos y el comportamiento mecánico del material compuesto.

2.1.1 Objetivos específicos

1. Investigar modelo de elementos finitos que permita simular el ensayo *Transverse Tensile Bundle Test*, identificando condiciones de borde, propiedades materiales, etc.
2. Determinar las propiedades mecánicas de los materiales para ser usados en la simulación a través de datos experimentales, literatura, datasheet, etc.
3. Desarrollar y evaluar un modelo basado en el método de elementos finitos para simular el ensayo *Transverse Tensile Bundle Test*, analizando la distribución de esfuerzos y el comportamiento mecánico del material compuesto bajo condiciones de carga específicas.
4. Validar la precisión del modelo numérico mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con datos experimentales, determinando las discrepancias y sus posibles causas.

3 Estado del arte y Marco teórico

3.1 Interfaz

Los materiales compuestos son normalmente conocidos por poseer dos constituyentes, el refuerzo que soporta las cargas y la matriz que protege las fibras envolviendo el material además de también transmitir cargas. Lo que se omite es que esta afirmación es incorrecta o se podría considerar incompleto, ya que en realidad existe un tercer constituyente que es la interface. Esta es una región tridimensional, la cual corresponde a la interacción mecánica y/o química entre la resina y la fibra, que posee diferentes propiedades de los otros constituyentes. La interfaz se considera como una zona de dos dimensiones que puede ser una capa de átomos hasta poseer un espesor de unos cuantos micrómetros. Una representación simple para entender

este compuesto se puede apreciar en la Figura 3.1. El nivel de adhesión fibra/matriz se debe a la interacción simultánea de las fuerzas mecánica y químicas en la interfaz combinada con la interface, a esta también se le llama adhesión interfacial, siendo esta propiedad fundamental en el comportamiento del compuesto, ya que de esta depende la dureza, *Interlaminar Shear Stress* o (*ILSS* por sus sigla en inglés) , modos de fallas, etc. [24, 25, 26].

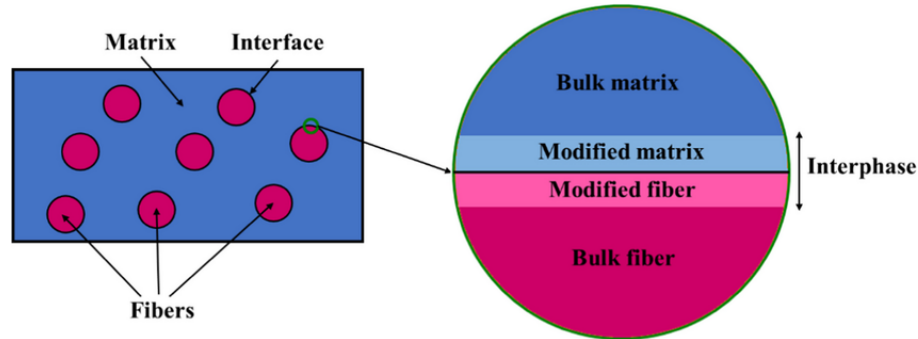


Figura 3.1 Esquema de Interfaz/Interface[27].

Sobre la adhesión se puede decir que la que es de carácter física se compone por entrelazamiento mecánico y fuerzas de Van der Waals, y que la química se compone de adhesión química e hidrógeno, estos métodos juntos realzan la cohesión fibra/matriz. Otra característica de la interfaz es la transferencia de carga, la cual relaciona la plasticidad y la dureza de la matriz para lograr transferir los esfuerzos a los refuerzos de forma uniforme. La interfaz se caracteriza por ser una estructura que depende de los materiales que se usen para formarla, esto genera que rendimientos variables en cada compuesto. Es por esto que el estudio de como mejorar la adhesión entre la fibra y la matriz toma relevancia ya que se puede aumentar el rendimiento mecánico del material a partir de tratamientos superficiales a la fibra o cambios en la composición de la resina [28].

3.1.1 Caracterización de la interfaz

Son distintas las formas de caracterizar a nivel de microestructura la interfaz, uno de ellos es *Scanning electron microscopy* o (*SEM* por sus siglas en inglés) es una tecnología que explica las propiedades y el comportamiento del material, estos lo hace entregando información de la morfología y la organización de la zona estudiada[28, 29]. En la Figura 3.2a se aprecia un ejemplo de *SEM* .

El *AFM* utiliza la fuerza de interacción débil entre una sonda y los átomos de la superficie de una muestra para obtener información sobre su morfología. La capacidad de imagen de alta resolución del *AFM* revela características morfológicas de la interfase en materiales compuestos, como la rugosidad y la distribución de fases como en la Figura 3.2b. Esta información es valiosa para comprender cómo se forma la interfase, la relación entre su estructura y propiedades, y para optimizarla[28].

La caracterización por *TEM* es una técnica comúnmente utilizada para estudiar la microestructura de los materiales. Su principio básico consiste en dirigir un haz de electrones de alta velocidad, generado por un cañón de electrones, hacia una muestra ultrafina. Luego, se emplean lentes electromagnéticas para ampliar y visualizar progresivamente el haz de electrones

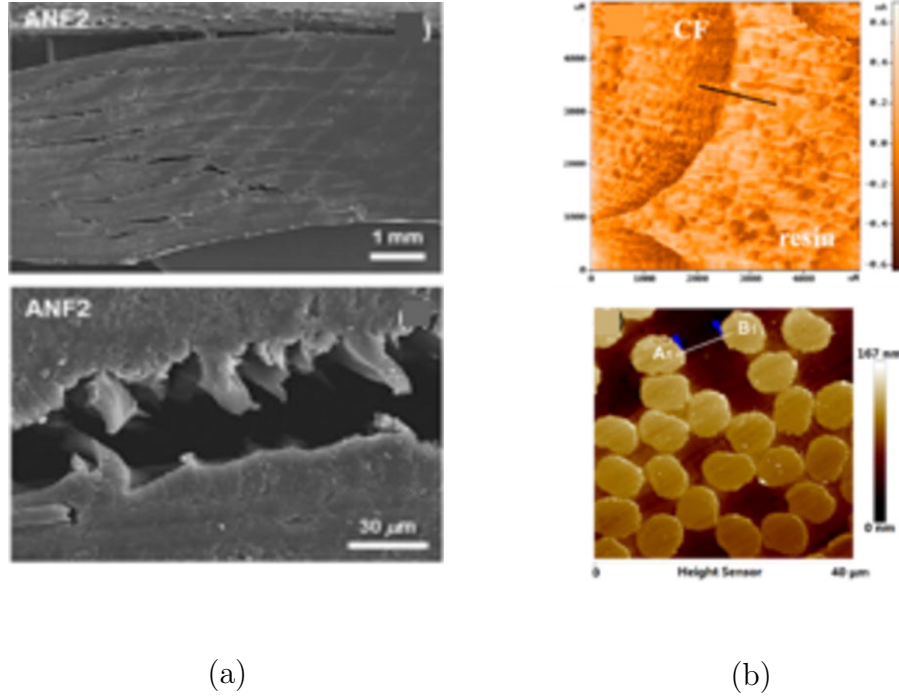


Figura 3.2 (a) Imágenes *SEM* de los patrones de grietas y superficies fracturadas de fibra de carbono recubierto con ANF [30] y (b) imágenes *AFM* de compuesto de CF-CNTs y topografía de material antes de tratamiento térmico [31, 32].

después de que atraviesa la muestra, como se aprecia en la Figura 3.3b. Actualmente, la resolución del *TEM* ha avanzado hasta la escala sub-angstrom, lo que permite la caracterización de materiales desde el mesoescala hasta el nivel atómico [28].

El *principle of electron energy loss spectroscopy* (*EELS* por sus siglas en inglés), analiza la pérdida de energía que sufren los electrones de un haz incidente al dispersarse inelásticamente al atravesar una muestra. Un analizador de energía registra estas pérdidas, generando un espectro que revela información detallada sobre los mecanismos de dispersión electrónica, la composición elemental micro-regional, los enlaces químicos y la estructura electrónica del material [28]. Ejemplo de esta técnica se puede ver en la Figura 3.3a.

La espectroscopia se fundamenta en el fenómeno de la dispersión Raman, analizando el cambio en la frecuencia de la luz dispersada tras la interacción de un láser con una muestra. A través de esta técnica, se obtiene información sobre las vibraciones moleculares del material. En el contexto de las fibras de carbono, el espectro Raman se utiliza para cuantificar el daño mediante la relación de bandas I_D/I_G . Este indicador revela la severidad de los defectos superficiales en las fibras, donde una mayor relación I_D/I_G se asocia a un mayor grado de defecto, también denominado grado de grafitización. El espectro Raman de las fibras de carbono presenta cuatro bandas características que informan sobre el grado de imperfecciones (banda I), el grado de cristalinidad (banda G) y la presencia de estructuras amorfas (bandas D y D''), como se aprecia en la Figura 3.4 [28, 35].

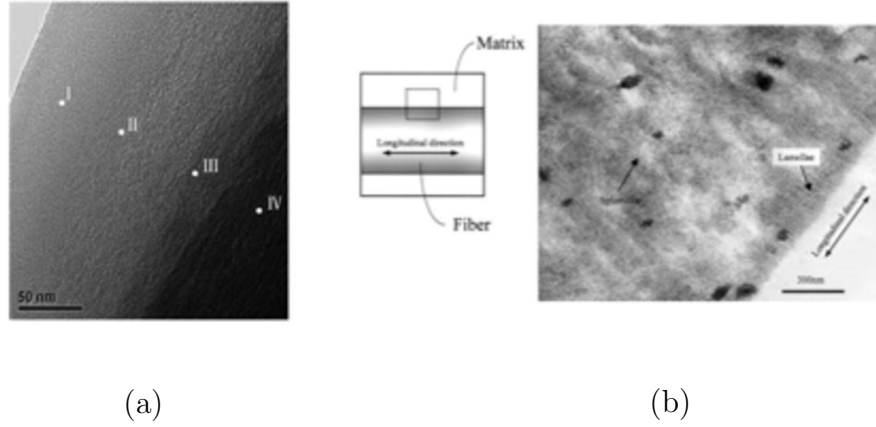


Figura 3.3 (a) Imagen de probeta de fibra de carbono usando *EELS* [33] y (b) *TEM* de matriz cerca de fibra en ensayo de fibra unica [34].

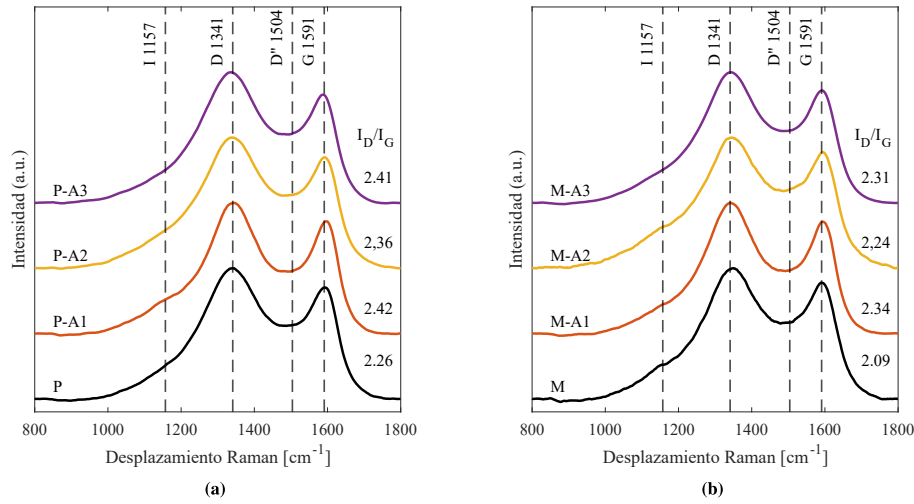


Figura 3.4 Resultados espectroscopía Raman en fibras activadas, a) pirólisis en dos pasos y b) pirólisis Microondas [35].

3.1.2 Métodos para mejorar la adhesión fibra/matriz

Existen una variedad de métodos para mejorar la adhesión fibra/matriz dentro de los que se encuentra el *sizing*, el cual es un recubrimiento superficial en las fibras, esta formado mayoritariamente por materiales orgánicos y se puede encontrar en la mayoría de las fibras comerciales [36]. Generalmente el *sizing* es hecho a medida para cada caso, debido a que este debe ser compatible con la matriz que se quiera usar y su optimización es en base a experiencia empírica. Además se considera al *sizing* una caja negra donde se conoce la formulación general pero no la específica.

Siguiendo con los demás métodos de modificación superficial, estos buscan al igual que el *sizing* mejorar la adhesión debido a que la fibra de carbono al no poseer grupos polares su unión con la mayoría de las matrices poliméricas suele ser débil. Los métodos se pueden dividir en tres categorías los húmedos, secos y nanopartículas. En la Figura 3.5 se aprecia los distintos tratamientos superficiales [37].

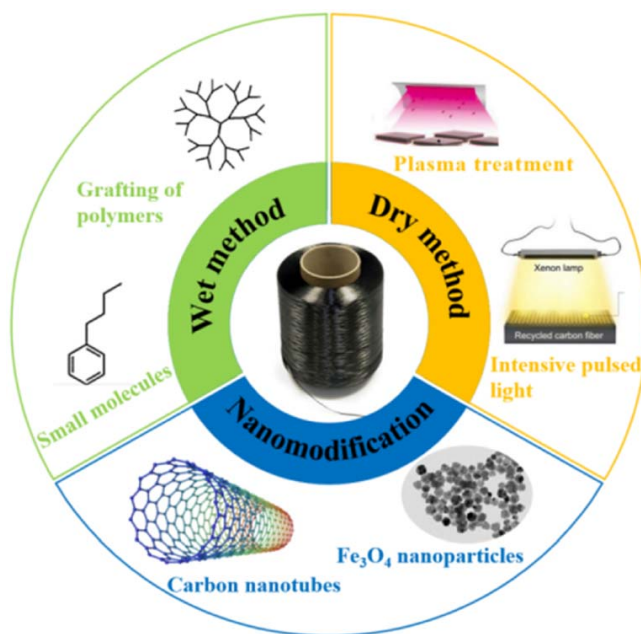


Figura 3.5 Métodos de modificación superficial para fibra de carbono [37].

Los métodos húmedos modifican física y químicamente la superficie de la fibra de carbono en una solución. El método de oxidación ácida implica principalmente la oxidación de la superficie de la fibra de carbono en diversos grados, como se muestra en la Figura 3.6. Este proceso se lleva a cabo mediante el control de la temperatura de reacción, el tiempo de reacción, la concentración del medio y otras condiciones. La oxidación ácida puede alterar significativamente la rugosidad superficial de las fibras [37]. Los tratamientos electromecánicos usan las propiedades conductivas de la fibra de carbono como ánodo de una celda electrolítica, luego la superficie del refuerzo es oxidada y grabada por la acción de la electricidad, este tipo de tratamiento puede usar moléculas pequeñas como también polímeros, es rápido y fácil de controlar aunque consume bastante energía, este método mejora la adhesión interfacial en un rango de 64-199 % [37, 38, 39].

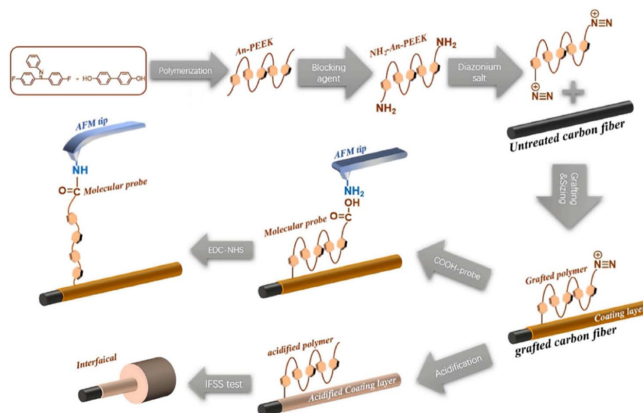


Figura 3.6 Métodos húmedo de modificación superficial [40].

Sobre los tratamientos secos se puede encontrar el plasma, la irradiación por alta energía y el tratamiento por calor. El plasma cambia la energía libre de la superficie mejorando la mi-

croestructura por medio del grabado superficial, lo que mejora la interfaz entre la fibra y la resina epoxica, como se muestra en la Figura 3.7. La irradiación de alta energía cambia la superficie de la fibra de carbono a una escala mas pequeña, creando nanoestructuras. Esto mejora la rugosidad de la superficie y, lo más importante, hace que las fibras se unan mucho mejor al material que las rodea, fortaleciendo el compuesto final [37].

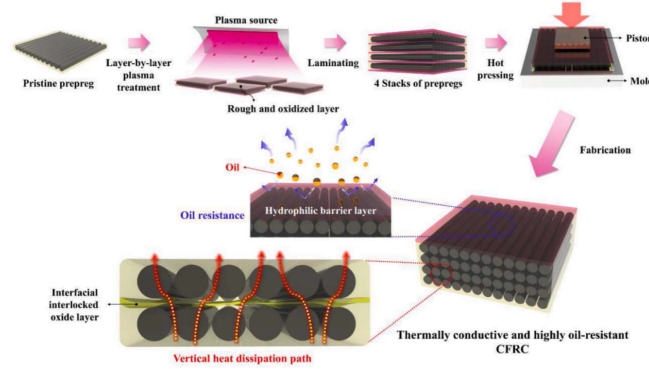


Figura 3.7 Método seco de modificación superficial [41].

Las nanopartículas se usan para modificar la superficie de las fibras de carbono mediante métodos como la modificación electroquímica, la deposición química de vapor y el método hidrotermal, entre otros. Se establece que la microestructura superficial de las puede ser mejorada, los defectos superficiales de las fibras pueden ser reducidos, y la eficiencia de transferencia de carga entre las fibras y la matriz de resina puede ser incrementada por el uso de estas nanopartículas [37]. Un ejemplo de como funcionan las microestructuras se puede apreciar en la Figura 3.8

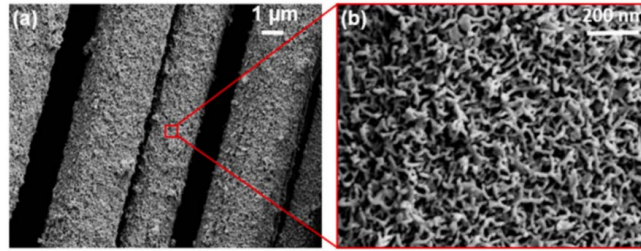


Figura 3.8 Método de nanopartículas [42].

3.2 Ensayos en microescala

En este tipo de ensayo la escala es a nivel de fibra lo que corresponde a un rango de medidas entre $100\text{ nm} - 2\text{ }\mu\text{m}$. Se distinguen dos esfuerzos que caracterizan la adhesión fibra-matriz, el primero es el *IFSS*, el cual es la medida oficial para medir la adhesión en los ensayos experimentales [43], y el segundo corresponde al *INS*, el cual es una medida de adhesión entre la fibra y la matriz menos utilizada, sin embargo esta propiedad toma importancia cuando ocurre la aplicación de una carga perpendicular a la dirección de la fibra, donde una buena resistencia de la unión fibra/matriz incrementa la capacidad de carga transversal y la resistencia a la fluencia transversal del compuesto. También la resistencia normal de la unión es importante para el caso de una grieta en la matriz que se propaga hacia una fibra [44].

Dentro de los ensayos para medir el esfuerzo de corte interfacial se encuentra el *Single fiber fragmentation test (SFFT)*, es un método relativamente simple debido a la instrumentación que usa, este ensayo consiste en colocar una fibra la cual es recubierta de matriz para formar una probeta, la cual es traccionada en una maquina de ensayo universal lo que produce que la fibra se rompa hasta que los fragmentos alcancen una longitud critica [45].

Otro ensayo de microescala es el *Single-fibre pull-out test* el cual consiste en realizar un ensayo de tracción en una fibra individual parcialmente incrustada en la resina, donde se debe medir la fuerza necesaria para extraer la fibra de la matriz. Este test resulta complejo de realizar, pero de ser bien ejecutado puede proveer de información confiable para obtener el corte interfacial.

Existen más metodos para calcular el *IFSS* ya sea el *Microbond test*, *Push-in tests* los cuales si bien obtienen resultados confiables para el esfuerzo interfacial siguen siendo muy complicados de realizar, tambien como se a señalado estos solo se centran en analizar lo que ocurre si existe un esfuerzo de corte en el material pero no se centra en lo que ocurre en el caso de que la carga sea transversal, para estos caso se desarrollaron otros ensayos los cuales analizan lo que ocurre con la adhesión fibra/matriz bajo cargas transversales [12, 13, 18, 46].

En la literatura se puede encontrar tres ensayos para estudiar la adhesión interfacial bajo cargas transversales el primero es el *Broutmann test* este se realiza de forma que al aplicar una fuerza de compresión sobre la probeta, las propiedades transversales de la interfaz pueden ser determinadas. Debido al coeficiente de Poisson, los esfuerzos de compresión resultarán en tensión radial alrededor de la fibra, esto resulta en que los esfuerzos serán mayores en la sección media estrangulada de la muestra. Por lo tanto, el despegue ocurrirá bajo esfuerzos transversales. Sin embargo la fuerzas de compresión sobre el material pueden resultar en una falla temprana de la probeta o de la fibra [18].

El ensayo *Cruciform tensile test* concite en una probeta de forma cruciforme la cual es sometida a tracción. La forma cruciforme mitiga la influencia de los bordes libres de la fibra lo que elimina la creación de zonas con concentración de esfuerzos y hace que la tensión sea decreciente desde la parte central hacia los brazos, esto se realiza para que la falla ocurra en la parte central de la muestra y crezca progresivamente hacia los extremos [18].

Por ultimo el *Transverse tensile test* es un método más directo para estudiar las propiedades de la interfaz bajo cargas normales, este consiste en posicionar una fibra en el centro de la probeta, para luego ensayarla y así estudiar lo que ocurre con la fibra. Una forma de llevar a cabo este test es como lo realiza R. Livingston et al. [47], quienes caracterizaron el mecanismo de desprendimiento en la interfaz fibra-matriz de forma experimental, desarrollando un molde para crear la probeta y ubicar las fibras en las posiciones requeridas como se aprecia en la Figura 3.9 , las configuraciones usadas son 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, las cuales se ensayan mientras se hacia uso del *Digital Image Correlation (DIC)* por sus siglas en ingles) para medir las deformaciones en la probeta.

En la Figura 3.10 se aprecia la evolución de los campos de deformación longitudinal. Inicialmente, se forman bandas estrechas de alta deformación en la interfase a tensiones globales significativamente inferiores a la resistencia a la tracción del epoxi. A medida que la carga aumenta, estas zonas de alta deformación se expanden alrededor de la fibra, coincidiendo con el inicio del despegue interfacial y generando una creciente heterogeneidad en la distribución de la deformación dentro de la matriz. Se observa que las deformaciones locales exceden el 0.16 en la

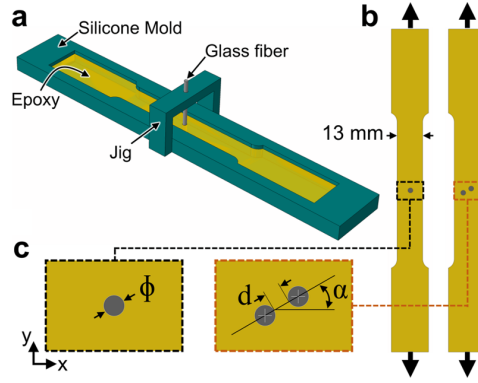


Figura 3.9 Esquema de (a) el proceso de preparación de muestras, (b) muestras tipo "dog-bone" de una y dos fibras, y (c) geometría y orientación relativa de las fibras. Las dimensiones de las muestras para tracción fueron consistentes con la norma ASTM D638. grosor de 6 mm en todos los casos[47].

matriz antes de la falla, esto ocurre a una tensión de 41 MPa. Estas deformaciones elevadas se comienzan a detectar a una tensión superior a 39 MPa, las cuales superan considerablemente la capacidad de deformación del epoxi en estado puro. El análisis microestructural revela la presencia de microfisuras en las mismas regiones donde se concentran estas intensas deformaciones, lo que sugiere que la falla a nivel macroscópico se inicia a través de la acumulación de daño microestructural en estas zonas de alta tensión local.

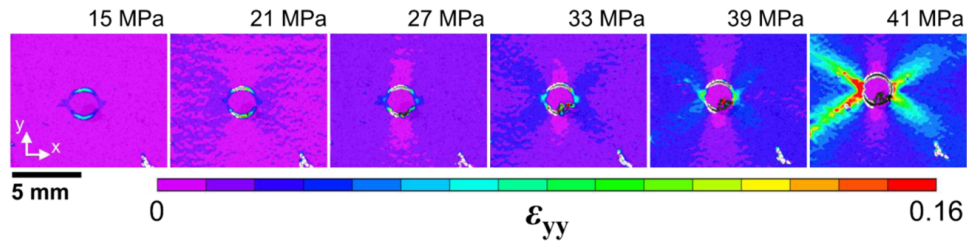


Figura 3.10 Evolución del campo de deformación longitudinal (ϵ) en las cercanías de una única macrofibra de vidrio bajo distintos niveles de esfuerzo global. La carga de tracción fue aplicada en la dirección y [47].

En la Figura 3.11, se aprecia la evolución de los campos de deformación en las probetas con fibras en diferentes ángulos, se aprecia que cuando las dos fibras son posicionadas perpendicularmente a la dirección de la carga (es decir, $\alpha = 0^\circ$), los mecanismos de despegue y falla coinciden con aquellos observados en los casos de una sola fibra. De esta manera, se establece que el campo de deformación y el despegue interfacial de una fibra tendrán un efecto mínimo en los de la otra fibra. En condiciones donde $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, hay interacción entre los campos de deformación, se observa la aparición de una única banda de alta deformación altamente localizada que une las dos fibras. Finalmente cuando $\alpha = 90^\circ$ no se observa interacción entre las dos fibras.

En la publicación de Totten et al. [48] se presenta un ensayo para medir la resistencia interfacial a la tracción de la interfaz fibra de vidrio-epoxi utilizando una muestra de ensayo de una sola

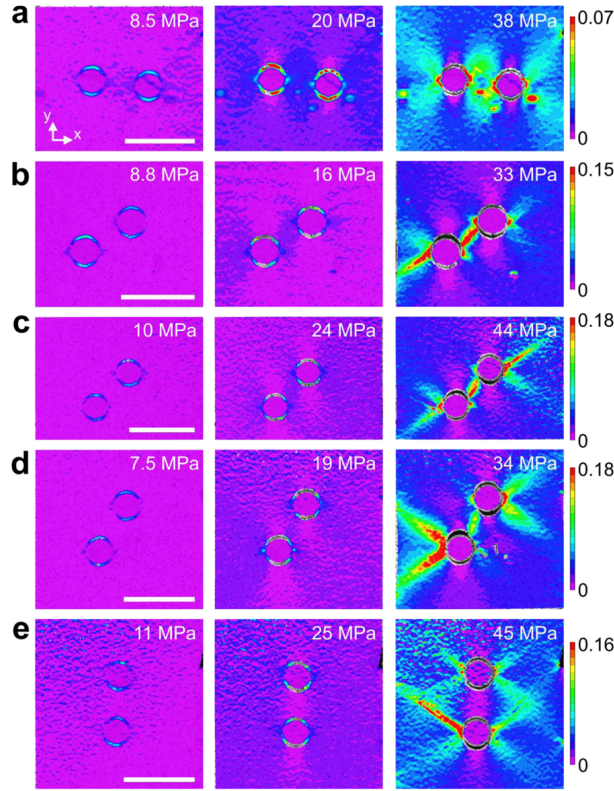


Figura 3.11 Evolución de los campos de deformación longitudinal (ε_{yy}) bajo distintos niveles de esfuerzo global en la proximidad de muestras con doble fibra de vidrio: (a) FF-1 φ 0°, (b) FF-1 φ 30°, (c) FF-1 φ 45°, (d) FF-1 φ 60° y (e) FF-1 φ 90°. Los mapas de contorno en la columna derecha fueron extraídos en niveles de esfuerzo global justo antes de la falla de la matriz en todos los casos. Barra de escala: 5 mm [47].

fibra como se aprecia en la Figura 3.12. La fibra se orienta perpendicular al eje de carga a través del espesor de la muestra, y el ensayo de tracción se realiza in situ en *SEM*. El estado de tensión en la interfaz fibra-matriz se determina mediante un análisis de tensión de elementos finitos, que incluye los efectos de la carga mecánica y la contracción del curado de la matriz.

Cuando se realizaron los ensayos a medida que la carga aumentaba, se observó el crecimiento del despegue, siguiendo a la formación de grietas en la matriz como se observa en la Figura 3.13. Se registraron curvas de esfuerzo-desplazamiento para los especímenes. Estas curvas mostraron una discontinuidad, manifestada como una pequeña caída de carga o un cambio en la pendiente, que se consideró correspondiente al inicio del despegue. Se encontró que la carga a la que se iniciaba el despegue variaba ligeramente entre los especímenes. Se identificaron tres regiones distintas en las curvas de carga-desplazamiento: una región inicial lineal (sin despegue), una región con fluctuaciones (inicio y propagación del despegue) y una región ligeramente no lineal con menos fluctuaciones (despegue y agrietamiento de la matriz). Se estableció que la tensión al inicio del despegue era sustancialmente menor que la tensión de falla de la matriz.

Además, se presentan los resultados del *FEA*. El análisis de elementos finitos se utilizó para determinar la distribución de tensiones en la interfaz fibra-matriz. Se determinó que la tensión

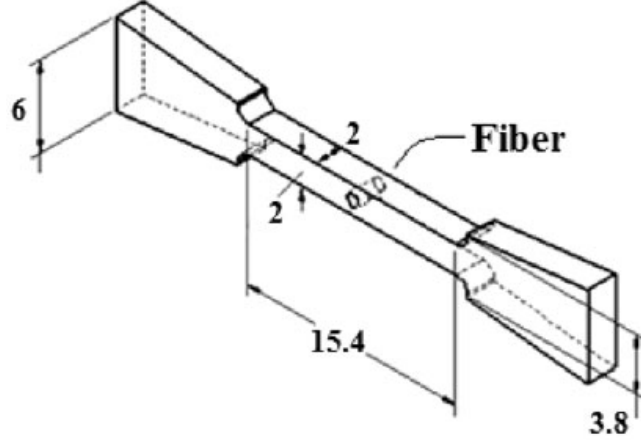


Figura 3.12 Dimensiones de la probeta *TTST* (mm)[48].

radial era el componente de tensión dominante, lo cual apoya la observación de que el despegue se inicia debido a la tensión de tracción. Los resultados del *FEA* también revelaron una singularidad de tensión en la superficie libre, lo que concuerda con estudios previos. Se compararon las tensiones radiales y circunferenciales, se encontró que la tensión radial era significativamente mayor, lo que refuerza la conclusión de que esta tensión impulsa el proceso de despegue.

Finalmente, la resistencia a la tracción interfacial se calculó combinando la carga medida experimentalmente al inicio del despegue con los resultados obtenidos del *FEA*. El análisis de elementos finitos proporcionó un factor de conversión que relaciona la carga aplicada a nivel macroscópico con la tensión radial actuante en la interfaz. Al aplicar este factor a la carga de inicio del despegue, se obtuvo la tensión radial crítica que provocó la separación interfacial, la cual se definió como la resistencia a la tracción interfacial. La ecuación 1 se utiliza para calcular el esfuerzo normal interfacial:

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_{th} + \overline{SCF} \sigma_x \quad (1)$$

Donde $\bar{\sigma}_{th}$ es la tensión térmica promedio, $\overline{SCF}$ es el factor de concentración de tensiones promedio y σ_x es la tensión aplicada.

3.3 Ensayos en mesoescala

Los procedimientos en esta escala se distinguen por que en vez de estudiarse lo que ocurre a nivel de fibra, la investigación se centra a nivel de hebras, las que se componen de aproximadamente 12000 fibras. Los ensayos que se encuentran en esta escala son versiones adaptadas de los procedimientos en microescala, además como ya se menciono los valores obtenidos son aproximaciones a los esfuerzos interfaciales.

Para los ensayos que buscan la aproximación al *IFSS* se puede encontrar el *fiber bundle pull-out test*, el *Iosipescu shear test* y el *45° Fiber bundle test*. Este ultimo es una adaptación al *Transverse tensile test* solo que la hebra en vez de ubicarse en la posición de 0° esta se posiciono a 45° , esto con el objetivo de generar un esfuerzo de corte.

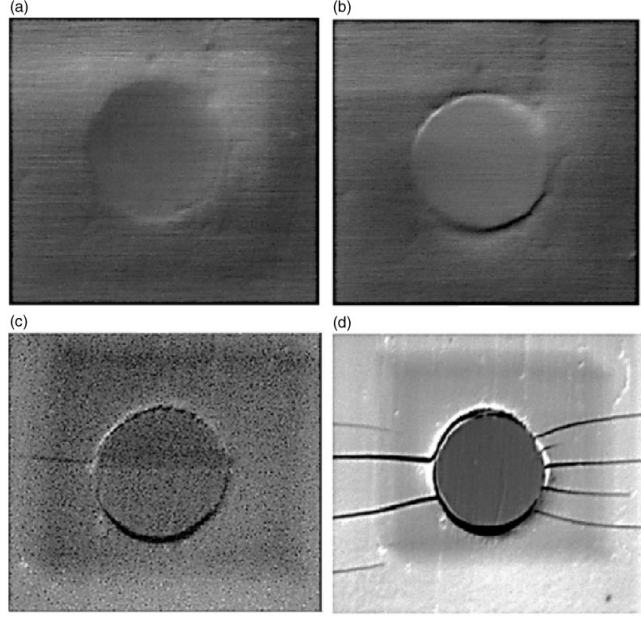


Figura 3.13 Micrografías SEM de especímenes TTSF antes y durante la aplicación de carga (el eje de carga es vertical). (a) Especimen antes de la carga, (b) iniciación del despegue (especimen 3), (c) propagación extensa del despegue (especimen 2), (d) desvío de una grieta de despegue fuera de la interfaz (especimen 4) [48].

Sobre los ensayos para la aproximación al *INS* se encuentra en la literatura información para el *transverse tensile bundle test*, el cual es una versión a mayor escala del *Transverse tensile test*, solo que en vez de usar una fibra se usa hebras del refuerzo como se muestra en la Figura 3.14. Diferentes son las fibras que se ensayan tales como fibra de vidrio, kevlar y fibra de carbono, en todos el método que se utiliza es una combinación de ensayo experimental registrando la fuerza y desplazamientos de la probeta, a lo cual se le suma la simulación mediante el método de elementos finitos para obtener el esfuerzo normal interfacial [23, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. W. Li et al [53], sumado a los pasos anteriores incluyeron una forma de obtener mediante un desarrollo teórico una forma más directa de obtener el *INS* basándose en la teoría de Griffith sobre materiales frágiles entregando finalmente la ecuación 2, aunque para esto requirieron de fabricar probetas de resina y probetas de laminado de fibra de carbono unidireccional como se muestra en la Figura 3.15. Adicionalmente para la realización tanto de las simulaciones como la de los cálculos analíticos las propiedades de los materiales fueron registradas en la Tabla 3.1.

$$\frac{1}{\sigma_C^2} = \frac{1 - v_f}{2(1 - \sqrt{1 - v_f})^2 \sigma_L^2} + \frac{1}{2(1 - \sqrt{1 - v_f})^2 \sigma_M^2} \quad (2)$$

Donde σ_C representa el esfuerzo normal interfacial, σ_L es el esfuerzo de tracción del laminado, σ_M corresponde al esfuerzo de tracción de la resina epoxica y v_f es la fracción volumétrica del laminado. Finalmente en la Tabla 3.2 se puede observar a los valores que obtuvieron destacándose que la desviación esta en un rango de 7.2 - 15 % que los autores expresan es aceptable.

Análogamente Y. Xu et al [50] estudiaron probetas fabricadas de fibras de polietileno con una matriz suave de gel de silicio, al igual que los ademas autores realizaron tanto ensayos

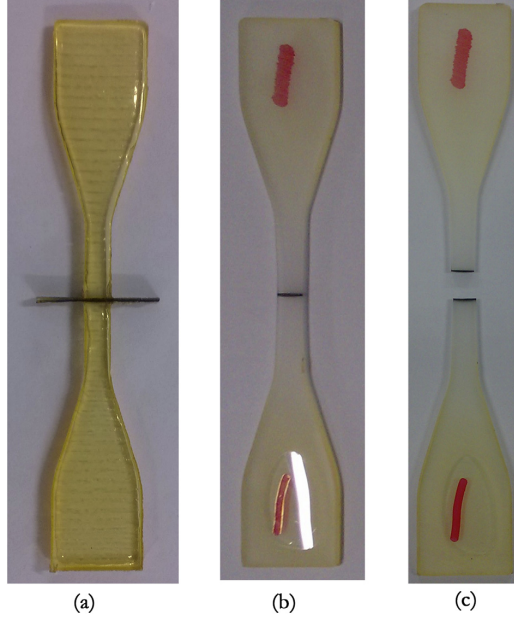


Figura 3.14 Especímenes *TTBT* después del desmoldeo (a), mecanizado (b) y ensayo (c) [52].

experimentales como simulaciones *FEA*, agregando además un desarrollo matemático que da con una fórmula, la cual se basa en el criterio de falla Yamada-Sun el que se representa en la ecuación 3, este criterio se combina con el método de elementos finitos para obtener un rango de valores para la resistencia normal interfacial. Para generar los datos necesarios para la simulación se realizaron pruebas de tracción transversales en muestras donde un paquete de fibras estaba incrustado en una placa de matriz blanda, variando el ángulo de inclinación de las fibras con respecto a la dirección de tracción. Esto permitió generar diferentes estados de tensión en la interfaz fibra-matriz, como se puede apreciar en la Figura 3.16. Finalmente la Tabla 3.3 muestra el rango de valores obtenidos.

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_p}\right)^2 + \left(\frac{\tau_c}{\tau_p}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

Donde σ_p y τ_p representan los esfuerzos interfaciales, σ_c y τ_c son los valores críticos impuestos en la interfaz.

Estos resultados indican que la resistencia a la tracción es significativamente menor que la resistencia al corte, lo que sugiere que la debilidad principal de la unión interfacial está en la dirección de la tensión normal más que en la cortante.

De momento se ha analizado solo los análisis matemáticos que se realizaron para llegar a una fórmula, estos son en comparación con las demás publicaciones los menos, ya que normalmente el análisis teórico está más centrado en cómo acoplar el método de los elementos finitos a un código que simule lo que pasa en el interfaz. G. Qi et al [23], desarrollan un procedimiento para obtener el *INS* de fibras de carbono Toray T800H y T700S con resinas epoxicas, este si bien usa la simulación posee una limitación que radica en la imposibilidad de representar de forma correcta los esfuerzos en la interfaz debido a que no tenían la opción de agregar un elemento que

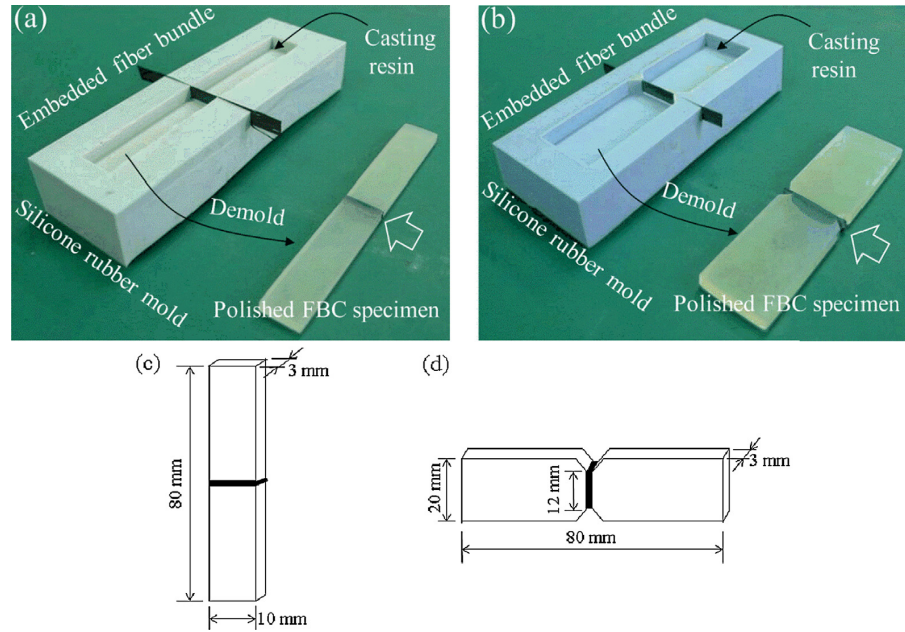


Figura 3.15 Preparación de especímenes *FBC* para (a) tracción transversal y (b) corte tipo *Iosipescu*, y dimensiones de los especímenes *FBC* para (c) ensayo de tracción transversal y (d) ensayo de corte tipo *Iosipescu* [53].

cumpliera la función de interfaz, por lo que combinan un análisis de falla multiescala basado en el *Generalized Method of Cells* (*GMC* por sus siglas en inglés), para lograr que el análisis *FEA* se representativo de la realidad se realizan ensayos con los tipos de fibras con los que se obtienen resistencias a la tracción, con estos valores se simula e itera hasta que los resultados de la resistencia a la tracción en el modelo macro alcanza los mismos valores que el de los experimentos.

El modelo de elementos finitos finitos junto a el *GMC* se puede apreciar en la Figura 3.17, donde se muestra como se simplifica la geometría para disminuir el costo computacional, los autores modelan las hebras de fibra como una capa de compuesto homogéneo ya que se supone que la resina impregna completamente las hebras y a esta se le da un grosor de 0.25 mm, también se considera que tanto las hebras como la resina esta unidos perfectamente en el macromodelo. En la Tabla 3.4 se observan las propiedades de los materiales necesarias para la realización de la simulación

En la Figura 3.18, se aprecia los resultados de la simulación las cuales saltan a la vista los elevados valores del esfuerzo normal interfacial en comparación con las referencias anteriores, también en Figura 3.18b se aprecia como en el extremo libre de la probeta se encuentra el mayor esfuerzo el cual es donde autores anteriores poner cita sugirieron que se encontraban concentradores de esfuerzo.

Finalmente en la Tabla 3.3, se aprecian los resultados obtenidos donde también recalcan que la falla en la probeta se debe a que falla en la interfaz porque la carga de tensión transversal provoca tensiones significativas en la interfaz, lo que lleva a una separación progresiva de la fibra y la matriz. Además, se identificó que el enfriamiento térmico genera tensiones residuales, pero estas no son el factor decisivo para la falla final.

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas de los materiales constituyentes [53]

Material	Propiedad	Valor
Resina Epoxi BPA (0% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.25 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	44.1 MPa
Resina Epoxi BPA (2% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.37 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	48.1 MPa
Resina Epoxi BPA (10% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.69 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	56.0 MPa
Resina Epoxi BPF (0% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.14 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	82.7 MPa
Resina Epoxi BPF (2% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.19 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	88.9 MPa
Resina Epoxi BPF (10% nano-SiO ₂)	Módulo de Young (E)	3.48 GPa
	Resistencia a la Tracción (σ_f)	90.7 MPa
Fibra de Carbono (Transversalmente Isótropa)	Módulo Axial (E_{11})	240 GPa
	Módulo Transversal (E_{22} , E_{33})	24 GPa
	Coefficiente de Poisson (ν_{12} , ν_{13})	0.2
	Coefficiente de Poisson (ν_{23})	0.4

Tabla 3.2 Resistencia a la tracción transversal de sistemas compuestos [MPa] [53]

Sistema compuesto	Valores predichos [MPa]	Resultados medidos [MPa]	Desviación relativa
TC35/BPA	31.9 - 38.3	35.4 - 45.0	9.8% - 14.9%
TC35/BPF	29.7 - 40.0	35.0 - 43.1	7.2% - 15.0%

Otro método aplicado por W. Dnag et al [54] consistió en usar un modelo de zona cohesiva (*Cohesive Zone Model* o *CZM* por sus siglas en ingles) para simular la propagación de la delaminación con diferentes leyes cohesivas. El principio que rige este modelo es que los esfuerzos de tracción y desplazamientos de separación de los nodos en los elementos son gobernados por la ley de tracción-separación. La simulación se lleva a cabo en el software ABAQUS el cual permite integral mediante elementos cohesivos el *CZM*. Previamente a simular este método requiere de su parte experimental por lo que se debió de fabricar probetas y ensayarlas ya que se debe introducir en el modelo la resistencia a la tracción y ademas se debe de calcular factores de concentración de esfuerzos debido a que en los extremos estos se generan y tienen un impacto significativo en los resultados finales. También se debe tener en cuenta que propiedades de materiales se deben de usar, en la Tabla 3.6 se aprecian estas características mecánicas de la fibra y la resina.

Similar a lo obtenido por G. Qi et al [23], la Figura 3.19, muestra como en los extremos libres se generan zonas de concentración de esfuerzos y luego estos decrecen en la parte central de la probeta. Finalmente con valores de concentración de esfuerzos variando entre 1.1 - 1.2 se llega a un valor de *INS* igual a 44.54 MPa.

Como resumen general de lo que es este método se puede recoger una frase de cita que si bien

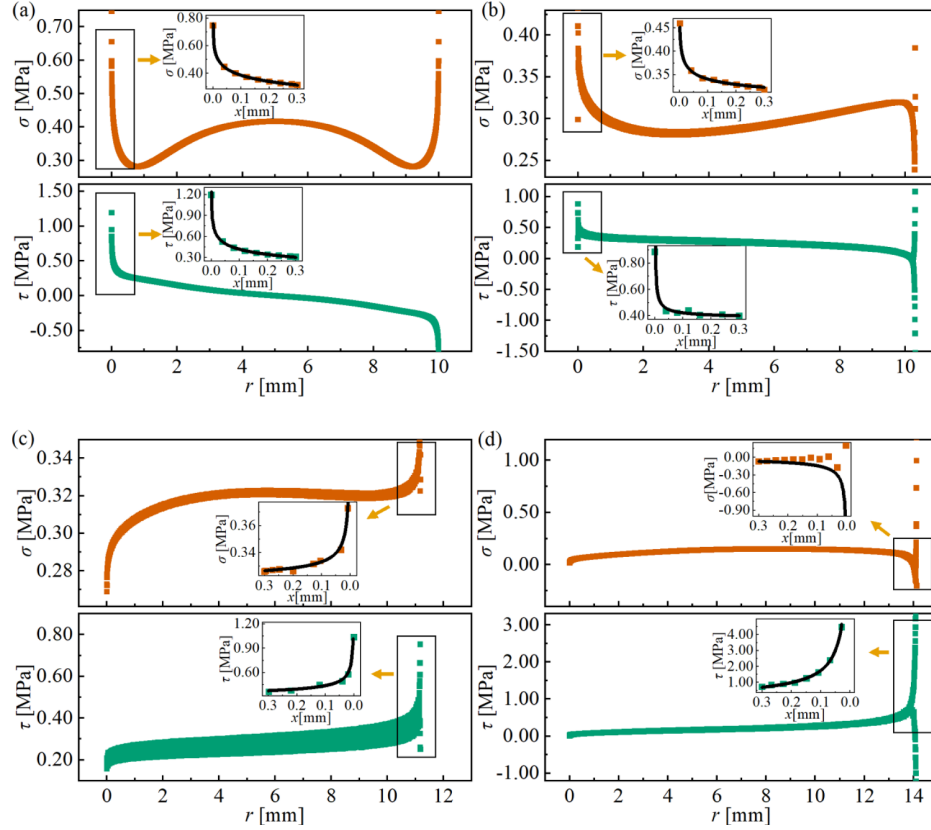


Figura 3.16 eDistribuciones de esfuerzo a lo largo de la interfaz fibra–matriz en el ensayo de tracción transversal. Distribución del esfuerzo normal y del esfuerzo cortante a lo largo de la interfaz fibra–matriz extraída del espécimen con distintos ángulos iniciales del haz de fibras: (a) 90°, (b) 76,0°, (c) 63,4°, y (d) 45,0° [50].

es más para el ensayo en microescala también aplica para el caso de la mesoescala “A pesar de ciertos logros en el diseño de experimentos que permiten la caracterización de las propiedades de corte interfacial, ha habido una clara falta de métodos de medición para caracterizar la mecánica de la interfaz bajo condiciones de carga normal.”

3.4 Simulaciones

Como se a explicado y expuesto anteriormente para encontrar una aproximación al esfuerzo normal interfacial se debe de juntar la experimentación y simulación. Para esto es necesario entender en que consiste el método de los elementos finitos y luego como este puede ser adaptado para representar lo que ocurre en la interfaz fibra-matriz.

3.4.1 Método de los Elementos Finitos

En la década de 1950, la metodología de los elementos finitos *FEM* fue propuesta como una nueva técnica de cálculo numérico para abordar problemas en la mecánica estructural. Inicialmente, esta técnica fue aplicada en el análisis estructural de aeronaves, antes de ser adoptada en diversas otras disciplinas. Se trata de una herramienta numérica robusta, ampliamente uti-

Tabla 3.3 Rangos resumidos de resistencia interfacial [50]

Combinaciones de grupos de prueba	σ_p [MPa]	τ_p [MPa]
45° - 90°	0.333 - 0.384	2.306 - 3.430

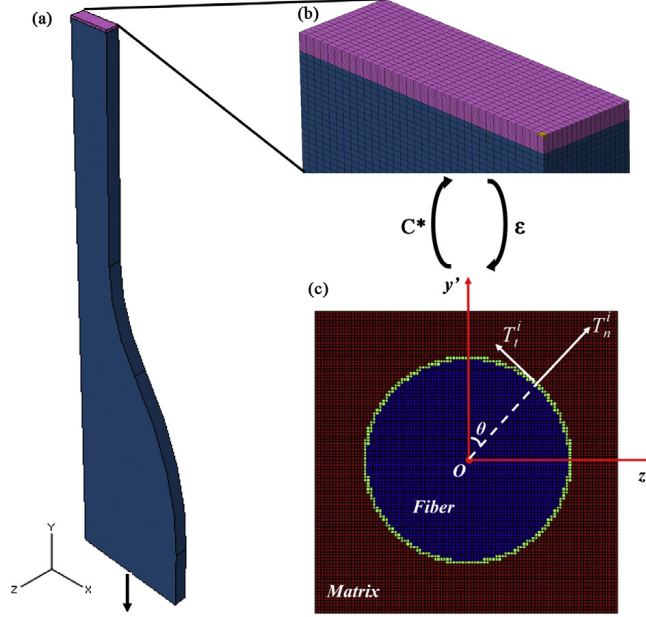


Figura 3.17 Modelo macro de elementos finitos para un octavo del espécimen TFB en (a) y (b), y microcelda representativa unitaria (micro-RUC) que contiene subceldas de fibra, matriz e interfase en (c) [23].

lizada para simular y analizar el comportamiento de materiales o estructuras complejas que presentan interfaces. Mediante la discretización de sistemas físicos continuos en un número finito de elementos, el método de los elementos finitos permite predecir de manera efectiva la respuesta del material frente a distintas condiciones de carga mecánica. En el tratamiento de problemas relacionados con fracturas en interfaces, el *FEM* ofrece la posibilidad de incorporar la heterogeneidad del material, su comportamiento no lineal y las interacciones entre distintos componentes. El principio fundamental de este método consiste en discretizar el dominio de solución en elementos finitos continuos, lo que se conoce como división del dominio en elementos. Entre los tipos de elementos más comúnmente utilizados se encuentran los tetraédricos, prismáticos y hexaédricos. En la literatura especializada en análisis por elementos finitos, se reconoce generalmente que el elemento hexaédrico cuadrático es el más confiable, robusto y preciso, en comparación con los elementos tetraédricos, prismáticos y piramidales [56].

El método de los elementos finitos por si solo no da resultados correctos para simular los esfuerzos interfaciales, para esto hay técnicas que juntas al análisis *FEA* logran dar aproximaciones de las propiedades interfaciales, dentro de estos métodos se encuentran el *Generalized Method of Cell* (*GMC* por sus siglas en ingles), *Cohesive Zone Model* (*CZM* por sus siglas en ingles), *Boundary Element Method* (*BEM* por sus siglas en ingles), *Extended Finite Element Method* (*XFEM* por sus siglas en ingles), *Phase-field Model* (*PFM* por sus siglas en ingles) y *Representative Volume Elements* (*RVEs* por sus siglas en ingles) [56, 57].

Tabla 3.4 Propiedades mecánicas y térmicas de los componentes [23].

Propiedad	T800H	T700S	DGEBA/D400
E_{11} (GPa)	294	230	2.83
E_{22} (GPa)	20	23	-
E_{33} (GPa)	20	23	-
G_{12} (GPa)	25	9	1.05
G_{13} (GPa)	25	9	-
G_{23} (GPa)	7	8	-
ν_{12}	0.23	0.2	0.35
ν_{13}	0.23	0.2	-
ν_{23}	0.42	0.4	-
CTE ₁₁ (10^{-6} K ⁻¹)	-0.56	-0.38	95.5
CTE ₂₂ (10^{-6} K ⁻¹)	5.6	5.6	-
CTE ₃₃ (10^{-6} K ⁻¹)	5.6	5.6	-

Tabla 3.5 Contraste de la resistencia normal interfacial calculada en el composite TFB y la resistencia al corte interfacial en el composite de una sola fibra/epoxi.

	T800H/epoxi	T700S/epoxi
Resistencia a la tracción TFB (MPa)	39.7 ± 4.9	29.3 ± 3.1
Resistencia normal interfacial calculada (MPa)	89.0	72.7
Resistencia al corte interfacial promedio ^a (MPa)	33.8	18.7

^a Ensayo de fragmentación de fibra única.

3.4.2 Generalized Method of Cell

El *GMC*, desarrollado por Paley y Aboudi, es un modelo micromecánico orientado originalmente a predecir el comportamiento de compuestos de matriz metálica unidireccionales. En este enfoque, el material reforzado de forma continua se representa como un arreglo doblemente periódico de fibras embebidas en una matriz, cuya unidad básica de análisis es una celda unitaria repetitiva, como se aprecia en la Figura 3.20. Dicha celda, compuesta por $N_b \times N_g$ subceldas, es representativa de todo el ensamblaje y permite capturar sus propiedades globales [57].

Cada subcelda puede estar ocupada por un material con comportamiento inelástico, modelado mediante diversas teorías constitutivas, como viscoelasticidad lineal, plasticidad incremental clásica o viscoplasticidad unificada. Esta configuración permite representar un composite multifásico e inelástico, lo que posibilita el análisis micromecánico de su respuesta termomecánica, incluso en presencia de porosidades, daño o regiones interfaciales degradadas en torno a las inclusiones. No obstante, la formulación original del *GMC* presenta limitaciones en el nivel de discretización de la celda unitaria, restringiendo así el grado de detalle microestructural alcanzable en el modelado de distintas arquitecturas del material.

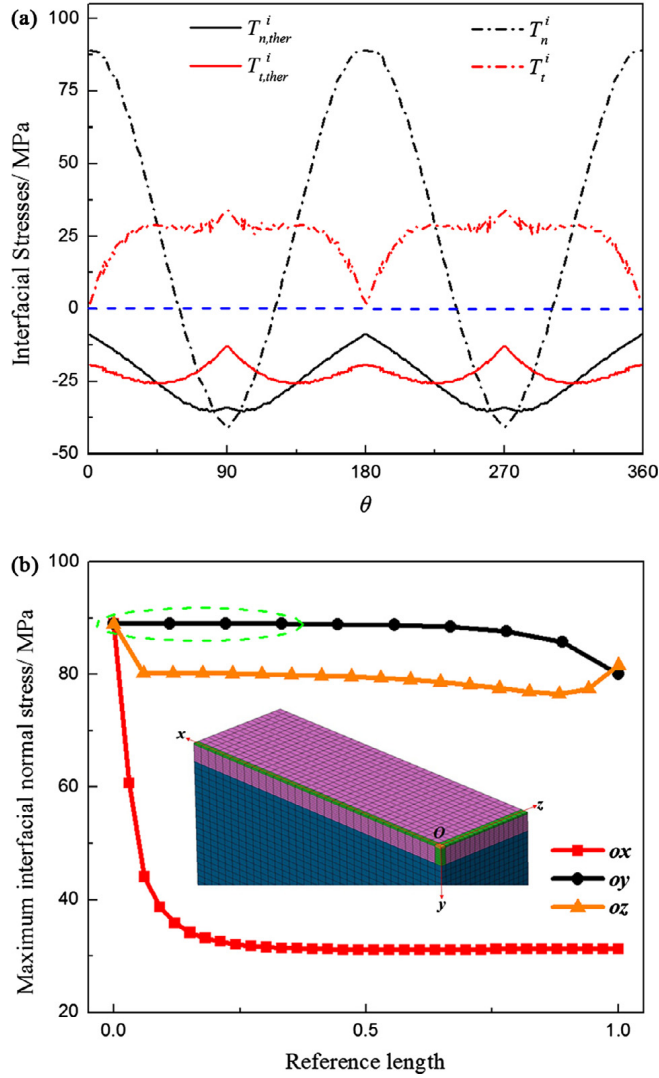


Figura 3.18 Resultados del micromodelo en la iniciación de la falla: distribución de las tensiones interfaciales T_n y T_t del elemento amarillo en (a), y tensión normal interfacial máxima $T_{n,m\acute{a}x}$ de los elementos verdes enfocados en (b) [23].

3.4.3 Cohesive Zone Model

El *CZM* fue propuesto originalmente por Dugdale y Barenblatt, quienes introdujeron un enfoque general para abordar la zona no lineal situada frente a la punta de una grieta en materiales con comportamiento elastoplástico. Este modelo es utilizado para describir los procesos de daño y fractura en interfaces, tales como la iniciación y propagación de grietas, la delaminación en materiales compuestos y la separación entre estos independiente del modo de carga. A través de este modelo, es posible simular los tres modos de fractura mediante el uso de elementos cohesivos: modo I (apertura de grieta), modo II (deslizamiento) y modo III (desgarro). La relación entre las tensiones en la interfaz y el desplazamiento de apertura de la grieta se describe mediante leyes de tracción-separación, destacando entre ellas las formulaciones bilineal, trapezoidal, polinómica y exponencial [56], las cuales se aprecian en la Figura 3.21.

En particular, la ley de tracción-separación bilineal, representada en la Figura 3.21b, es una

Tabla 3.6 Propiedades elásticas de compuestos unidireccionales carbono/epoxi y de la resina [54].

Tipo	Módulos de Young (MPa)	Razón de Poisson	Módulos de Corte (MPa)
Compuesto	$E_{11} = 105000$	$\nu_{21} = 0.3$	$G_{12} = 5100$
Unidireccional	$E_{22} = 8200$	$\nu_{31} = 0.3$	$G_{13} = 5100$
	$E_{33} = 8200$	$\nu_{32} = 0.4$	$G_{23} = 3000$
Resina Epoxi	$E = 1700$	$\nu = 0.38$	-

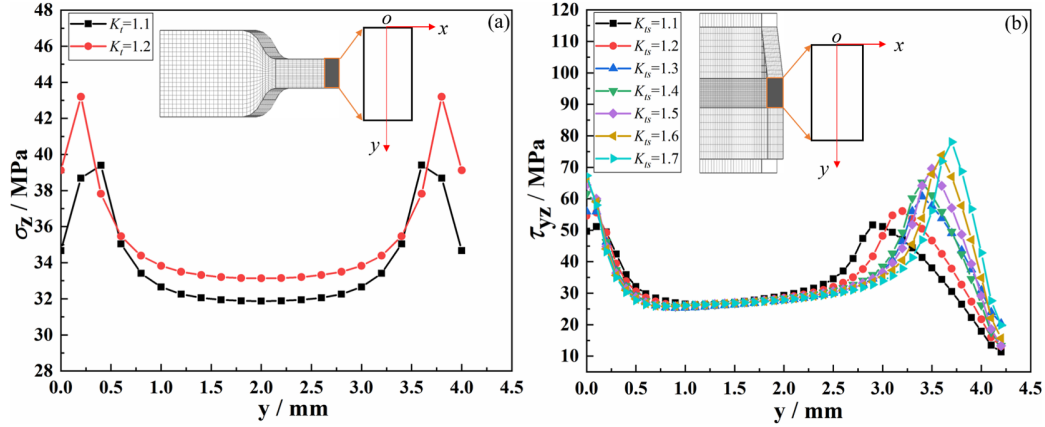


Figura 3.19 Distribución de tensiones en la interfaz del haz de fibras en la dirección y en la carga máxima: (a) distribución de la tensión normal de los especímenes *TFBT*, y (b) distribución del esfuerzo de corte de los especímenes *LFBSs* [54].

de las más empleadas. Esta define el comportamiento constitutivo de los elementos cohesivos mediante tres segmentos característicos: la etapa de separación elástica (segmento OA), la iniciación del daño (punto A) y la evolución del daño (segmento AB).

Durante la etapa elástica, la tracción t aumenta proporcionalmente al desplazamiento de apertura δ . Una vez alcanzado el valor crítico de desplazamiento δ_m en el punto A, se libera la deformación elástica y se inicia el proceso de daño en el material. A partir de ese punto, la tracción comienza a disminuir conforme el desplazamiento de apertura continúa incrementándose. Finalmente, cuando la tasa de liberación de energía alcanza el valor crítico de energía de fractura G_c , el elemento cohesivo se elimina, modelando de esta forma la separación de la interfaz. Las ecuaciones que describen el comportamiento de la fractura en las tres principales etapas se presentan de la siguiente forma:

- Segmento OA: Etapa lineal elástica.

Cuando el esfuerzo y la deformación en la zona cohesiva esta bajo el valor critico para el inicio de la fractura, el *CZM* esta en la etapa lineal elástica, como se puede observar en la Figura 3.21b. La pendiente del segmento OA representa la rigidez del elemento cohesivo. En esta etapa, el comportamiento del material se puede describir según la ecuación 4:

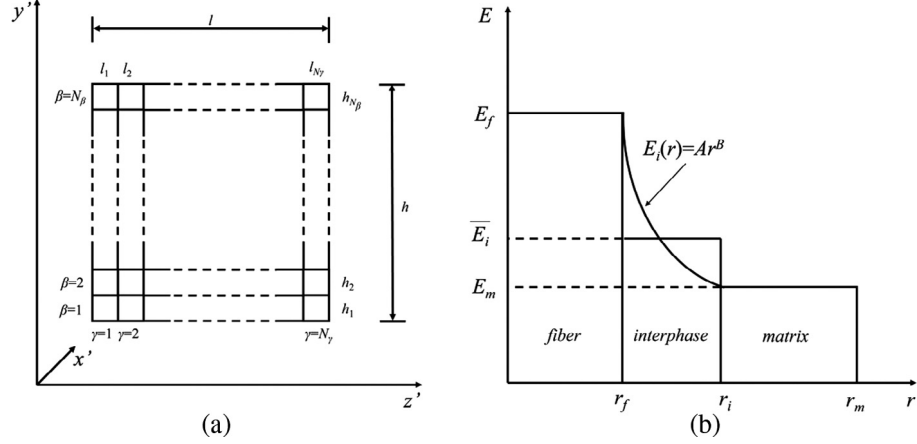


Figura 3.20 Una celda unitaria representativa (RUC) típica dividida en $N_b \times N_c$ subceldas en el modelo GMC (a) e ilustración del módulo de la interfase (b) [23].

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Donde t , K , δ son el esfuerzo de tracción, la matriz de rigidez y la separación del elemento cohesivo respectivamente.

- Punto A: Punto de inicio de la falla.

Los elementos cohesivos comienzan a sufrir daño una vez alcanzan un criterio específico, el cual se conoce como criterio de iniciación de falla. Comúnmente se distinguen cuatro criterios como el criterio del esfuerzo nominal máximo, criterio de deformación nominal máximo, criterio del esfuerzo nominal cuadrático y el criterio de deformación nominal cuadrático.

- Criterio del esfuerzo nominal máximo, el cual se representa según la ecuación 5:

$$\max \left\{ \frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\sigma_1^0}, \frac{|\sigma_2|}{\sigma_2^0}, \frac{|\sigma_3|}{\sigma_3^0} \right\} \geq 1 \quad (5)$$

Se supone que la falla de la interfaz ocurre cuando el esfuerzo nominal en una dirección específica excede el valor máximo del esfuerzo. Los paréntesis $\langle \cdot \rangle$, se definen según la ecuación 6:

$$\langle \sigma_1 \rangle = \begin{cases} \sigma_1, & \sigma_1 \geq 0 \\ 0, & \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

- Criterio de deformación nominal máximo, se calcula según la ecuación 7:

$$\max \left\{ \frac{\langle \delta_1 \rangle}{\delta_1^0}, \frac{|\delta_2|}{\delta_2^0}, \frac{|\delta_3|}{\delta_3^0} \right\} \geq 1 \quad (7)$$

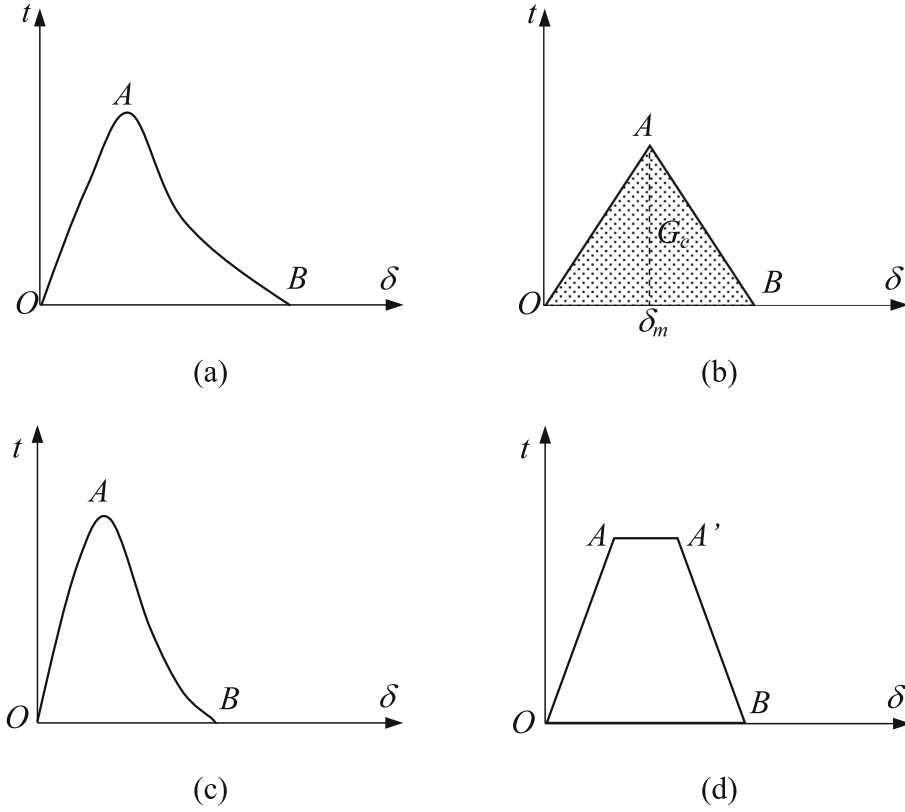


Figura 3.21 Diferentes formas de la ley de tracción–separación: (a) exponencial, (b) bilineal, (c) polinómica y (d) trapezoidal [57].

- Criterio del esfuerzo nominal cuadrático, expresado usando la ecuación 8:

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\sigma_1^0} \right\}^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_3^0} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

Para este caso se realiza la suposición de de que el daño en la interfaz ocurre cuando la suma de los cuadrados de las fracciones de los esfuerzos nominales in las tres direcciones sobre los esfuerzos máximos es mayor a uno.

- Criterio de esfuerzo nominal cuadrático, se calcula usando la ecuación 9:

$$\left\{ \frac{\langle \delta_1 \rangle}{\delta_1^0} \right\}^2 + \left(\frac{\delta_2}{\delta_2^0} \right)^2 + \left(\frac{\delta_3}{\delta_3^0} \right)^2 = 1 \quad (9)$$

Este caso es análogo al de los esfuerzos solo que ahora son deformaciones. En las Ecuaciones 5–9, las componentes de esfuerzo en la dirección normal y en las dos direcciones de corte de los elementos cohesivos se denotan por σ_1 , σ_2 y σ_3 . Por su parte, los esfuerzos máximos que pueden ser soportados en las direcciones normal y tangenciales se definen como σ_1^0 , σ_2^0 y σ_3^0 , respectivamente. De manera análoga, las componentes de deformación en las mismas direcciones se representan por δ_1 , δ_2 y

δ_3 , mientras que las deformaciones máximas admisibles para dichas direcciones son denotadas por δ_1^0 , δ_2^0 y δ_3^0 .

- Segmento AB: Evolución de la falla

En esta etapa se introduce una variable que representa la reducción relativa de la rigidez en el *CZM*, a esta variable de daño se le designa con la letra D . La transición de D desde 0 hacia 1 representa la progresión del daño del material. La relación entre la variable de daño y los componentes de esfuerzos siguen la ecuación 10.

$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n, & \bar{t}_n > 0 \\ \bar{t}_n, & \bar{t}_n < 0 \end{cases}, \quad t_s = (1-D)\bar{t}_s, \quad t_t = (1-D)\bar{t}_t \quad (10)$$

Donde los términos $\bar{t}_n$, $\bar{t}_s$ y $\bar{t}_t$ representan las componentes de esfuerzo en las direcciones normal, de primer corte y de segundo corte, respectivamente, correspondientes a la etapa elástica lineal sin daño.

La evolución de la variable de daño D se rige por una determinada ley de evolución. Generalmente, se emplean dos tipos de leyes para este propósito. La primera es una ley basada en el desplazamiento, la cual es determinada por el desplazamiento efectivo máximo, $\delta^{\max}$, en el instante de la falla del material. El segundo enfoque se basa en la energía de fractura en el punto de falla. Estas dos leyes de evolución del daño se expresan según las ecuaciones 11 y 12 :

$$D = \frac{\delta_f(\delta^{\max} - \delta_f)}{\delta^{\max}(\delta_f - \delta_m)} \quad (\text{Ley de evolución de daño lineal basada en el desplazamiento}) \quad (11)$$

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_s}{G_s^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_t}{G_t^c} \right\}^\alpha = 1 \quad (\text{Ley de evolución exponencial basada en la energía}) \quad (12)$$

En este contexto, los términos δ_f , δ_m y $\delta^{\max}$ representan el desplazamiento de falla de la interfaz, el desplazamiento crítico en el inicio del daño y el desplazamiento de separación máximo durante la etapa de carga, respectivamente. Por su parte, con G_n , G_s y G_t se denota la energía de fractura en la dirección normal y en las dos direcciones de corte. El término G_i^c representa la energía de fractura crítica en las tres direcciones, donde el subíndice i toma los valores de n (normal), s (primer corte) y t (segundo corte). Finalmente, α corresponde al exponente de potencia de la ley de evolución.

3.4.4 Boundary Element Method

BEM es un método numérico desarrollado después del método de los elementos finitos. Este se desarrolló progresivamente a mediados y finales del siglo XX, impulsado por los avances en la tecnología informática. Su formulación se basa en la incorporación de la técnica de discretización

de elementos finitos al método clásico de la ecuación integral de frontera [58]. Mediante el uso de una solución fundamental que satisface la ecuación de campo como función de peso, la integración sobre el dominio se transforma en una integración sobre la frontera. Esto permite discretizar dicha frontera en elementos, y posteriormente, convertir la integración de frontera en un sistema de ecuaciones algebraicas que facilita la obtención de soluciones [57].

Una de las principales características de este enfoque es la aplicación del teorema de Gauss, lo que permite reducir en un orden la dimensionalidad del problema, simplificando de manera significativa tanto los datos como la generación de la malla. El *Boundary Element Method* resulta especialmente adecuado para resolver problemas con fuertes gradientes de campo, tales como concentraciones de tensiones o dominios infinitos. Además, en contextos de propagación de grietas, elimina la necesidad de realizar un remallado completo, siendo suficiente con añadir nuevos elementos en la vecindad de la punta de la grieta [57].

Actualmente, el *BEM* se considera una de las herramientas más eficaces para la evaluación de factores de intensidad de tensiones y el análisis de la propagación de grietas dentro del marco de la mecánica lineal de la fractura. Su fundamento teórico se encuentra en la teoría de las ecuaciones integrales [57].

3.4.5 Extended finite element method

En las etapas iniciales del desarrollo del método de los elementos finitos, los investigadores recurrían con frecuencia al remallado como estrategia para modelar la propagación de grietas. No obstante, esta técnica generaba demasiadas complicaciones. Para superar las limitaciones, Belytschko et al [59]. propusieron en 1999 el Método de los Elementos Finitos Extendido *XFEM*, introduciendo una función de enriquecimiento discontinua para el análisis de grietas en configuraciones bidimensionales lineales. Esta innovación permite representar grietas alineadas arbitrariamente dentro de un elemento, requiriendo únicamente una partición local en la punta de la grieta [57].

Las ventajas de este método son que: En primer lugar, elimina la necesidad de realizar una partición secundaria de la malla durante el proceso de simulación. Segundo lugar, no requiere un refinamiento específico de la malla en la vecindad de la punta de la grieta. En tercer lugar, al mantener una única estructura de malla, se evitan las dificultades relacionadas con la transferencia de datos a lo largo del dominio. Además, el *XFEM* puede aplicarse a problemas no lineales, materiales anisotrópicos y geometrías arbitrarias, y puede integrarse de manera eficiente con software de elementos finitos [57].

3.4.6 Phase-field Model

El *PFM* es un enfoque variacional para el análisis de fractura, en el cual las grietas son representadas como zonas de daño distribuidas, evitando así el tratamiento explícito de las discontinuidades generadas por la presencia de grietas [60]. En este marco, se introduce un parámetro de orden, conocido como variable de campo de fase, que permite describir cuantitativamente el grado de daño en el material. Esta formulación posibilita una transición continua entre el material intacto y las zonas fracturadas mediante la difusión progresiva del daño [57].

La variable de campo de fase adopta valores en el intervalo $[0, 1]$, donde 0 indica regiones no

dañadas, 1 representa áreas completamente fracturadas, y los valores intermedios corresponden a la zona de transición. A través de esta representación continua, el *PFM* transforma un problema inherentemente discontinuo, como es la propagación de grietas, en uno continuo, eludiendo así la necesidad de imponer criterios adicionales para rastrear explícitamente la trayectoria de propagación. Esta característica lo convierte en una herramienta eficaz para abordar configuraciones de fractura complejas, al tiempo que reduce los requerimientos asociados a los métodos tradicionales basados en remallado [57].

Sus ventajas son que permite simular, dentro de un marco unificado, fenómenos como la iniciación, propagación, ramificación e incluso la fusión de grietas, sin requerir tratamientos numéricos especiales ni criterios adicionales. Aborda la presencia de múltiples grietas de manera simultánea como un problema de minimización de energía, lo que elimina la necesidad de realizar un seguimiento individualizado de cada trayectoria de fractura. En tercer lugar, este método muestra una notable capacidad para modelar materiales heterogéneos con eficiencia. Este método muestra una notable capacidad para modelar materiales heterogéneos con eficiencia. No obstante, su principal desventaja radica en el elevado costo computacional, particularmente en simulaciones a escala macroscópica, donde se requiere una malla fina para obtener una resolución adecuada del campo de daño [57].

Desde un punto de vista teórico, el método de campo de fase se basa en una formulación energética del fenómeno de fractura. En este contexto, se asume que la fractura ocurre cuando la energía liberada por la formación de una grieta es equivalente a la energía elástica almacenada en el material. Para cuantificar este proceso, el modelo utiliza dos parámetros fundamentales: la densidad de energía de fractura y la densidad de energía elástica [57].

3.4.7 Elemento de Volumen Representativo

El *RVE* suele ser definido en la escala de longitud inferior, basándose en el principio de representatividad. Se considera que un volumen es representativo cuando permite reproducir de forma precisa las propiedades efectivas del material, como si se tratara de un volumen infinito en dicha escala. Este criterio debe guiar su selección, más allá de percepciones empíricas o prácticas comunes. Es un volumen suficientemente grande del material concerniente en su escala de longitud inferior, tal que cualquier volumen mayor será igualmente representativo [61]. El *RVE* es empleado para problemas que involucran una estructura aleatoria en su escala de longitud inferior, por ejemplo, un compuesto unidireccional con una imagen microscópica sobre su sección transversal, como se muestra en la Figura 3.22.

Por razones de eficiencia computacional, se busca minimizar el tamaño del *RVE* sin comprometer su representatividad. Este tamaño mínimo depende del material, de la propiedad efectiva a evaluar y del contexto disciplinar. Por ejemplo, propiedades dominadas por fracciones volumétricas, como la capacidad calorífica o el módulo de Young en la dirección de las fibras, puede requerir un *RVE* más pequeño. En cambio, propiedades sensibles a la homogeneidad estadística, como el módulo de Young transversal, exigen volúmenes más amplios [61].

Es importante destacar que el *RVE* no necesita reproducir geométricamente ninguna parte específica del material ni replicar distribuciones locales de tensión o deformación. Su validez se evalúa únicamente en función de su capacidad para representar correctamente las propiedades efectivas, en la Figura 3.23 se observa una representación de un elemento de volumen representa-

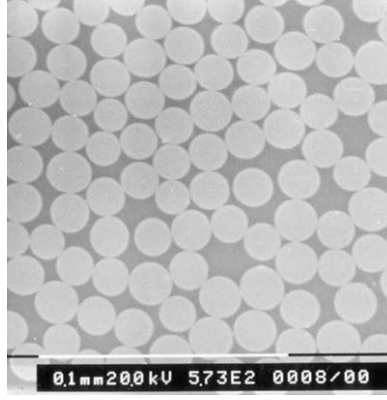


Figura 3.22 Distribución aleatoria de fibras observada en la sección transversal de un compuesto unidireccional real [61].

tivo . Finalmente, en materiales con estructuras aleatorias, es común aunque incorrecto imponer condiciones de contorno periódicas que no poseen periodicidad, con el objetivo de simplificar el análisis computacional [61].

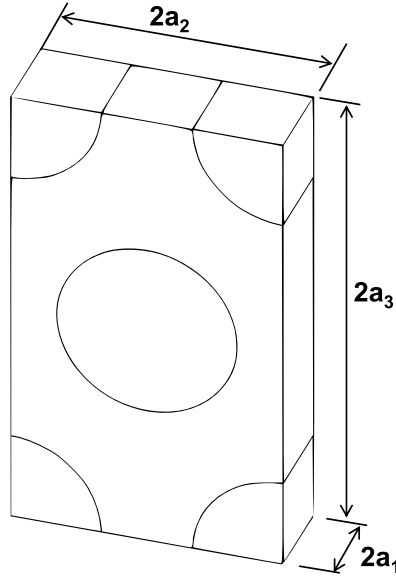


Figura 3.23 Elemento de volumen representativo [62].

Para lograr que este elemento sea capaz de representar correctamente un volumen completo este debe pasar por un proceso de homogenización el cual requiere del uso de las condiciones de borde periódicas (*Periodic Boundary Conditions* o *PBC* por sus siglas en ingles). Las *PBC* se definen de manera que los desplazamientos y campos de deformación presentes en una cara del modelo se repitan en la cara opuesta, garantizando que el *RVE* se comporte como si estuviera embebido en un medio infinito formado por repeticiones idénticas de sí mismo. Matemáticamente, esta condición se expresa según la ecuación 13:

$$u(\mathbf{x} + \mathbf{T}) - u(\mathbf{x}) = \bar{\varepsilon} \cdot \mathbf{T} \quad (13)$$

donde $u(\mathbf{x})$ representa el campo de desplazamientos en el punto $\mathbf{x}$, $\mathbf{T}$ corresponde al vector que conecta puntos equivalentes en caras opuestas y $\bar{\epsilon}$ es la deformación macroscópica impuesta.

El uso de PBC permite la reducción significativa del dominio de cálculo, la obtención de propiedades representativas de la microestructura y la eliminación de efectos no físicos asociados a condiciones de borde clásicas. En la implementación mediante elementos finitos, la condición se impone vinculando nodos correspondientes en caras opuestas a través de ecuaciones de restricción (*constraint equations*) o acoplamientos, para lo cual es necesario que la malla sea periódica y congruente entre dichas caras.

Entre las principales ventajas de este enfoque se incluyen la disminución de costos computacionales y la capacidad de estimar propiedades efectivas del material, tales como módulos elásticos, coeficientes de Poisson y respuestas no lineales, cuando se incorporan modelos constitutivos avanzados. No obstante, su aplicación está limitada a materiales con estructuras periódicas o estadísticamente homogéneas, y requiere un cuidado especial en la generación de mallas periódicas, particularmente en geometrías complejas [62].

Barbero et al [62] en su libro *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS* realiza un desarrollo de los elementos de volumen representativos y las condiciones de borde periódicas en el programa computacional *Ansys Mechanical APDL* donde desarrolla los códigos para su implementación, además estos códigos ya se han utilizado con éxito por tesisistas como Alegre Sabatel [63] quien realizó diversas simulaciones de distintos *RVE* entre los que hizo algunos con inclusiones esféricas y fibras.

3.5 Aramis (DIC)

El sistema ARAMIS es utilizado para medir deformaciones tridimensionales sin contacto mediante tecnología óptica. Las deformaciones de los materiales son analizadas, calculadas y documentadas por el sistema. La representación gráfica de los resultados permite comprender de manera óptima el comportamiento del objeto medido. Se considera particularmente adecuado para la medición de deformaciones en tres dimensiones bajo cargas estáticas y dinámicas, con el objetivo de analizar las deformaciones y tensiones de componentes reales. En superficies homogéneas, donde el objeto de medición presenta pocas características, se requiere la preparación de la superficie mediante métodos adecuados, como la aplicación de un patrón estocástico de pulverización [37]. En el sistema ARAMIS, se asignan detalles de imagen cuadrados o rectangulares, llamados facetes (de 19 x 19 píxeles), en diferentes imágenes, relacionándolos entre sí. Además, el área de medición es amplia, lo que permite medir tanto objetos pequeños como grandes (desde 1 mm hasta 3500 mm) con el mismo sensor. Por otro lado, las deformaciones pueden ser medidas en un rango que va desde 0.05% hasta varios cientos por ciento. Finalmente, los resultados de la medición se presentan mediante una visualización tridimensional de campo completo, ofreciendo una alta densidad de puntos de datos para un análisis detallado.

3.5.1 Cálculo de las deformaciones con GOM Aramis

En el programa siempre hay un sistema global de coordenadas, cuya posición inicial es determinada en la calibración del sistema, específicamente en la primera ubicación del cubo de calibración. Las deformaciones se definen en coordenadas locales que se mueven con el material, por lo que cada punto posee su propio sistema de coordenadas. De esta forma, el software

calcula las expansiones de las distancias en los sistemas de coordenadas móviles en lugar de en el sistema de coordenadas global. Para un determinado sistema global de coordenadas. GOM determina el eje local de los puntos utilizando la normal de un plano de compensación local ($\vec{n}_{LP}$) alrededor del punto respectivo como dirección Z para crear el eje Z local ($\vec{e}_z'$). Después de eso, la representación del eje X local resulta del producto cruzado del eje Y global ($\vec{e}_y$) y el vector normal ($\vec{n}_{LP}$). Finalmente, el eje Y local se obtiene del producto cruzado de los dos ejes calculados previamente.

Las ecuaciones que representan el proceso de distribución de los sistemas de coordenadas locales son:

$$\vec{e}_z' = \vec{n}_{LP} \quad (14)$$

$$\vec{e}_x' = \vec{e}_y \times \vec{n}_{LP} \quad (15)$$

$$\vec{e}_y' = \vec{e}_x' \times \vec{e}_z' \quad (16)$$

El sistema decide los puntos que tomara para hacer el calculo de las deformaciones. En esta superficie se puede tomar en consideración el movimiento de un elemento utilizando como vector de desplazamiento $\vec{u}$, que representa la traslación del cuerpo rígido. El movimiento y la deformación de un elemento que consta de puntos p_i se describe utilizando la siguiente ecuación 17:

$$\vec{p}_i' = \vec{u} + \mathbf{F} \cdot \vec{p}_i \quad (17)$$

La aplicación de esta fórmula en el cálculo de los puntos en la superficie 2D da como resultado la siguiente expresión 18:

$$\begin{pmatrix} p_x' \\ p_y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{13} & F_{14} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Esta ecuación tiene 6 incógnitas. Por lo tanto, para resolverla es necesario conocer al menos la información sobre las coordenadas deformadas y no deformadas de tres puntos. Teóricamente, un triángulo es suficiente para calcular una deformación. Sin embargo, para obtener un cálculo más preciso y mayor soporte de los puntos de medición individuales, GOM utiliza puntos adyacentes adicionales (hexágonos) para crear un sistema de ecuaciones sobredeterminado, como se muestra en la Figura 3.24.

El tensor 2D resultante, calculado en la superficie, representa las deformaciones en la superficie rodeada por el hexágono equilátero.

En este cálculo intervienen muchos puntos con diferentes densidades y ubicados a distintas distancias del centro de la respectiva superficie. Estas consideraciones se tienen en cuenta asignando a los puntos un factor de ponderación ω , que representa ambos factores. Entonces, el sistema sobredeterminado de ecuaciones puede resolverse mediante la minimización iterativa de la siguiente ecuación 19:

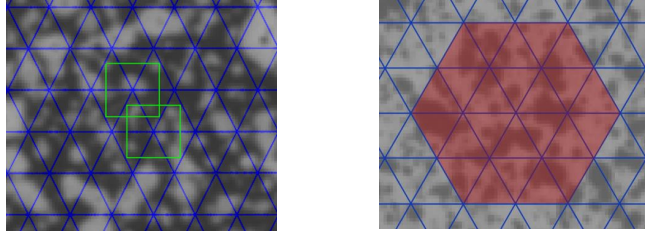


Figura 3.24 Representación de la topología utilizada para la deformación.

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i \|\mathbf{p}'_i - \mathbf{F}\mathbf{p}_i\|^2 \quad (19)$$

A partir de las coordenadas materiales de los diferentes estados de deformación de un punto, en los cuales se calcula la deformación, también puede definirse el desplazamiento como sigue:

$$\mathbf{p}'_0 = \mathbf{p}_0 + \vec{u} \quad (20)$$

$$\vec{u} = \mathbf{p}'_0 - \mathbf{p}_0 \quad (21)$$

4 Metodología

4.1 Parte I: Investigación

4.1.1 Modelos y software

La selección del modelo de simulación es una etapa crítica en la representación de fenómenos mecánicos complejos. La literatura científica ofrece un amplio espectro de modelos numéricos, los cuales varían significativamente en términos de su complejidad de implementación, requerimientos computacionales y el nivel de precisión teórica y experimental.

Ante este panorama, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con el objetivo de identificar, analizar y comparar las diversas técnicas disponibles para la simulación del ensayo de interés. El criterio principal de selección fue optar por un modelo que no solo estuviera respaldado por un sólido y validado sustento teórico, sino que también demostrara una alta fidelidad y ajuste a los datos experimentales disponibles. Este proceso de selección garantiza que los resultados obtenidos sean tanto confiables como representativos del comportamiento físico real del sistema.

El modelo numérico seleccionado para este estudio es el *Cohesive Zone Model (CZM)*. Este método se utiliza para simular fenómenos de falla complejos, tales como la propagación de fracturas y la delaminación en materiales compuestos. Para el caso particular de esta investigación, el *CZM* se aplicará para caracterizar la adhesión y la eventual falla en la interfaz entre la fibra y la resina.

La elección de este modelo se fundamenta en la revisión del estado del arte, donde se ha documentado que el *Cohesive Zone Model (CZM)* constituye una herramienta eficaz y validada para la simulación de interfaces. No obstante, es preciso señalar que la implementación de este método requiere una definición cuidadosa de sus parámetros. Estos incluyen la selección de los modos de falla a considerar (normal, tangencial o mixto) y la ley de evolución de daño que rige el comportamiento del material, cuyos valores pueden variar según el software computacional empleado.

Para la implementación computacional del modelo seleccionado, se ha optado por utilizar el software comercial de análisis por elementos finitos (FEA) **Ansys**, el cual proporciona múltiples entornos de simulación y una amplia gama de herramientas avanzadas. Dicha flexibilidad resulta fundamental para el desarrollo del presente trabajo, permitiendo un control detallado sobre la definición de materiales, la generación de la malla y la aplicación de las condiciones de borde específicas del problema.

4.1.2 Propiedades mecánicas

Dentro de la literatura recopilada se encuentran los parámetros de los materiales más representativos. Después del análisis de los artículos científicos, se discernirá qué propiedades pueden obtenerse a partir de ensayos experimentales y cuáles deben buscarse en hojas de datos. Para los ensayos experimentales se construirán probetas bajo la norma que se ajuste a estos realizándose las pruebas el número de veces que la norma indique. Estas actividades cumplen con los objetivos específicos 1 y 2.

4.2 Parte II: Preparación de muestras

4.2.1 Geometría y moldes

Para llevar a cabo la preparación de muestras, se siguieron los pasos observados en la Figura 4.1 y mencionados a continuación.

1. Dibujo CAD negativos de moldes: Diseño realizado en software Autodesk Inventor, conforme a las normas y/o investigaciones correspondientes a cada muestra.
2. Impresión 3D: PLA como material utilizado.
3. Fabricación moldes: los "negativos" de moldes se rellenan con silicona Caucho RTV XL 8820, y se dejan curar durante 24 horas (se debe tener cuidado con las burbujas generadas durante la fabricación, para garantizar la distribución homogénea en el interior de los negativos).



Figura 4.1 Procedimiento para creación de geometría y moldes.

4.2.2 Fabricación

La fabricación de las probetas se lleva a cabo mediante 4 pasos principales, los cuales son descritos a continuación:

1. Preparación de moldes:
 - Se limpia el molde con un paño y jabón convencional, para eliminar impurezas externas.
 - Se utiliza aire comprimido para ayudar en su limpieza.
 - Se aplica una capa de cera desmoldante al interior de los moldes, para prevenir la adhesión de la resina al molde.
2. Preparación hebras y fibras:
 - Estas fueron colocadas de manera escalonada, teniendo en consideración de cubrir todo el espacio.
 - A continuación, se acomodan en un arco utilizado para tensar las hebras, con el fin de que estas no se desalineen al momento de inyectar la resina, este arco fue fabricado con una distancia de acuerdo a cada molde.
 - Para las probetas SFFT, de una hebra se extrae con cuidado la fibra de carbono. La fibra luego es ubicada en el molde y se pega con cinta en los extremos para que esta quede tensa dentro del molde.
3. Inyección resina:

- La preparación de la resina se realiza de acuerdo a las proporciones recomendadas por el fabricante 2:1, 2 parte de resina por 1 de catalizador.
- La resina es sometida a un tratamiento de ultrasonido durante 10 minutos a 19°C, con el objetivo de eliminar posibles burbujas de aire.

4. Tratamiento:

- Luego la mezcla de resina/catalizador se vierte sobre el molde y se deja un tiempo de curado de 72 horas.
- El proceso de post curado se realiza en un horno a 70°C por un tiempo de 16 horas.

Descripción de materiales:

- Resina Epoxi: Se utiliza la EPO 200 con endurecedor 813 (EPO200/813).
- Fibra de carbono: tejido diagonal (twill weave), densidad planar de 245 g/m², diámetro de fibra de 7 µm y módulo elástico de 240 GPa.

4.2.3 Maquinado CNC

Como etapa final, las probetas fueron mecanizadas para cumplir con las dimensiones y tolerancias especificadas en las normativas correspondientes. Para ello, se utilizó un Router CNC, generando un código G-code mediante el software Inventor CAM, con una velocidad de rotación de la herramienta de 10000 rpm.

Se diseñó y fabricó una base de madera para fijar las probetas durante el proceso de maquinado, asegurando su estabilidad. Posteriormente, se elaboraron códigos específicos para realizar las operaciones de contorneado y rectificado, permitiendo conformar las probetas de acuerdo con los estándares establecidos.

Este proceso se puede observar en la Figura 4.2

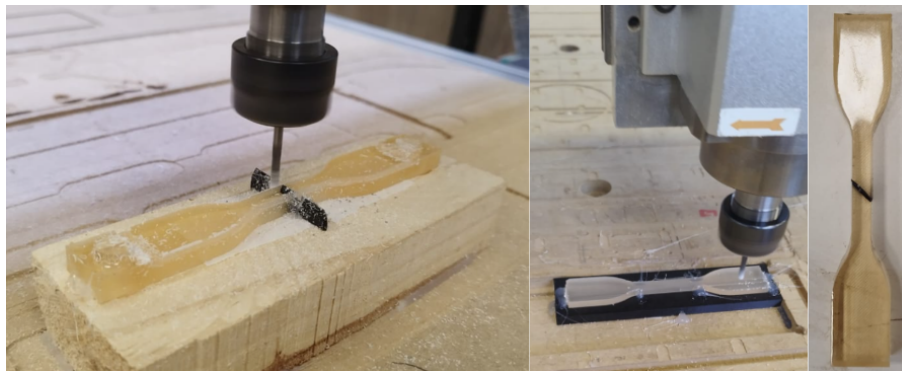


Figura 4.2 Maquinado CNC.

4.2.4 Técnica de medición óptica: Aramis GOM

El monitoreo de la deformación se realizó mediante un sistema de análisis óptico de deformación en 3D (ARAMIS) de alta resolución temporal y local, sin contacto, desarrollado por GOM que

determina las coordenadas, desplazamiento y deformaciones en la superficie de la pieza a lo largo del ensayo de tracción bajo la descomposición del tensor gradiente de deformación en 2 dimensiones.

Para garantizar la precisión de los datos obtenidos, el sistema de Correlación Digital de Imágenes (DIC) requiere una calibración minuciosa basada en los parámetros descritos en las instrucciones. La implementación del sistema se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por el fabricante, incluyendo la correcta disposición de las cámaras conforme a las especificaciones del manual. Esta configuración consideró el tamaño de las probetas para optimizar la captura de las deformaciones generadas durante los ensayos mecánicos ver Figura 4.3.

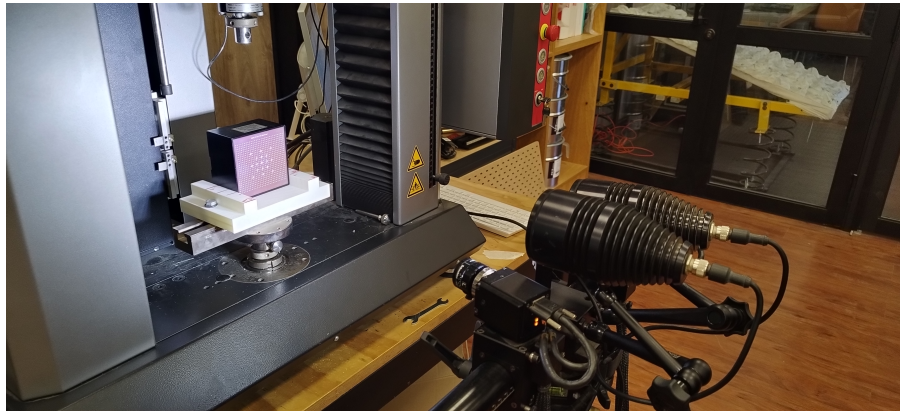


Figura 4.3 Configuración Aramis.

Los parámetros utilizados durante el proceso de calibración se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros del sistema de medición.

Parámetro	Valor
Distancia de medición [mm]	340
Distancia del deslizador [mm]	110
Ángulo de la cámara [°]	25
Longitud focal	8
Tiempo de obturación	5

La calibración del sistema se llevó a cabo mediante los pasos descritos en el manual, utilizando un panel de calibración seleccionado según las dimensiones de las probetas.

Para facilitar el posicionamiento del cubo de calibración, se diseñaron y fabricaron soportes específicos que permiten ajustar su posición en distintas orientaciones: hacia adelante, hacia atrás, y con una inclinación de 40° , como se muestra en la Figura 4.3. Además, se ajustaron el enfoque y la luminosidad de las cámaras para garantizar una visualización clara y precisa de las muestras.

4.2.5 Preparación probetas Aramis

Para esto, se debe preparar las probetas aplicando un recubrimiento inicial con pintura blanca, seguido de la aplicación de un patrón aleatorio de puntos negros, lo cual facilita el seguimiento de las deformaciones mediante el sistema DIC, el que se aprecia en la Figura 4.4. Este proceso garantiza la obtención de datos confiables y dimensionalmente consistentes para el análisis tridimensional de las muestras.

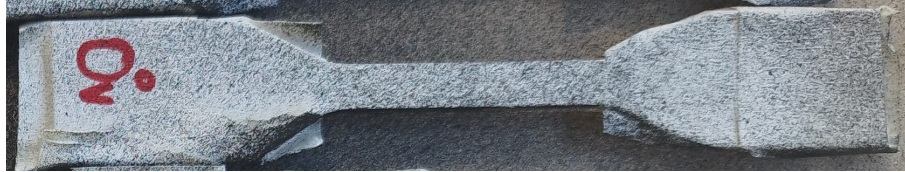


Figura 4.4 Probeta con patrón de puntos.

4.3 Parte III: Ensayos

4.3.1 Transverse Fiber Bundle

Las probetas se dividieron en dos lotes: el primero se ensaya sin el sistema de correlación de imagen digital, y el segundo con el sistema Aramis. Los dos grupos de muestras son ensayados en una máquina de ensayo universal Zwick Roell Proline Z05, usando las mordazas para ensayos de tracción y siguiendo los siguientes pasos:

- Crear un archivo de ensayo de tracción en el programa de la maquina.
- Establecer la velocidad a la que se traccionan las probetas, la cual es de 1 [mm/min].
- Se crea la probeta en el software donde se ingresan la medida del ancho y el espesor de las muestras.
- Enviar la mordaza superior a la posición de inicio y ubicar las probetas en estas, asegurándose de que estén alineadas con respecto a un lado recto de la máquina, lo cual asegura que el área que se quiere estudiar esté bajo tracción.
- Seleccionar la opción de fuerza cero en el programa y proceder con el ensayo hasta la ruptura de las probetas.

4.3.2 Implantación Aramis

Para ensayar las probetas con Aramis se deben configurar los parámetros de grabación, los cuales son: la cantidad de imágenes, el delay y el shutter time. Estos datos determinan cuántas imágenes se tomarán en el transcurso de la prueba y también se ajusta la saturación de la imagen para mejorar la calidad de ésta. Los parámetros usados para el desarrollo de los experimentos se presentan en la Tabla 4.2. Con los parámetros registrados se da inicio a cualquiera de los tres ensayos en la máquina y luego se presiona el símbolo de grabar en el computador con el programa de Aramis gom para que se registren las imágenes.

Tabla 4.2 Parámetros utilizados en las pruebas Iosipescu y $45^\circ/0^\circ$.

Parámetro	Iosipescu	45° y 0°
Imágenes	100	120
Delay [s]	3.00	1.00
Tiempo de obturación [ms]	5.325	7.797

4.4 Parte IV: Simulación en Mesoescala

Esta simulación se realiza en el software *Ansys Workbench*, para lo cual se debe de utilizar distintos módulos los cuales pueden interactuar entre si, lo que permite poder independizar ciertas partes del proceso de configuración, en este paso ademas no es necesario programar nada mediante código, aunque el programa si da la facilidad de poder insertar códigos si es que así se requiriese.

4.4.1 Geometria y materiales

Se define la geometría que se desea simular la cual es la misma probeta proveniente de la norma *ASTM D638 IV*, esta se dibuja en el software Inventor con la particularidad de que en el centro se le quita un volumen de $6 \times 0.2 \times 3.2$ mm, como se puede apreciar en la Figura 4.5a, el paralelepípedo corresponde a la zona donde se encuentra la hebra de fibra de carbono. Una vez se tiene la el dibujo listo se exporta como *step* hacia el programa de elementos finitos, una vez en el software se modifica la geometria de forma que esta quedara reducida a un octavo de su forma original, esto se realiza con el objetivo de reducir el costo computacional debido a que el tamaño de los elementos va a ser pequeño, ademas es en este proceso que se debe dividir la geometria para que esta sea mallada de forma correcta como se aprecian en la Figura 4.5b.

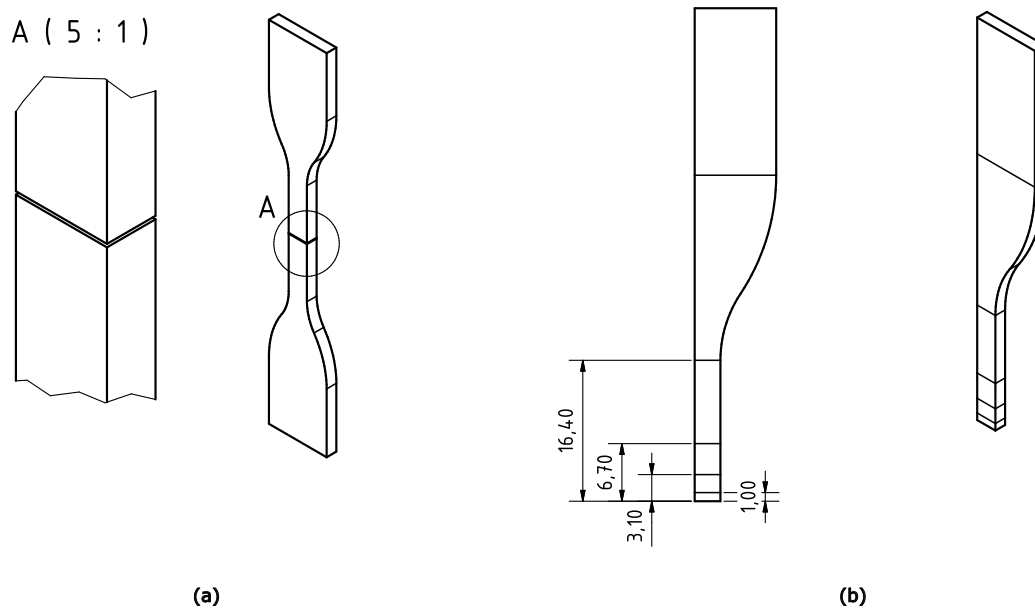


Figura 4.5 (a) Probeta ASTM D638 sin el volumen de la hebra de fibra (b) Un octavo de probeta usada en la simulación.

Se eligen los modulos de Ansys que se van a utilizar los que son: *Material designer*, *Geometry* y *Static structural*. Se procede a crear los materiales del ensayo, es ahora cuando se ingresan las propiedades de la resina epoxica y la fibra de carbono, para lo cual dentro de la biblioteca de materiales que se encuentra en el programa, se deben de elegir los que dicen *Epoxy Resin* y *Unidirectional Carbon Fiber 230 GPa*, estos serán los materiales bases que se modificaran y que se usaran para crear el material compuesto que representara la hebra de fibra de carbono, el por que de realizar ese proceso y no simplemente de asignar la fibra de carbono como material de esa geometría radica en la justificación dada en varios papers, en los cuales los autores realizan la suposición de que las hebras de fibra son impregnadas uniformemente por la resina en el proceso de fabricación de la probeta por lo que se puede considerar esa zona como un material compuesto, en la Tabla 4.3 se aprecian las propiedades mecánicas de los materiales usados. Siguiendo el proceso se carga la geometría en el programa y para el volumen que debe representar el material compuesto como ya se tienen las medidas solo se debe crear un modulo de geometría aparte y dibujar un octavo de esa hebra en *SpaceClaim*, como se ve en la Figura 4.6.

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas de los materiales.

Propiedad	Resina Epoxi	Fibra de Carbono
Módulo de Young E [MPa]	1178.3	-
Módulo de Young E_X [MPa]	-	240000
Módulo de Young E_Y [MPa]	-	24000
Módulo de Young E_Z [MPa]	-	24000
Coeficiente de Poisson ν	0.35	-
Coeficiente de Poisson ν_{XY}	-	0.2
Coeficiente de Poisson ν_{YZ}	-	0.4
Coeficiente de Poisson ν_{XZ}	-	0.2
Módulo de Corte G [MPa]	436.39	-
Módulo de Corte G_{XY} [MPa]	-	9000
Módulo de Corte G_{YZ} [MPa]	-	8214.3
Módulo de Corte G_{XZ} [MPa]	-	9000

Para asignar el material a la hebra se debe primero crear este material, dentro de las opciones que se tiene dentro de *Ansys* es usar el modulo de *Material Designer* el cual mediante el uso de un elemento representativo *RVE* permite obtener las propiedades mecánicas de el compuesto mediante la técnica de homogenización, como se vio en el Estado del arte y Marco Teórico. Para la creación del volumen representativo hay que tener en claro ciertos parámetros los cuales serán esenciales en la creación de un material que sea lo mas realista posible, dentro de estas cualidades se encuentren el volumen de fibra el tipo de geometría del *RVE*, entre otras las que se observan en la Tabla 4.3, en la Figura 4.7 se aprecia la forma del volumen representativo usado. Una vez se obtenga la solución de ese sistema, el material estará creado y sus propiedades listas para asignarlas a la geometría en la Tabla 4.3 se encuentran las características mecánicas del nuevo material compuesto.

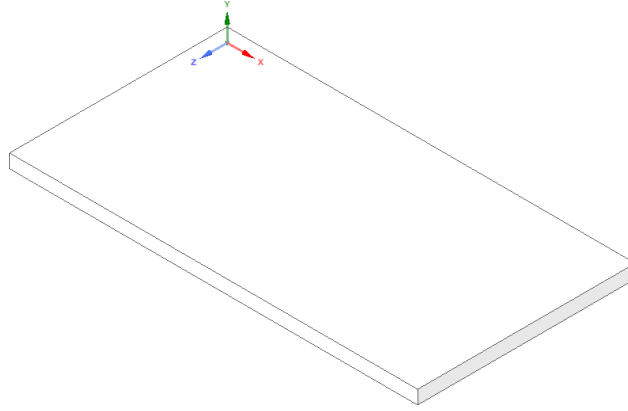


Figura 4.6 Geometria de la hebra de fibra de carbono.

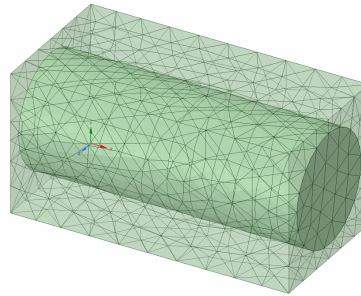


Figura 4.7 Geometria RVE cuadrado.

4.4.2 Mallado, Definición de contactos y Fractura

Una vez definida la geometría del modelo, se procede con la etapa de mallado para discretizar el dominio en elementos finitos. Para esto en el modulo de *Mechanical Model* se importa geometria y materiales, es acá donde se asigna material a cada geometria en el caso de los volúmenes grandes se les asigna la resina epoxica y para el mas pequeño el material compuesto de *Material Designer*. El siguiente paso es crear la malla en cada geometria este paso es critico y se debe tener mucho cuidado ya que para la implementación del *CZM* los nodos de los elementos deben ser coincidentes unos con otros como se aprecia en la Figura 4.8 de lo contrario si eso no ocurre se arriesga a que el método no sea capaz de converger a una solución. Para asegurar que los elementos y sus nodos estén alineados se genera un mallado con *sizing* para la geometria del material compuesto esto resulta sencillo ya que se elige un tamaño de elemento de 0.1 [mm], generándose una malla con elementos cuadrados uniforme como se aprecia en la Figura 4.9.

Para mallar la probeta se usan las divisiones generadas en *SpaceClaim* la forma de realizar ese mallado es generar división de las aristas con el objetivo de generar elementos del tamaño deseado, por ejemplo si una arista mide 30 [mm] y los elementos deben medir 0.1 [mm] se realizan 30 divisiones en esa arista y así sucesivamente con las demás siempre asegurando que el numero de divisiones permite obtener el tamaño de elemento deseado , en caso de no realizar esto lo que ocurrirá es que al momento de mallar los nodos no serán coincidentes. En el capitulo de Resultados se estudiara que ocurre con el caso anterior. Finalmente como se aprecia en la

Tabla 4.4 Configuraciones utilizadas en el análisis micromecánico.

Configuración o Parámetro	Opción Seleccionada
<i>Configuración General del Modelo</i>	
Tipo de Anisotropía	Ortótropo
Calcular Elasticidad Lineal	Activado
Usar Condiciones de Contorno Periódicas	Activado
Usar Simetría de Material en YZ	Activado
Temperatura [°C]	22
Temperatura de Referencia [°C]	22
<i>Geometría del Compuesto Unidireccional</i>	
Tipo de Geometría	Cuadrada
Fracción Volumétrica de Fibra	0.5
Diámetro de Fibra [μm]	7
<i>Configuración de Mallado</i>	
Usar Mallado Conforme	Activado
Usar Mallado Periódico	Activado

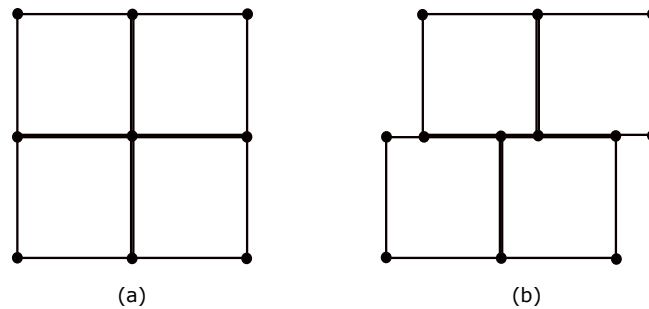
**Figura 4.8** (a) Elementos con nodos coincidentes (b) Elementos con nodos desfasados.

Figura 4.10 y en la Tabla 4.6 se encuentra el tamaño de cada elemento.

A continuación, para simular la adhesión, en el modulo de *Static Structural* se define el contacto entre la fibra y la matriz. Esto se logra mediante la implementación de un material cohesivo, el cual rige el comportamiento de la fractura. Las propiedades constitutivas de este material no son intrínsecas, sino que deben ser caracterizadas y calibradas a partir de los datos obtenidos en ensayos experimentales previos. Dentro del entorno de *Ansys*, la selección de la ley de evolución de daño específica para este material cohesivo (ej. bilineal, exponencial) se realiza en función de la naturaleza de dichos datos experimentales en otras palabras dependiendo de la curva que de se elige los parámetros, lo que si se puede elegir de momento es como se quiere utilizar el método cohesivo si mediante elementos de interfaz o de contacto, para este trabajo se usan los elementos de contactos, para lo cual se debe definir una fractura y elegir la opción de insertar *Contact Debonding* es acá cuando se debe de insertar el material y elegir las caras que se tocan en la geometrías las cuales serán las que se van a separar, normalmente el programa hace esto automáticamente y solo dice cual conexión se debe elegir. Como ya se eligió el método

Tabla 4.5 Propiedades del material compuesto de fibra de carbono (CFR).

Propiedad	Valor
Densidad [kg/m ³]	1480
<i>Propiedades de Elasticidad Ortótropa</i>	
Módulo de Young E_X [MPa]	120590
Módulo de Young E_Y [MPa]	3840.3
Módulo de Young E_Z [MPa]	3840.3
Coeficiente de Poisson ν_{XY}	0.26533
Coeficiente de Poisson ν_{YZ}	0.36714
Coeficiente de Poisson ν_{XZ}	0.26534
Módulo de Corte G_{XY} [MPa]	1183.9
Módulo de Corte G_{YZ} [MPa]	897.05
Módulo de Corte G_{XZ} [MPa]	1183.9

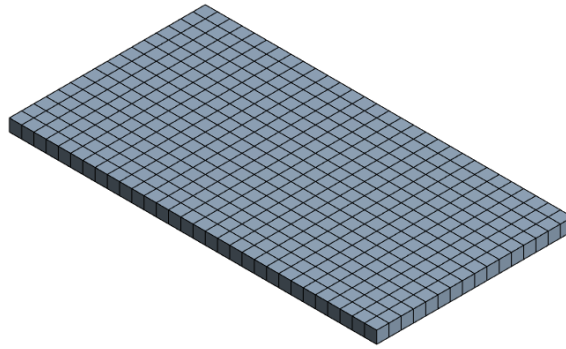


Figura 4.9 Mallado de la geometria donde va el material compuesto de fibra de carbono.

para la fractura el programa da dos opciones de materiales que se pueden crear, para efectos de esta memoria se creo un material basado en el esfuerzo máximo y desplazamiento con las características que se ven en la Tabla 4.7.

Antes de definir cuales serán las condiciones de borde para obtener resultados que se puedan comparar con los que se obtuvieron en las publicaciones del capitulo de *Estado del arte y Marco teórico* se crea lo que *Ansys* llama una *Construction Geometry* esto sirve para asignar que cierta parte de la geometria obtenga resultados en este caso una linea que cruza el espesor de la probeta, para eso se asigna un *Chart* y se selecciona el lugar donde quiere que se ubique esta linea, la cual sera en dos posiciones una linea atravesara el espesor desde la parte central de la probeta y la otra lo hará desde un extremo, esto se hace para así ver y comparar los resultados que se obtienen.

Las condiciones de borde que se aplican a la probeta son de dos tipos, una de ellas es un desplazamiento de 2 mm en 20 segundos a una cara de la probeta como se ve en la Figura 4.11a, la razón de hacer esto se explica por la aplicación de condiciones de borde de simetría a la geometria, lo que quita la necesidad de aplicar mas restricciones de movimiento a la probeta.

Tabla 4.6 Tamaño de los elementos en la probeta de resina.

Rango [mm]	Largo del elemento [mm]
[0, 1]	0.1
[1, 3.1]	0.3
[3.1, 6.70]	0.9
[6.7, 16.4]	1.0
[16.4, —]	1.6

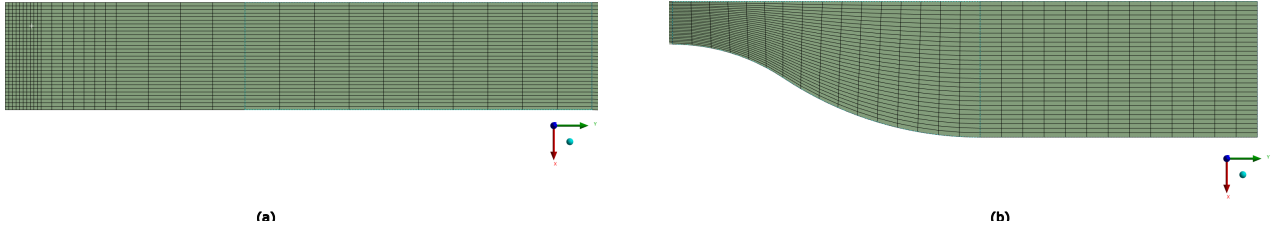


Figura 4.10 (a) Sección con los elementos mas pequeños variando de 0.1 a 1 [mm] y (b) Mallado de la geometria con elementos de 1.6 [mm].

Dentro de las condiciones de simetría que se deben de aplicar se encuentran:

1. Se procede a realizar la simetría en el eje X, para esto se seleccionan las caras que están en el lado negativo del eje X como se aprecia en la Figura 4.11b.
2. A continuación se realiza la selección de las caras que están en el lado negativo del eje Z como se muestra en la Figura 4.11c.
3. Para la selección de la simetría en el eje Y se debe seleccionar dos caras, una es la cara perteneciente a la hebra de material compuesto que apunta en la dirección negativa de Y y la otra cara que es de la probeta de resina que esta en la dirección negativa del eje Y, esta configuración se aprecia en la Figura 4.11b y Figura 4.11d.

Para culminar la configuración de la simulación se activa la opción de larga deformación, se selecciona los resultados que se quiere obtener los que son los esfuerzos normales y las deformaciones normales en las direcciones X, Y, Z.

4.4.3 Análisis de Sensibilidad

Debido a que en la creación del material cohesivo existen dos variables las cuales no se pueden medir por lo que este requiere de un análisis de sensibilidad para analizar la influencia de estos dos parámetros en los resultados, para esto se hace uso del modulo *OptiSlang* el cual crea un metamodelo donde las variables de entrada corresponden al amortiguamiento artificial y el exponente de ley de potencia para modo mixto, en cuanto a la salida corresponde a los resultados que se van a medir los cuales corresponden a el esfuerzo normal en el eje Y y la deformación normal en el eje Y. Efectuado el análisis se debe de comprobar que los resultados de este den igual a los resultados de la simulación. Finalmente con las variables elegidas se puede analizar los resultados obtenidos y enviar la información necesaria para hacer la simulación micromecánica.

Tabla 4.7 Parámetros del modelo de delaminación cohesiva.

Parámetro	Valor Asignado
Modo de Interfaz para Delaminación	Mixto
Deslizamiento Tangencial Bajo Compresión	No
Esfuerzo Máximo de Contacto Normal [MPa]	23.54
Apertura de Contacto al Finalizar [mm]	1.08
Esfuerzo Tangencial Equivalente Máximo [MPa]	23.54
Deslizamiento Tangencial al Finalizar [mm]	0.8
Coefficiente de Amortiguamiento Artificial [s]	0.01
Exponente de Ley de Potencia para Modo Mixto	2

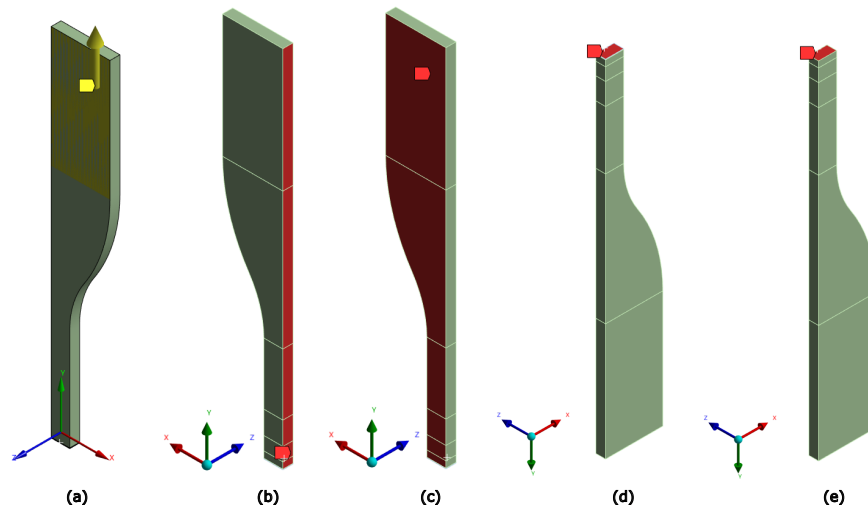


Figura 4.11 (a) Desplazamiento (b) Simetría en X (c) Simetría en Z (d) Simetría en Y sobre la hebra de compuesto (e) Simetría en Y sobre la probeta de resina.

4.5 Parte VI: Simulación Micromecánica

En esta sección se utiliza el programa *Ansys Mechanical APDL*, es importante aclarar que este se puede usar en *Workbench* como un modulo de este, como también ejecutarlo de forma separada. La diferencia que se encuentra en este software es que se permite programar mediante el lenguaje *Ansys Parametric Design Language (APDL)* como se le conoce normalmente), aunque igual da la opción de uso mediante interfaz grafica la cual no es tan sofisticada.

4.5.1 Geometria y materiales

La geometria de la simulación micromecánica corresponde a un *RVE* el cual se compone de un cilindro y un bloque cubico los cuales son intersectados para formar el volumen representativo como se aprecia en la Figura 4.12. Este *RVE* primero se dibuja como un octavo de la geometria total y luego se le aplica simetría (la que no debe de confundirse como condición de borde de simetría), para formar la figura total. Las medidas de este volumen están restringidos por el diámetro de fibra y su fracción volumétrica de fibra el cual se mantiene en 50%, el cual esta dado por la ecuación 22:

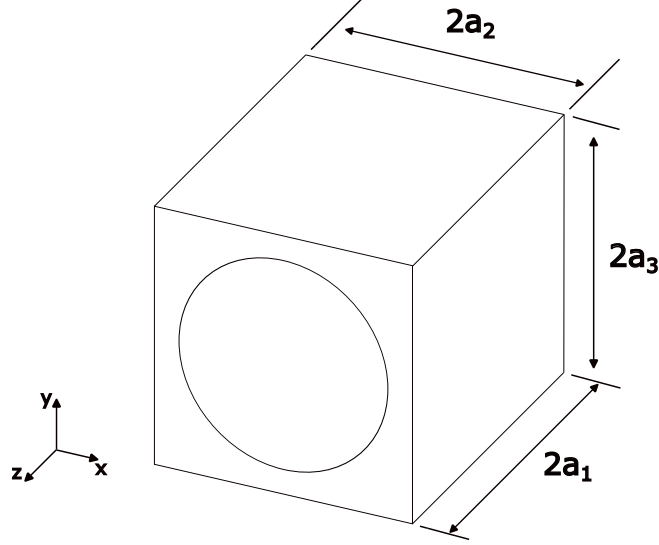


Figura 4.12 Representación del *RVE* usado en la simulación.

$$\frac{v_f}{v_t} = 0.5 \quad (22)$$

Donde v_f es el volumen de fibra y v_t representa el volumen total de material. Estas dos variables se pueden calcular primero suponiendo que la fibra es cilíndrica y que posee el mismo largo que la geometría de la matriz y que a su vez este a su vez posea todos sus lados iguales como lo representan las ecuaciones 23, 24 :

$$v_f = 2a_1 \pi \left(\frac{d_f}{2}\right)^2 \quad (23)$$

$$v_t = 2a_1 \ 2a_2 \ 2a_3 \quad (24)$$

Donde a_1 , a_2 , a_3 representan las medidas en Z, X e Y de los lados de un octavo del cubo. La razón entre v_f y v_t da como resultado la fracción volumétrica de la fibra:

$$V_f = \pi \frac{(d_f/2)^2}{4 \ a_2 \ a_3} = 0.5 \quad (25)$$

Finalmente al resolver la ecuación 25 se encuentran los valores de los lados del *RVE* los que se aprecian en la Tabla 4.8.

En cuanto a los materiales estos son los mismos que los que se usaron en la simulación anterior aunque poseen una ligera diferencia en algunos valores, esto se debe a que si se usan los valores originales que los usados en *Workbench* el programa no va a reconocer valores tales como coeficientes de Poisson o modelos de corte como válidos y pedirá que se modifiquen los valores. Una razón para esto es que probablemente *Workbench* es más flexible con los valores y en caso de que allá algún problema este ajusta los parámetros para lograr converger la simulación, en

Tabla 4.8 Medidas de un octavo del *RVE*.

Variable	Valor [μm]
Diametro de la fibra d_f	7
a_1	4.39
a_2	4.39
a_3	4.39

cambio *Ansys APDL* no es muy flexible en ese sentido y pide que los valores ingresados sean 100% correctos. En la Tabla 4.9 se aprecian los valores obtenidos. Sumado a la Tabla anterior se debe considerar la creación del material cohesivo al cual luego se le asignara el elemento de interfaz para esto se utilizan los mismos valores de esfuerzo que los que se usaron en la simulación en mesoescala solo que en su lugar el desplazamiento ultimo es mucho menor, ya que la escala es en micrómetro, así que se usa un valor de literatura. En la Tabla 4.10 se observaban las propiedades de este material

Tabla 4.9 Propiedades mecánicas de los materiales en APDL.

Propiedad	Resina Epoxi	Fibra de Carbono
Módulo de Young E [MPa]	1178.3	-
Módulo de Young E_X [MPa]	-	240000
Módulo de Young E_Y [MPa]	-	24000
Módulo de Young E_Z [MPa]	-	24000
Coeficiente de Poisson ν	0.35	-
Coeficiente de Poisson ν_{XY}	-	0.18
Coeficiente de Poisson ν_{YZ}	-	0.2
Coeficiente de Poisson ν_{XZ}	-	0.18
Módulo de Corte G [MPa]		-
Módulo de Corte G_{XY} [MPa]	-	9000
Módulo de Corte G_{YZ} [MPa]	-	8214.3
Módulo de Corte G_{XZ} [MPa]	-	9000

4.5.2 Mallado y Definición de contactos y elementos

En esta sección es importante primero definir el tipo de elemento a usar, para este trabajo se tiene la opción de usar dos tipos de elementos para representar la fibra y la resina los cuales corresponden a el *SOLID185* y *SOLID186*, ambos son elementos rectangulares con la diferencia que el segundo tiene nodos intermedios y el primero no, sin embargo pensando en el coste computacional de esta simulación se opta por usar el primero, ya que un buen mallado debería ser suficiente para conseguir resultados que representen bien los esfuerzos y deformaciones. Aparte del elemento que se usa para el refuerzo y la matriz se debe considerar la interfaz, la cual al igual que en la simulación de mesoescala usara el método de zona cohesiva, por lo cual se debe elegir un elemento cohesivo que en este caso es el *INTER205*, el que tiene la característica de crearse en la intersección de los dos materiales siendo un elemento con grosor igual a cero.

Tabla 4.10 Propiedades mecánicas del material cohesivo en APDL.

Propiedad	Valor
Resistencia normal σ_{max} [MPa]	23.54
Apertura crítica δ_n [μm]	0.04
Resistencia tangencial τ_{max} [MPa]	-23.54
Deslizamiento crítico δ_t [μm]	0.04
Coefficiente de penalización	0.999
Factor de energía de fractura	1.0

El mallado del volumen representativo tiene que cumplir que al igual que la anterior configuración los nodos de este deben ser coincidentes, es importante que esta condición se cumpla siempre, ya que al igual que como paso con las variables del material, *Workbench* automáticamente ajusta el contacto para que converja a una solución si es que los nodos no coinciden, pero esto no ocurre en *Ansys APDL*, ya que se muestra un mensaje de error y por ende no se puede continuar. Para asegurar que los nodos coincidan se realiza un mapeado a la geometría, esto significa que se debe seleccionar las líneas que componen la fibra y la resina y dividir las en pequeñas partes que luego serán malladas. La cantidad de divisiones que se realicen en las líneas es muy importante ya que es otro punto en el cual se puede crear muchos errores, en caso de realizar este paso por comandos una buena práctica es dividir primero las líneas de la fibra en un número de n divisiones, seguido a eso se seleccionan las líneas que son frontales a el círculo y se dividen $n/2$ veces estos asegura que el mapeado se forme correctamente, finalmente para las líneas que faltan se les puede dividir cuantas veces se quiera aunque se debe tener cuidado con esto ya que un valor muy alto de divisiones puede crear problemas con la forma de los elementos mas pequeños, además para la división del grosor se puede considerar cualquier valor de división solo hay que tener en cuenta que a mayor número de divisiones habrá mas elementos por lo que el costo computacional subirá bastante. El proceso de divisiones se aprecia en la Figura 4.13. Una vez creada la malla se aplica simetría en todos los ejes y se funcionan los nodos coincidentes obteniendo el rve completo como se aprecia en la Figura 4.14a.

Para crear el elemento de interfaz se debe crear un componente que contenga elementos de la fibra y otro componente que contenga la resina, así el código puede reconocer la intersección de estos y por ende crea la interfaz como se aprecia en la Figura 4.14b, importante tener en consideración que se debe de especificar un valor de tolerancia para la creación de los componentes ya que se podría en algunos casos solo estar tomando los nodos de un elemento y no la totalidad de este por lo que eso podría causar que no se creen los elementos *INTER205* sin mostrar el mensaje de error lo que llevaría a realizar todo el proceso de simulación y solo enterarse del error al revisar los resultados y ver que estos no tienen sentido con lo que debería dar. En la Figura 4.14c se aprecia como queda el mallado visto en la opción vectorial

4.5.3 Condiciones de Borde

Finalizado lo que es la parte del preprocesado de la simulación se continua definiendo las condiciones de borde las que para este caso corresponden a las condiciones de borde periódicas, en este paso lo único que se debe tener consideración es de elegir bien las deformaciones que se cargaran en el código, las cuales en este caso serán las deformaciones máximas que se obtienen

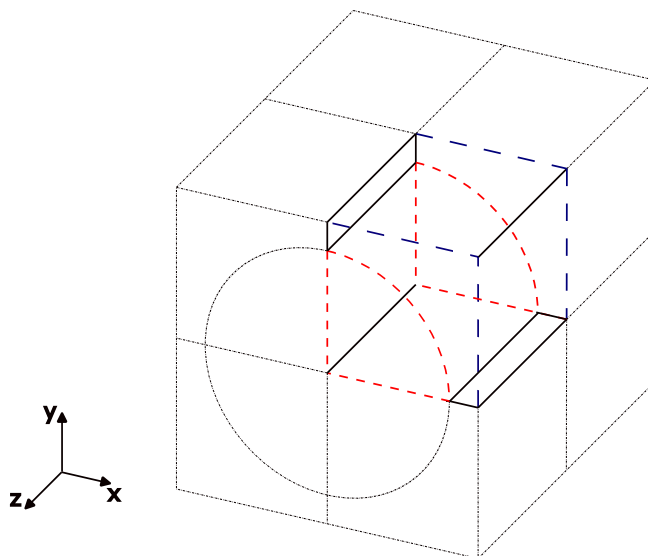


Figura 4.13 Representación de la división de las líneas donde las líneas rojas corresponden a las divisiones de la fibra, las líneas azules son las divisiones de las líneas frontales a la fibra y las líneas negras son las líneas con divisiones libres.

de la simulación en mesoescala, también se debe de tener especial cuidado sobre que valor va en la variable del eje X y Z ya que en la anterior simulación la fibra esta en la dirección X, pero en esta se encuentra en el eje Z por lo cual el valor de la deformación se cambia de lugar, el proceso se puede apreciar en la Figura 4.15, por lo demás se usa el código de la tesis de final de master de Alegre, agregando la opción de largas deformaciones y parámetros del análisis no lineal los que están detallados en el anexo. Finalmente se resuelve la simulación y se extraen los resultados.

4.6 Parte VII: Análisis de resultados

En esta sección se exponen los resultados a los que se llegó primero desde la parte experimental donde se debió de caracterizar la resina epoxica, ya que con esos resultados se creaban los materiales en *Ansys*, luego se obtienen los resultados de los ensayos del *Transverse Fiber Bundle*, de los cuales se obtienen graficas de esfuerzo deformación, las que serán usadas de referencia para contrastar los resultados de la simulación, además se procede a comparar estos resultados con los que hay en literatura en especial los que obtuvo Romero et al. Todo esto se complementa con el uso del sistema *GOM Aramis* con el que se analizan los campos de deformación haciendo especial énfasis en la zona de la hebra de fibra de carbono.

Los resultados de la simulación por elementos finitos se analizan para apreciar como se comporta el compuesto, se evalúa la distribución de esfuerzos fijándose especialmente como se propaga los esfuerzos máximos en el material, además para mayor claridad de esto se grafica estos esfuerzos con respecto al largo en el espesor de la probeta donde ocurren la propagación de la falla en la interfaz fibra-matriz. Estas actividades aportan a lograr el objetivo específico 3.

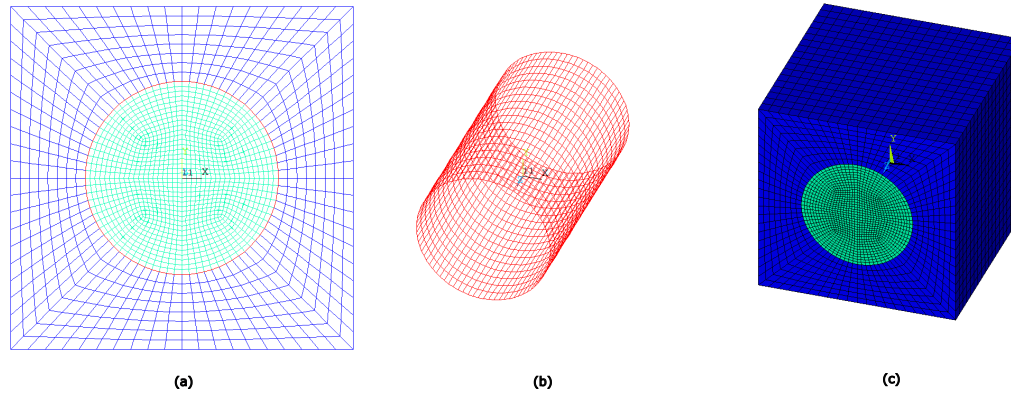


Figura 4.14 a) Vista frontal del *RVE* mallado distinguiéndose sus tres componentes b) Elementos de interfaz *INTER205* c) Vista Isometrica del *RVE* completo.

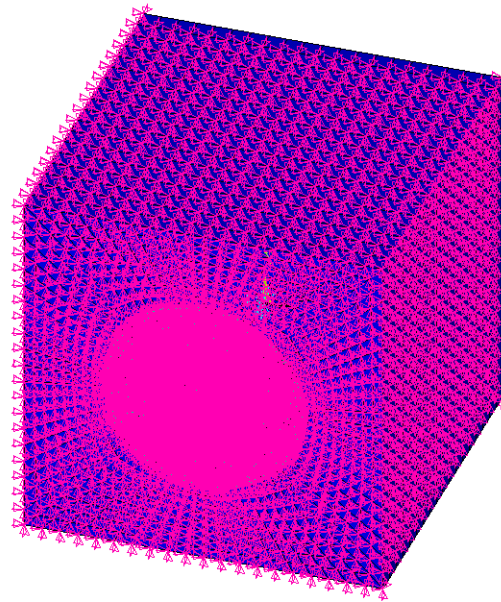


Figura 4.15 Ilustración de las condiciones de borde periódicas.

4.6.1 Validación del modelo

Con los resultados de la simulación se comparan estos con los datos experimentales y se analizan las discrepancias que pueden existir. Luego se modifica el mallado, condición de borde o el criterio de falla. Se vuelve a iterar hasta que la aproximación de los resultados experimentales y simulados sean aceptable. Esta actividad ayuda a cumplir el objetivo específico 4.

La metodología se resume en la Figura 4.16.

4.7 Cronograma

La planificación de la investigación está programada para realizarse a lo largo del semestre académico como se aprecia en la Tabla 4.11

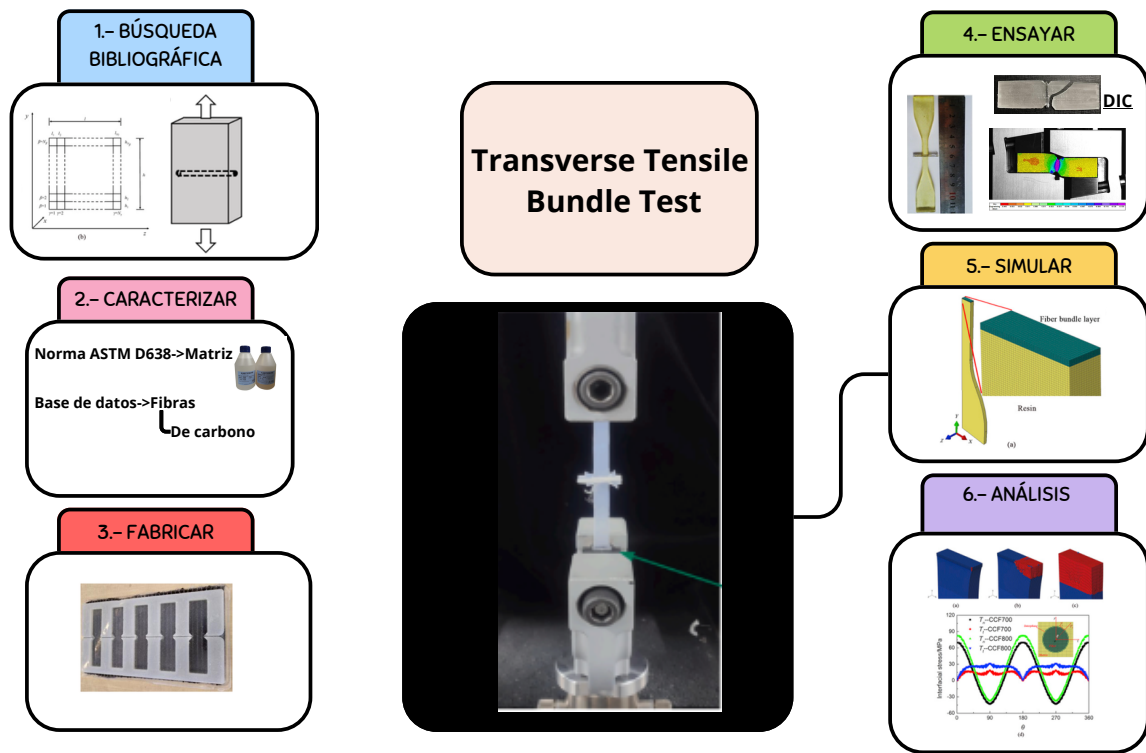


Figura 4.16 Metodología

Tabla 4.11 Carta Gantt

Actividades		Semanas																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Etapa 1																				
1.1	Revisión bibliográfica modelos																			
1.2	Búsqueda de propiedades mecánicas para el modelo																			
1.3	Fabricación de probetas																			
1.4	Ensayos experimentales																			
1.5	Cálculo de las características mecánicas de los materiales																			
Etapa 2																				
2.1	Configuración de la simulación en Ansys																			
2.2	Simulación y análisis																			
2.3	Validación de resultados con datos experimentales																			
	Avance 1																			
	Avance 2																			
	Avance 3																			

5 Resultados y Discusiones

5.1 Caracterización mecánica de la matriz

La caracterización mecánica de la matriz se realizó mediante ensayos de tracción utilizando probetas confeccionadas conforme a la norma *ASTM D638*, específicamente del tipo 4. Este estándar garantiza la reproducibilidad de los resultados y permite la comparabilidad con investigaciones previas. Se prepararon un total de 9 muestras, las cuales fueron sometidas a condiciones de carga uniaxial hasta la fractura con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de la matriz.

En la Tabla 5.1 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas de estos ensayos, incluyendo la resistencia a la tracción promedio, el esfuerzo de ruptura promedio y el módulo elástico. Estos parámetros proporcionan información clave sobre el comportamiento mecánico de la matriz bajo carga, destacando su capacidad para soportar tensiones antes de alcanzar la deformación plástica y, finalmente, la fractura.

Tabla 5.1 Resultados caracterización mecánica.

Resistencia a la tracción promedio [MPa]	Esfuerzo de ruptura promedio [MPa]	Módulo elástico [MPa]
38.50	24.87	1178.26

Adicionalmente, la Figura 5.1 muestra las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a las 9 muestras evaluadas. Estas curvas permiten analizar detalladamente el comportamiento mecánico del material en función de la deformación aplicada. En ellas se observa una región inicial lineal que representa el comportamiento elástico de la matriz, seguida por un punto máximo correspondiente a la resistencia a la tracción, y finalmente una caída abrupta del esfuerzo, indicativa de la fractura.

El análisis de las curvas esfuerzo-deformación revela una baja dispersión entre las muestras ensayadas, lo que refleja una homogeneidad en la fabricación de las probetas y una consistencia en las condiciones de ensayo. Este comportamiento uniforme refuerza la validez de los resultados obtenidos, asegurando su representatividad del material estudiado.

5.2 Resultados Experimentales Transverse Fiber Bundle

Se ensayaron un total de 27 probetas del tipo *Transverse Fiber Bundle*, de las cuales 10 fueron sometidas a tracción utilizando el sistema de correlación de imágenes digitales (*DIC*) Aramis. Este sistema registró las deformaciones en los ejes horizontal y vertical, calculando las variaciones en la posición de los puntos de un patrón moteado aplicado a la superficie de las probetas. Los ensayos se realizaron a una velocidad constante de 1 mm/min, garantizando condiciones uniformes y reproducibles.

Del análisis DIC, como se observa en la Figura 5.2, se evidencia que la deformación transversal en la región central de la probeta, donde se localiza la hebra de fibra de carbono, experimenta cambios mínimos. Esto sugiere que dicha zona actúa como un punto de mayor rigidez debido

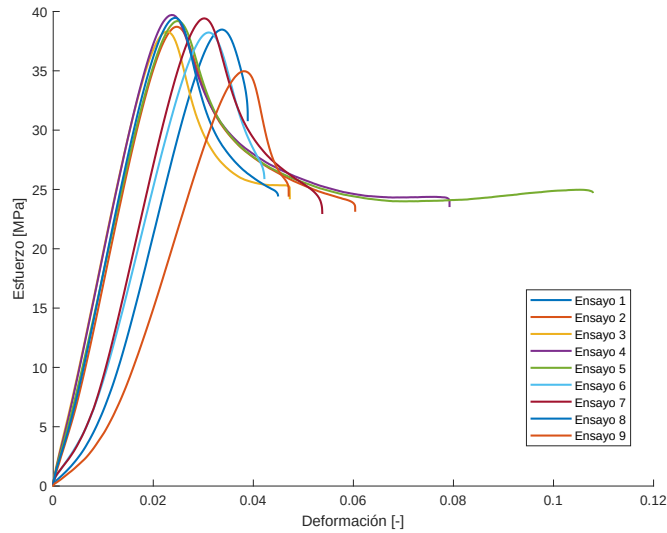


Figura 5.1 Ensayo muestras de Resina Epo200/813.

a la presencia del refuerzo de fibra. Por otro lado, las áreas adyacentes, representadas en color azul, muestran una mayor deformación, lo que indica una reducción efectiva del área hasta concentrarse en la región central. Este comportamiento es indicativo de la localización de esfuerzos, siendo esta la zona donde eventualmente ocurre la fractura del espécimen.

Posteriormente, se graficaron los resultados en términos de esfuerzo frente a deformación, obteniendo la curva esfuerzo-deformación presentada en la Figura 5.3. Se observa una relación lineal inicial entre el esfuerzo y la deformación, correspondiente al comportamiento elástico del material. Conforme el ensayo progresa, el campo de deformación evoluciona de manera concentrada hacia la región central de la probeta, hasta alcanzar la fractura en la ubicación de la hebra de fibra de carbono. Similar a los ensayos realizados en las probetas Iosipescu, el cálculo del esfuerzo tangencial interfacial se basa en el valor máximo del esfuerzo registrado, el cual coincide con el esfuerzo de ruptura del material.

5.3 Resultados de la Simulación en Mesoescala

5.3.1 Análisis de Sensibilidad

Para realizar el análisis de los resultados lo primero que se debe de saber es que valor de amortiguamiento artificial y el exponente de ley de potencia para modo mixto, como ya se menciono en la metodología este se llevo a cabo usando el modulo *OptiSlang* donde se le dio un rango de valores a las dos variables de entrada, para el amortiguamiento se analizo el rango de $[0.001, 1]$ segundos y para la ley de potencia el rango fue de $[1, 2]$, obteniéndose como resultados los presentados en el diagrama de la Figura 5.4. Como se puede apreciar los valores de la deformación se encuentran entre $[0.0115, 0.01165]$ [mm/mm] lo que representa una variación que a primera vista es pequeña lo que estaría indicando que los parámetros del material adhesivo no estarían siendo significativos en el resultado de la deformación, se destaca ademas que los valores por defectos elegidos son los que minimizan la solución y si se presta más atención a

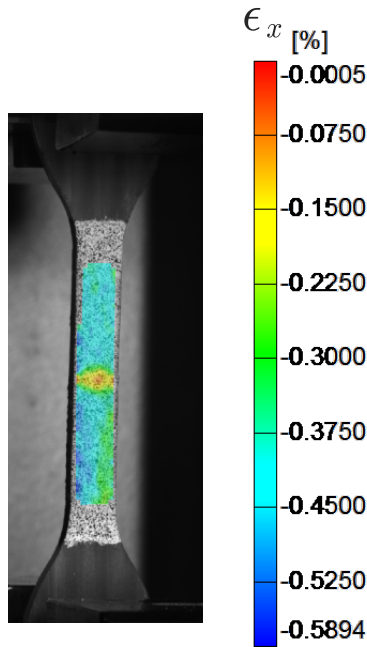


Figura 5.2 Campo de deformacion, probeta TFB

los resultados comparados con los que se obtuvo experimentalmente, estos parecieran a priori estar relativamente cercanos en cuanto a su valor lo que da una buena señal en cuanto a la representatividad de la simulación.

Cambiando el enfoque a lo que ocurre con el esfuerzo normal en Y cuando se varían las variables anteriores, esto al igual que el análisis anterior se puede apreciar en la Figura 5.5. Al igual que en la Figura 5.4, se forma una superficie con forma de rombo. Sobre los valores del esfuerzos estos varían entre $[52.25, 52.45]$ [MPa] lo refuerza la postura de que los parámetros de coeficiente de amortiguación y exponente de ley de potencia no tienen una gran influencia en los valores de los resultados de la simulación, es más se puede de nuevo apreciar que el mínimo se encuentra en los valores de referencia que se tenían para las variables de material cohesivo, por lo que independiente del valor elegido la variación en los datos finales se puede considerar prácticamente insignificante, aunque como se puede empezar a apreciar los valores del esfuerzo son mas alto de lo esperado, sera en análisis posteriores donde se discutirá sobre ese tema.

Como ya se menciona los parámetros elegidos para el análisis de sensibilidad terminaron siendo menos influyente de lo que se esperaba, de todas formas en la Tabla 5.2 se aprecia la contribución de estas variables a el resultado final de distintos esfuerzos y deformaciones donde se destaca como la ley de potencia es la variable más influyente, sin embargo queda aun la duda sobre cual parámetro tiene una influencia significativa sobre los resultados anteriormente expuestos. Dentro de lo que se sabe puede ser un factor muy influyente esta el mallado y es que si este por alguna razón u otra varia en el tamaño como la coincidencia de sus elementos y la forma de los elementos sus resultados podrían estar variando significativamente sus valores.

En la Figura 5.6a se puede ver un mallado que solo posee elementos con tamaños que están entre $[0.1, 1.6]$ [mm] ademas se aprecia que este posee formas distintas de elementos, pero se mantiene que los nodos en su mayoría son coincidentes. Analizando lo resultados del análisis

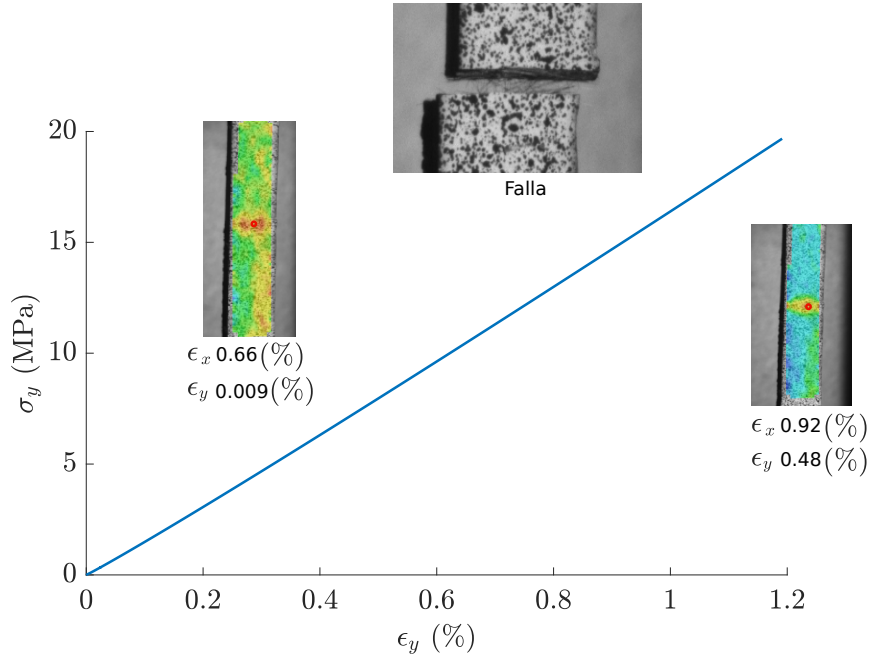


Figura 5.3 Curva esfuerzo deformación, probeta TFB

Tabla 5.2 Porcentaje de influencia de cada parámetro sobre los modelos.

Modelos	Amortiguamiento Artificial %	Ley de Potencia %	Total
Esfuerzo Normal Mínimo	32	67.9	99.9
Esfuerzo Normal Máximo	30.4	69.6	99.6
Esfuerzo Normal Promedio	28.7	73.8	99.5
Deformación Normal Mínima	30.5	70.6	97.2
Deformación Normal Máxima	33.7	69.5	99.6
Deformación Normal Promedio	29.5	73.1	99.6

de sensibilidad este sigue una tendencia similar en cuanto a la variación de los resultados ya que en cuanto a las deformaciones máximas estas están entre $[0.01058, 0.01066]$ [mm/mm] y los esfuerzos máximos entre $[48.14, 48.19]$ [MPa]. La influencia del mallado se aprecia mejor en la magnitud de los resultados ya que estos son menores que los de la probeta anterior pero no se alejan mucho, por lo que ya se puede teorizar que mientras los nodos de las dos geometrías coincidan los resultados no van a variar demasiado y las variables del material cohesivo no afectaran demasiado a los resultados. Finalmente para estar ver de mejor manera la influencia de la malla se realiza un mallado libre donde algunos nodos son coincidentes como se aprecia en la Figura 5.6b, este caso termina siendo el más desfavorable para la elección de las variables de sensibilidad debido a que con este mallado se obtienen variaciones de esfuerzo demasiado grandes no así en el caso de las deformaciones, pero estas sufren de ser más pequeñas de lo que se esperan obtener. Esto deja más claro que el mallado en este tipo de simulación representa una variable fundamental que debe de tomarse con bastante precaución, debido a que esto puede afectar resultados y tomar tiempos de simulación bastante altos sin olvidar que puede tornar en un problema bastante complicado la elección de las variables del material cohesivo.

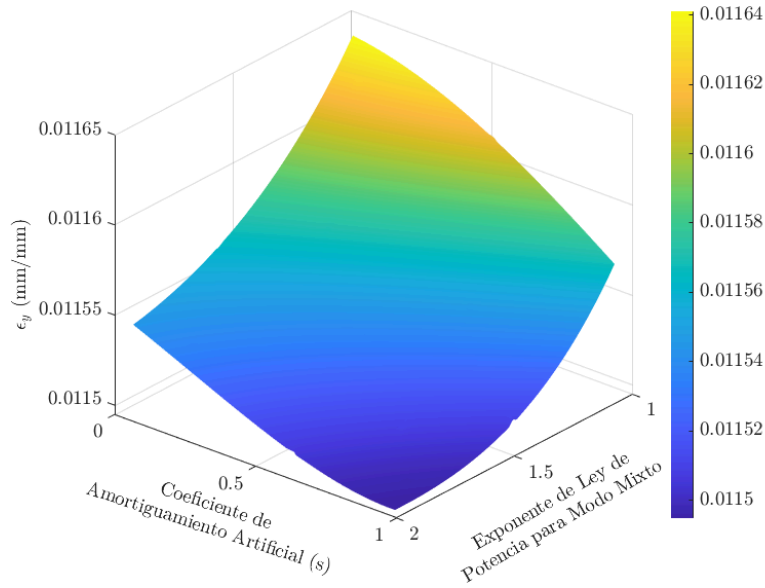


Figura 5.4 Deformación normal máxima en Y con respecto el amortiguamiento y el exponente de ley de potencia.

5.3.2 Resultados de los esfuerzos en la simulación

Como ya se menciono anteriormente los valores usados para los parámetros del material cohesivo son los usados en la Tabla 4.7, junto con el mallado que produce los elementos con formas de ladrillos en toda la geometria. Como lo que se quiere encontrar es una aproximación al esfuerzo normal interfacial, lo primero a analizar son los resultados obtenidos del esfuerzo normal en Y, el cual es el eje donde se aplica el desplazamiento, el cuerpo a analizar en este caso sera la hebra de carbono ya que es en esta geometria donde se debería apreciar un despegue entre los dos materiales. En la Figura 5.7a se aprecia la distribución de esfuerzos en el eje Y, existe en una de las esquinas un concentrador de esfuerzos el que luego se distribuye por toda la linea del eje X, también se aprecia zonas donde el material esta en compresión donde la máxima zona se encuentra en la orilla de la hebra. En cuanto el valor máximo del esfuerzo comparado con el obtenido en la Figura 5.3 estos difieren bastantes en sus valores, esto resulta en que de momento la simulación no sea representativa de lo que ocurre en la realidad por lo menos en lo que es el esfuerzo, sin embargo si se alinea con que se expone en la literatura sobre la concentración de esfuerzo en las orillas de la geometria. En Figura 5.7b se aprecia de mejor forma este fenómeno donde se localiza el esfuerzo máximo en el extremo, ademas se aprecia como el esfuerzo disminuye drásticamente pasando a una zona de compresión la cual se ubica en el centro de la probeta, aun que como se puede observar este esfuerzo de compresión bastante elevado en comparación al esfuerzo máximo. Finalmente en la Figura 5.7c se observa un comportamiento similar a el de la Figura 5.7a donde se genera un concentrador de esfuerzo por toda la arista del extremo de la hebra en el eje X.

Si bien los resultados de los esfuerzos máximos no coinciden con lo que ocurre en la realidad esto en parte se puede deber a la concentración de esfuerzos, para visualizar esta situación se grafica los esfuerzos con respecto al largo de referencia que en este caso es el grosor de la hebra como

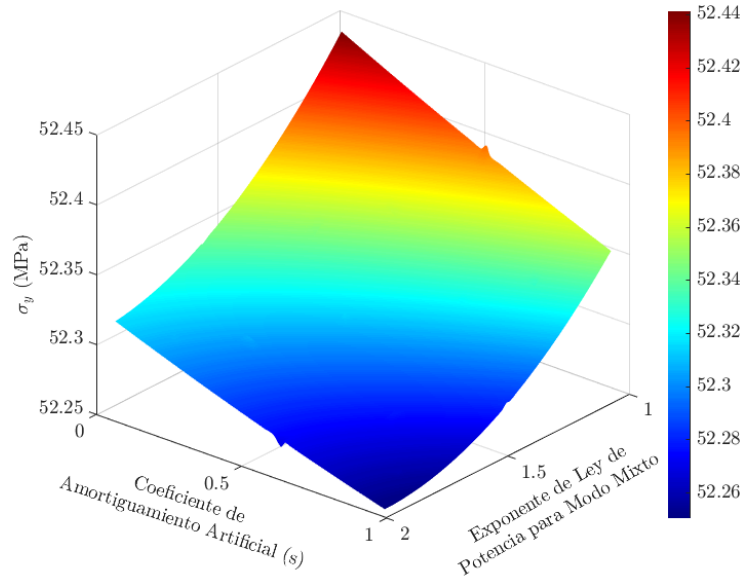


Figura 5.5 Esfuerzo normal máximo en Y con respecto el amortiguamiento y el exponente de ley de potencia.

se muestra en la Figura 5.8, como se aprecia tanto en a como en b al comienzo del grafico los esfuerzos comienzan con el valor máximo del esfuerzo salvo para el caso de σ_x en la Figura 5.8b, lo que esta en relativa concordancia con lo que exponen diversos autores [23, 54], también se aprecia que en la Figura 5.8b el esfuerzo se estabiliza rápidamente en un valor de 21.5 [MPa] lo cual es cercano a los valores experimentales pero la contribución del concentrador de esfuerzo no permite afirmar con claridad que ese sea el esfuerzo normal. En la Figura 5.8a se puede observar valores de esfuerzo menores a los esperados por lo cual, notando mayoritariamente estados de compresión en todas las componentes. Como se puede apreciar al analizar los esfuerzos estos en mesoescala estos no parecieran estar dando respuestas claras sobre cual es el valor del *INS*, ya que si se tomara el valor maximo del esfuerzo en el eje Y este seria bastante superior a lo que se establece como referencia en el ensayo *SSFT*, lo que si empieza a quedar más claro es en donde debería estar mas centrado el análisis la cual son extremos de la probeta donde se concentra el esfuerzo y que a su vez es donde se produce la falla.

5.3.3 Resultados de las deformaciones en la simulación

Siguiendo con el análisis de las deformaciones, se puede observar en la Figura 5.9a como la deformación se concentra en una esquina y se extiende por el borde inferior (lo que en realidad es el centro de la hebra si esta se viese completa) de la geometria, si se presta atención en lo que ocurre en la mayor parte de la hebra en la deformación en el eje Y, se aprecia como en el borde se ve una tonalidad de verde más claro, lo que en la escala indica que en esa parte igual se esta estirando indicando nuevamente que es en las partes externas donde se esta exigiendo más al material y conforme más al centro se va esto pasa de un estado de tracción a un estado de compresión, algo que se puede apreciar de mejor manera en las Figuras 5.9b y c donde con mayor claridad se aprecia el estado de compresión en el centro de la probeta. Algo que es interesante mencionar es como que en las Figuras 5.9b y c las deformaciones máximas están en

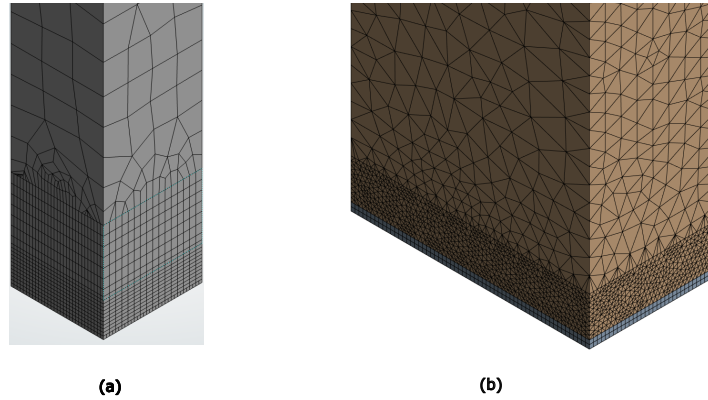


Figura 5.6 Distintos mallados usados en analisis de sensibilidad (a) nodos casi coincidentes (b) nodos coincidentes en el exterior pero no en interior .

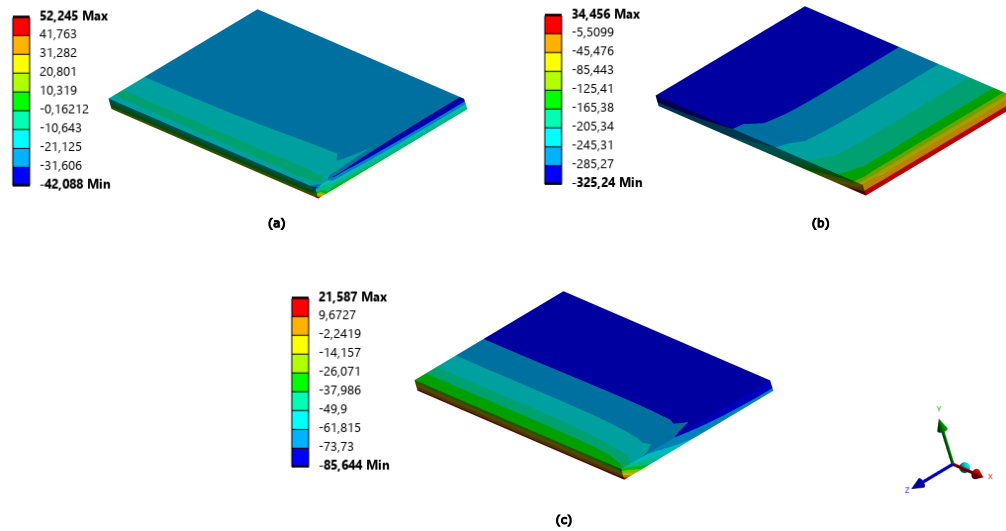


Figura 5.7 Diagrama 1/8 de hebra (a) Esfuerzo normal en Y (b) Esfuerzo normal en X (c) Esfuerzo normal en Z.

positivo cuando es sabido que en los ensayos de tracción ese numero debería ser negativo ya que al aplicare el desplazamiento en Y en los demás ejes el material debe de contraerse. Para explicar este fenómeno hay que ver en detalle que sucede con un elemento en la zona de máxima deformación, para esto la Figura 5.10 muestra en mejor detalle lo que ocurre con un elemento que esta ubicado en la parte exterior del compuesto el cual como se aprecia esta comprimiéndose tal como se esperaría pero en la escala aparece su deformación como si esta fuera positiva cuando debería de ser negativa, una razón de esto se debe a que el cambio de distancia entre los nodos es positiva ya que es justo en esa zona donde se aprecia que se estira esa parte pero su movimiento global es en dirección negativa por lo que el programa solo considera como si el elemento en esa parte esta en tracción cuando en realidad visto desde una perspectiva global en verdad esta en compresión, por lo que para realizar un correcto análisis de los valores de la deformación máxima se debe de inspeccionar con mayor detalle los elementos y no solo ver la escala y sacar conclusiones apresuradas.

De momento solo se ha revisado el que sucede con las deformaciones en la hebra y como analizar

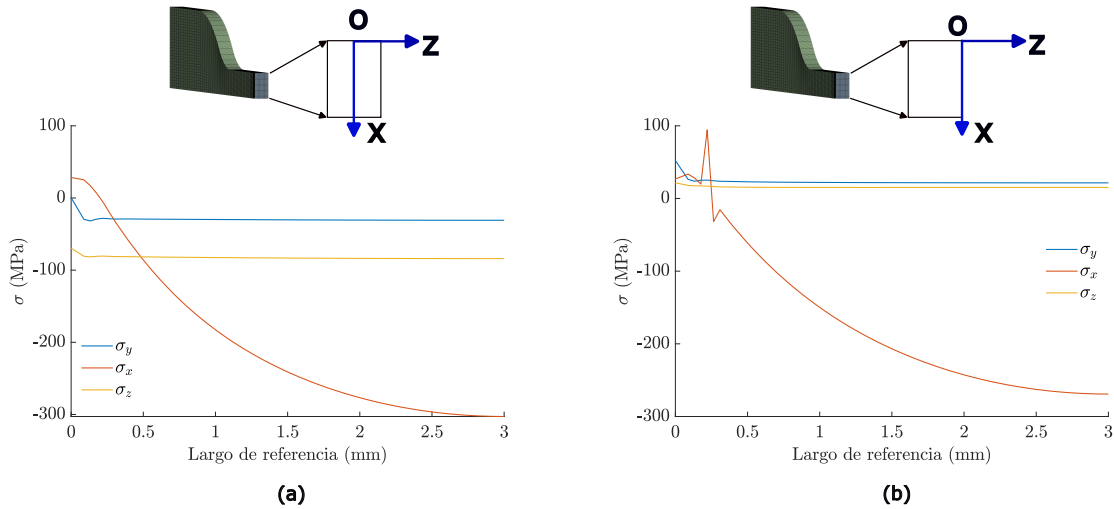


Figura 5.8 (a) Esfuerzo normal en Y (b) Esfuerzo normal en X (c) Esfuerzo normal en Z. Largo de referencia correspondiente a el grosor de la hebra de carbono.

los valores positivos que aparecieron pero aun no se menciona si estos valores son parecidos a los que se midieron en los ensayos experimentales. Al comparar la deformación normal en Y con el de la Figura 5.3 se aprecia que en cuanto al valor máximo que se alcanza en ambos es similar solo habiendo una diferencia de 0.1% y si se compara la deformación en X con el de la Figura 5.2 se encuentra que en estos prácticamente no hay diferencia en los valores lo que permite suponer que si bien los valores de los esfuerzos no son muy representativos o dificultan bastante el llegar a una conclusión, si se puede confiar en lo que se obtiene en las deformaciones para realizar análisis posteriores que involucren otras simulaciones o como validación del modelo. Cambien al comparar lo que ocurre con las deformaciones como ya se ha mencionado según la evidencia de la simulación la falla estaría generándose desde los bordes y dirigiéndose hacia el centro este fenómeno concuerda con los resultados a los que llegaron G.Qui et al[23] y W.Dang[54].

5.4 Resultados de la Simulación en Microescala

5.4.1 Resultados de los esfuerzos en la simulación

Como ya se vio los esfuerzos en la simulación en mesoescala no son muy representativos de lo que ocurre en la realidad o más bien no permiten dar una respuesta clara sobre cual resultado usar de los esfuerzos encontrados en el eje Y, la mejor pista que se da es que la falla empieza en los extremos del material por lo que su esfuerzo máximo se encuentra en esa zona como se aprecia en la Figura 5.8a, pero debido a la concentración de esfuerzo que existe en ese lugar el valor que se encuentra allí es demasiado alto comparado a los valores experimentales. Para solucionar eso se realiza una simulacion en microescala de un elemento de volumen representativo donde mediante el uso de elementos de interfaz y condiciones de borde periódicas usando las deformaciones máximas obtenidas en los tres ejes coordenados.

En la Figura 5.11a se aprecia los esfuerzos en Y sobre la fibra de carbono y en la Figura 5.11b los esfuerzos en el mismo eje pero sobre la resina epoxica como se puede observar la matriz posee dos zonas bien marcadas una de tracción y la otra de compresión no obstante la fibra es más homogénea en cuanto a como se distribuyen los esfuerzos solo notándose un aumento en

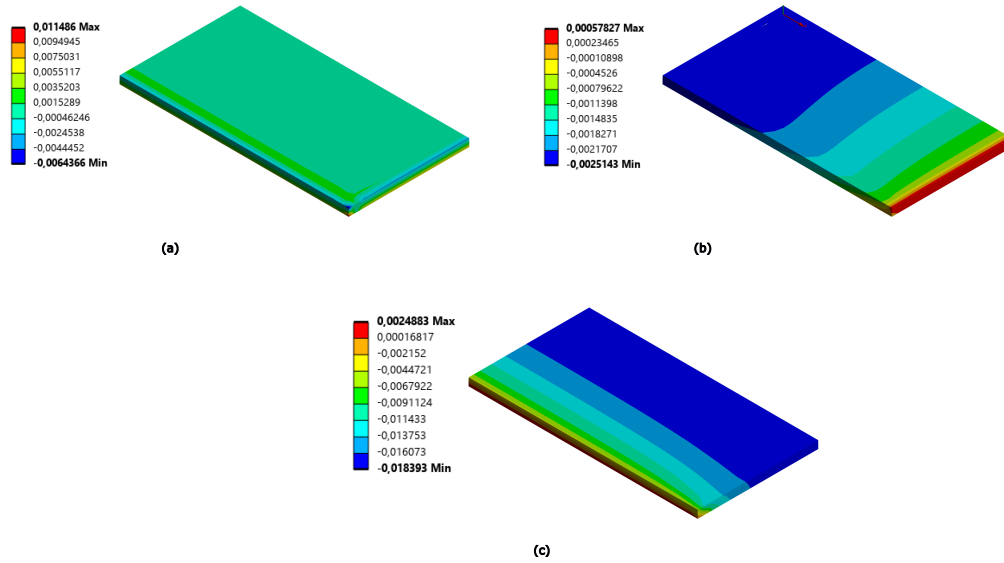


Figura 5.9 Diagrama 1/8 de hebra (a) Deformación normal en Y (b) Deformación normal en X (c) Deformación normal en Z.

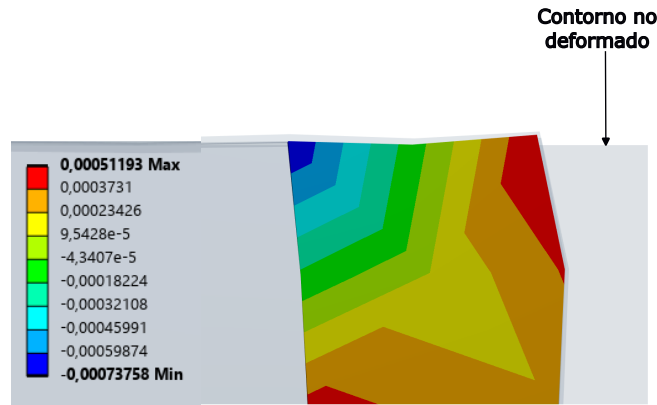


Figura 5.10 Detalle deformación de un elemento en X.

estos en los extremos de la geometría, en cuanto al máximo esfuerzo este es de alrededor de 89.2 MPa lo que es incluso mayor a lo encontrado en la simulación en mesoescala, lo que quiere decir que para la deformación aplicada la resina se rompe pero la fibra aun se mantiene dentro del rango elástico.

Aunque se obtuvo resultados demasiado grandes para dos de los tres componentes del compuesto lo que más interesa es saber que ocurre con la interfaz, en la Figura 5.12 se puede observar la distribución de esfuerzos normales a la interfaz donde destaca en la zona superior e inferior el máximo esfuerzo que además está en el eje Y que es donde se aplica la deformación máxima, este esfuerzo llega a un valor de **20.3 [MPa]** estando acorde aunque más pequeño que con lo que se obtiene experimentalmente, su diferencia es aceptable y sí podría considerarse como representativo.

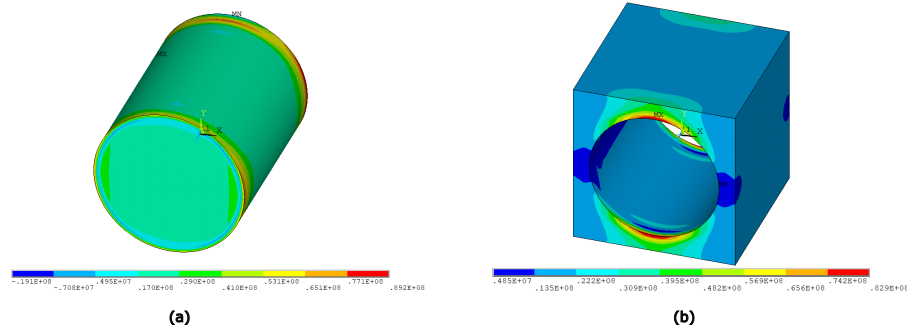


Figura 5.11 Esfuerzos en el eje Y (a) Fibra (b) Resina.

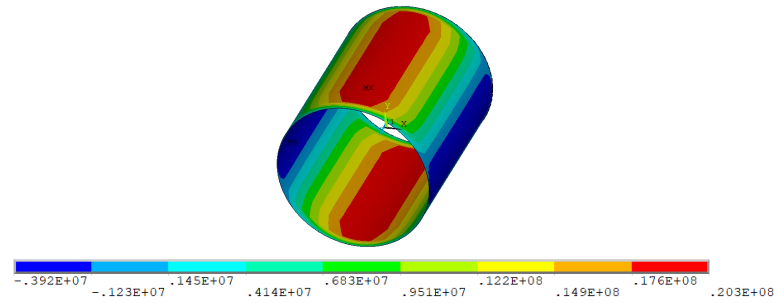


Figura 5.12 Esfuerzos en la Interfaz fibra-matriz.

5.5 Resultados Esfuerzo Normal Interfacial Transverse Fiber Bundle

Como se a visto en este capitulo existen muchos valores que se pueden extraer del programa, por lo que se debe tener cuidado con que valores se debe de post-procesar para obtener un resultado representativo del esfuerzo. Como ya se ha expuesto se logra dar con una aproximación al esfuerzo interfacial y a la deformación sufrida por el material en los ensayos experimentales, al combinar esta información se obtiene el grafico esfuerzo deformación de la Figura 5.13, donde se observa como finalmente los resultados obtenidos tanto en la simulación como en el ensayo experimental se parecen se ven mínimas diferencias en cuanto a deformación y a esfuerzo las que se pueden deber a simplificación del *RVE* suposición de parámetros para el material cohesivo y los materiales como el refuerzo y la matriz. Finalmente la Tabla 5.3 estan los valores obtenidos de ensayos *SFFT*, *Iosipescu* y *Transverse Fiber Bundle*, si bien los dos primeros solo miden esfuerzos en corte es sabido que el *INS* no debe de estar muy alejado de esos valores y como se puede apreciar las diferencias son mínimas en cuanto a valor numérico siendo la diferencia con el valor de referencia del ensayo de fragmentación de fibra única de **4.15%**.

Tabla 5.3 Comparación de resistencias a la tracción transversal.

Ensayo	IFSS/INS [MPa]
SFFT	21.18
Iosipescu	23.37
Transverse Fiber Bundle	20.3

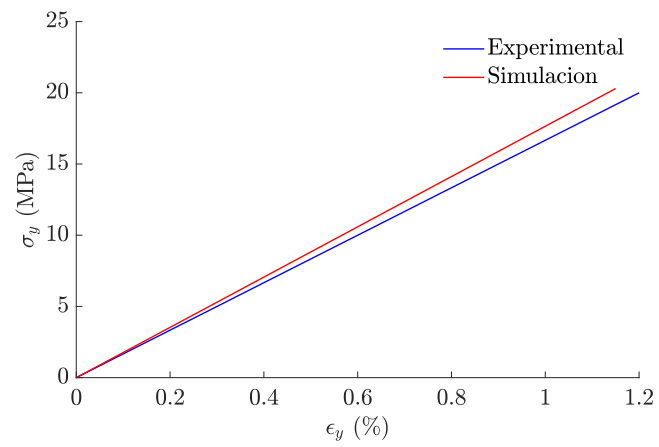


Figura 5.13 Curva esfuerzo deformación para la simulación y el resultados de los experimentos.

6 Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha desarrollado un modelo numérico, basado en el método de elementos finitos, para simular el ensayo Transverse Tensile Bundle Test (TTBT), permitiendo analizar la distribución de esfuerzos y el comportamiento mecánico de la interfaz fibra-matriz en materiales compuestos. El modelo fue validado mediante resultados experimentales, mostrando una concordancia adecuada en términos de tendencia y magnitud, lo que respalda la viabilidad del enfoque propuesto como herramienta de análisis a mesoescala.

En cuanto a el logro de los objetivos específicos estos se cumplen en su totalidad ya que se logra determinar propiedades mecánicas necesarias para la simulación, se concluye igualmente la necesidad de realizar mas ensayos para obtener las propiedades especificas de decohesión de la fibra y la resina específicamente la distancia del ultimo despegue y el esfuerzo al cual ocurre para poder crear el material cohesivo de mejor manera, ademas se sugiere realizar más ensayos mecánicos a los materiales para obtener sus propiedades mecánicas precisas y verificar si estas son similares a las usadas en la simulación. En cuanto a el modelo se logra desarrollar un modelo de multiescala de una vía que combina una simulacion de mesoescala donde se logra obtener resultados que se ajustan a la realidad como las deformaciones, pero a su vez se visualiza la necesidad de otro análisis para obtener los esfuerzos, ya que de esa simulación no se puede obtener un esfuerzo que con absoluta seguridad se pueda afirmar que es el *INS*. Para eso se requirió de implementar la simulación en microescala usando un elemento de volumen representativo implementando también en la geometria el modelo de zona cohesiva para simular la interfaz, esto dio finalmente con el resultado de encontrar un esfuerzo interfacial que se ajustaba a la realidad solo difiriendo en resultado con la referencia en un 4% lo que cumple con no solo el objetivo especifico si no también da cumplimiento al objetivo general que bes lograr la simulacion del ensayo *Transverse Tensile Bundle Test* y a su vez cumpliendo y superando lo propuesto en la hipótesis de este trabajo de estar dentro del rango 10% a 15%.

Si bien se logran cumplir los objetivos queda por mejorar como ya se menciona la búsqueda de parámetros de los materiales aplicarles análisis de sensibilidad para ver su influencia en la simulación, ademas se sugiere agregar parámetro de daño en el material que permitan ver como se propaga la grita y analizar mejor el daño en la interfaz. También se debe de implementar la simulación multiescala de dos vías para comprobar si los resultados mejoran o difieren más aun y así lograr llegar a la aplicación a estructuras y no solo quedarse en simulación de ensayos. Finalmente se propone realizar una versión más realista del *RVE* con distribución de fibra aleatoria y estudiar nuevamente que ocurre con la distribución de esfuerzos deformaciones y el daño en materiales e interfaz.

Referencias

- [1] T.-D. Ngo, *Introduction to Composite Materials*. 2020.
- [2] S. Naqvi, H. M. Prabhakara, E. Bramer, W. Dierkes, R. Akkerman, and G. Brem, “A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 136, pp. 118–129, 9 2018.
- [3] “Fiber reinforced polymer (frp) composites market size, share & industry analysis,” 2023. By Type (Glass Fiber-reinforced Polymer, Carbon Fiber-reinforced Polymer, and Others), By Application (Transportation, Construction, Electronics, Sports & Leisure, and Others), and Regional Forecast, 2024-2032.
- [4] A. Lefeuvre, S. Garnier, L. Jacquemin, B. Pillain, and G. Sonnemann, “Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 125, pp. 264–272, 10 2017.
- [5] S. Erden and K. Ho, *Fiber reinforced composites*, pp. 51–79. Elsevier, 2017.
- [6] A. L. Rosa, D. Banatao, S. Pastine, A. Latteri, and G. Cicala, “Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 104, pp. 17–25, 11 2016.
- [7] H. GangaRao, *Infrastructure Applications of Fiber-Reinforced Polymer Composites*, pp. 565–584. Elsevier, 2011.
- [8] F. Stojcevski, T. B. Hilditch, and L. C. Henderson, “A comparison of interfacial testing methods and sensitivities to carbon fiber surface treatment conditions,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 118, pp. 293–301, 3 2019.
- [9] A. Sambruno, F. Bañon, J. Salguero, B. Simonet, and M. Batista, “Machining of polymeric composite materials by water jet with abrasive,” in *Advanced Machining and Finishing*, pp. 397–415, Elsevier, 2021.
- [10] M. Yekani Fard, B. Raji, and H. Pankretz, “Correlation of nanoscale interface debonding and multimode fracture in polymer carbon composites with long-term hygrothermal effects,” *Mechanics of Materials*, vol. 150, p. 103601, 2020.
- [11] J. Zhou, Y. Li, N. Li, X. Hao, and C. Liu, “Interfacial shear strength of microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test,” *Composites Science and Technology*, vol. 133, pp. 173–183, 9 2016.
- [12] H. Zheng, W. Zhang, B. Li, J. Zhu, C. Wang, G. Song, G. Wu, X. Yang, Y. Huang, and L. Ma, “Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 233, p. 109639, 3 2022.

- [13] Y. Tian, H. Zhang, and Z. Zhang, “Influence of nanoparticles on the interfacial properties of fiber-reinforced-epoxy composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 98, pp. 1–8, 7 2017.
- [14] B. Miller, P. Muri, and L. Rebenfeld, “A microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface,” *Composites Science and Technology*, vol. 28, pp. 17–32, 1 1987.
- [15] F. Stojcevski, T. B. Hilditch, T. R. Gengenbach, and L. C. Henderson, “Effect of carbon fiber oxidization parameters and sizing deposition levels on the fiber-matrix interfacial shear strength,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 114, pp. 212–224, 11 2018.
- [16] M. S. Madhukar and L. T. Drzal, “Fiber-matrix adhesion and its effect on composite mechanical properties: Iv. mode i and mode ii fracture toughness of graphite/epoxy composites,” *Journal of Composite Materials*, vol. 26, pp. 936–968, 7 1992.
- [17] X. F. Zhou, H. D. Wagner, and S. R. Nutt, “Interfacial properties of polymer composites measured by push-out and fragmentation tests,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 11, pp. 1543–1551, 2001.
- [18] O. Verschatsse, M. Nikforooz, K. De Clerck, W. Van Paepegem, and L. Daelemans, “Analysis of fiber-matrix interface debonding under normal loading using in-situ microscopy and cruciform-shaped single glass fiber/composite specimens,” *Composites Science and Technology*, p. 111089, 2025.
- [19] C. Ageorges, K. Friedrich, T. Schüller, and B. Lauke, “Single-fibre broutman test: fibre-matrix interface transverse debonding,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 12, pp. 1423–1434, 1999.
- [20] K. Martyniuk, B. F. Sørensen, P. Modregger, and E. M. Lauridsen, “3d in situ observations of glass fibre/matrix interfacial debonding,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 55, pp. 63–73, 2013.
- [21] D. B. Gundel, B. S. Majumdar, and D. B. Miracle, “Evaluation of the transverse response of fiber-reinforced composites using a cross-shaped sample geometry,” *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 33, no. 12, pp. 2057–2065, 1995.
- [22] F. Stupenengo, “Materiales y materias primas,” 2011.
- [23] G. Qi, S. Du, B. Zhang, Z. Tang, and Y. Yu, “Evaluation of carbon fiber/epoxy interfacial strength in transverse fiber bundle composite: Experiment and multiscale failure modeling,” *Composites Science and Technology*, vol. 105, pp. 1–8, 2014.
- [24] Y. Zhou, M. Fan, and L. Chen, “Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 101, pp. 31–45, 9 2016.
- [25] R. E. Swain, K. L. Reifsnider, K. Jayaraman, and M. el Zein, “Interface/interphase concepts in composite material systems,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 3, pp. 13–23, 1990.

- [26] D. Kalita and A. N. Netravali, “Interfaces in green composites: A critical review,” *Reviews of Adhesion and Adhesives*, vol. 3, pp. 386–443, 12 2015.
- [27] I. Goda, E. Padayodi, and R. Rija Nirina, “Computational analysis of the interfacial debonding in polymer composites: research progress and challenges,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 7, p. 231, 11 2024.
- [28] X. Yuan, Z. Zhang, X. Mu, C. Shan, X. Gao, and B. Zhu, “Recent progress on interface characterization methods of carbon fiber reinforced polymer composites,” 11 2024.
- [29] J. U. Lee, B. Park, B.-S. Kim, D.-R. Bae, and W. Lee, “Electrophoretic deposition of aramid nanofibers on carbon fibers for highly enhanced interfacial adhesion at low content,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 84, pp. 482–489, 5 2016.
- [30] J. Haubrich, M. Löbbecke, P. Watermeyer, F. Wilde, G. Requena, and J. da Silva, “Buried interfaces – a systematic study to characterize an adhesive interface at multiple scales,” *Applied Surface Science*, vol. 433, pp. 546–555, 3 2018.
- [31] P. Feng, L. Ma, G. Wu, X. Li, M. Zhao, L. Shi, M. Wang, X. Wang, and G. Song, “Establishment of multistage gradient modulus intermediate layer between fiber and matrix via designing double “rigid-flexible” structure to improve interfacial and mechanical properties of carbon fiber/resin composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 200, p. 108336, 11 2020.
- [32] C. Yang, D. Zhu, F. Yang, Q. Liu, C. Sun, K. Lei, Z. Zheng, and X. Wang, “Quantitative analysis based on atomic force microscopy characterization of interfacial properties between carbon fibers and epoxy resin subjected to hygrothermal and thermal treatments,” *Composites Science and Technology*, vol. 198, p. 108278, 9 2020.
- [33] Q. Wu, M. Li, Y. Gu, Y. Li, and Z. Zhang, “Nano-analysis on the structure and chemical composition of the interphase region in carbon fiber composite,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 56, pp. 143–149, 1 2014.
- [34] T. Kitayama, S. Utsumi, H. Hamada, T. Nishino, T. Kikutani, and H. Ito, “Interfacial properties of pp/pp composites,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 88, pp. 2875–2883, 6 2003.
- [35] “Tesis de doctorado estudio de la modificación superficial en fibras de carbono recicladas y su influencia en la interfaz fibra-matriz sobre las propiedades mecánicas de materiales de altas prestaciones, alexis salas,”
- [36] J. L. Thomason, “Glass fibre sizing: A review,” 12 2019.
- [37] X. Peng, Y. Wu, and Z. Wei, “Research progress on the surface modification of carbon fiber,” *RSC Advances*, vol. 14, pp. 4043–4064, 1 2024.
- [38] L. Servinis, K. M. Beggs, C. Scheffler, E. Wolfel, J. D. Randall, T. R. Gengenbach, B. Demir, T. R. Walsh, E. H. Doeven, P. S. Francis, and L. C. Henderson, “Electrochemical surface modification of carbon fibres by grafting of amine, carboxylic and lipophilic amide groups,” *Carbon*, vol. 118, pp. 393–403, 7 2017.

- [39] D. J. Eyckens, C. L. Arnold, Žan Simon, T. R. Gengenbach, J. Pinson, Y. A. Wickramasingha, and L. C. Henderson, “Covalent sizing surface modification as a route to improved interfacial adhesion in carbon fibre-epoxy composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 140, 1 2021.
- [40] S. Wang, S. Zhang, Y. Yang, Z. Dong, and G. Wang, “Direct electrochemical grafting of crystalline paek macromolecule on carbon fiber to enhance the interfacial properties of peek/cf composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 220, 3 2022.
- [41] J. An, J. W. Kim, D. H. Kim, S. H. Kim, G. J. Shin, and J. H. Lee, “Simultaneously improving vertical thermal conductivity and oil resistance of carbon fiber reinforced composite through layer-by-layer plasma surface treatment,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 37, 4 2023.
- [42] K. Subhani, N. Hameed, A. Al-Qatatsheh, J. Ince, P. J. Mahon, A. Lau, and N. V. Salim, “Multifunctional structural composite supercapacitors based on mno₂-nanowhiskers decorated carbon fibers,” *Journal of Energy Storage*, vol. 56, 12 2022.
- [43] F. Stojcevski, T. B. Hilditch, and L. C. Henderson, “A comparison of interfacial testing methods and sensitivities to carbon fiber surface treatment conditions,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 118, pp. 293–301, 3 2019.
- [44] G. P. Tandon, R. Y. Kim, S. G. Warrier, and B. S. Majumdar, “Influence of free edge and corner singularities on interfacial normal strength: application in model unidirectional composites,” tech. rep.
- [45] F. Romero, F. Méndez, J. González, V. Tuninetti, C. Medina, M. Valin, J. Valin, A. Salas, and C. Vicuña, “Acoustic emission-based method for ifss characterization in single-fiber fragmentation tests,” *Applied Sciences*, vol. 15, p. 4517, 4 2025.
- [46] A. J. Brunner, J. J. Schwiedrzik, G. Mohanty, and J. Michler, “Fiber push-in failure in carbon fiber epoxy composites,” in *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, pp. 538–545, Elsevier B.V., 2020.
- [47] R. Livingston and B. Koohbor, “Characterizing fiber-matrix debond and fiber interaction mechanisms by full-field measurements,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 7, 3 2022.
- [48] K. R. Totten, B. Kutub, and L. A. Carlsson, “In situ determination of the fiber-matrix interface tensile strength,” *Journal of Composite Materials*, vol. 50, pp. 589–599, 3 2016.
- [49] J. Zhang, S. Deng, Y. Wang, L. Ye, L. Zhou, and Z. Zhang, “Effect of nanoparticles on interfacial properties of carbon fibre-epoxy composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 55, pp. 35–44, 2013.
- [50] Y. Xu, J. Zhu, L. Zhou, B. Yang, Z. Liu, Y. Liu, L. Tang, and Z. Jiang, “Measurement of tensile and shear strength of interfacial bonding in fiber reinforced soft composites combining experiments and simulation,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 183, 8 2024.
- [51] P. Rosso and K. Váradi, “Fe macro/micro analysis of thermal residual stresses and failure behaviour under transverse tensile load of ve/cf - fibre bundle composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 3241–3253, 12 2006.

- [52] G. Qi, B. Zhang, and Y. Yu, “Research on carbon fiber/epoxy interfacial bonding characterization of transverse fiber bundle composites fabricated by different preparation processes: Effect of fiber volume fraction,” *Polymer Testing*, vol. 52, pp. 150–156, 7 2016.
- [53] W. Li, W. Chen, L. Tang, Z. Jiang, and P. Huang, “A general strength model for fiber bundle composites under transverse tension or interlaminar shear,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 45–55, 6 2019.
- [54] W. Dang, J. Wang, and A. Ni, “Simulation of unidirectional composite delamination using fiber bundle interface strength,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 138, 8 2025.
- [55] P. Drescher, M. Thomas, J. Borris, U. Riedel, and C. Arlt, “Strengthening fibre/matrix interphase by fibre surface modification and nanoparticle incorporation into the matrix,” *Composites Science and Technology*, vol. 74, pp. 60–66, 1 2013.
- [56] J. Hou, X. Guo, Q. Li, D. Zhu, and G. J. Weng, “Review on interpretations, applications, and developments of numerical methods in studying interface fracture,” *Acta Mechanica*, 1 2025.
- [57] M.-J. Pindera and B. A. Bednarczyk, “An efficient implementation of the generalized method of cells for unidirectional, multi-phased composites with complex microstructures,” tech. rep.
- [58] F. J. Rizzo, “An integral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics,” tech. rep.
- [59] T. Belytschko and T. Black, “Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 45, pp. 601–620, 6 1999.
- [60] G. Francfort and J.-J. Marigo, “Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 46, pp. 1319–1342, 8 1998.
- [61] *REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENTS AND UNIT CELLS*.
- [62] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2nd ed., 2013.
- [63] B. Alegre Sabatel, “Análisis micromecánico de materiales compuestos con interfase inclusión-matriz imperfecta mediante elemento de volumen representativo,” trabajo fin de máster, Máster en Ingeniería Industrial, España, 2023. Tutor: Luis Rodríguez de Tembleque Solano.

A Carta Gantt



Figura A.1 Carta Gantt

B Código APDL

```
1
2
3
4
5 !Hola si llegaste hasta aca es por que o quieres aprender a usar APDL y mi
6 !memoria fue uno de los documentos que encontraste o estas haciendo algo
7 !parecido y no sabes por donde empezar
8 ! estuve en la misma situacion desesperada
9
10 !Como recomendacion sugiero leer los manuales de referencia de comandos de
11 !Ansys APDL, tambien como sus guias de teorias y el de mallado para saber
12 !requisitos que deben cumplir materiales y geometrias. Espero que este
13 !codigo sea de ayuda y se entienda, ademas es importante revisar el libro de
14 !Barbero y el TFM de Alegre Sabatel ya que es de esos trabajos que se basan
15 !estos codigos
16
17
18 /BATCH
19 /CLEAR
20 /TITLE,ONE-EIGHT Symmetric Model of RVE
21
22 !Define variables para el modelo
23 pi=acos(-1)
24 rf=3.5 ! Rdio de la fibra en micrones
25 vf=0.5 ! Fraccion volumetrica de la fibra
26 a2=sqrt((pi*rf*rf)/(4*vf)) !x2 largo en micrones
27 a3=sqrt((pi*rf*rf)/(4*vf)) ! x3 largo en micrones
28 a1=sqrt((pi*rf*rf)/(4*vf)) ! x1 largo en micrones
29
30
31
32 /PREP7 ! Pre-processor module
33 MP,EZ,1,2.41E11 ! Propiedades de la fibra en Pascales [Pa]
34 MP,EX,1,2.41E10 ! Propiedades de la fibra en Pascales [Pa]
35 MP,EY,1,2.41E10 ! Propiedades de la fibra en Pascales [Pa]
36 MP,PRXY,1,0.2 ! nu_xy (en el plano de isotropia)
37 MP,PRYZ,1,0.18 ! nu_yz, nu_xz (Poisson fuera del plano)
38 MP,PRXZ,1,0.18
39 MP,GXY,1,8.2143E9 ! GXY calculado para el plano de isotropia
40 MP,GYZ,1,9E9 ! GYZ y GXZ son propiedades independientes, se asume un valor
    tipico
41 MP,GXZ,1,9E9 ! GXZ = GYZ para material transversalmente isotropo
42
43
44 MP,EX,2,1178260000 ! Propiedades de la resina en Pascales [Pa]
45 MP,PRXY,2,0.35
46 MP,GXY,2,1178260000/(2*(1+0.35))
47 !Tipos de Elementos
48 ET,1,SOLID185
49 ET,2,SOLID185
50 ! Elegir SOLID185, hay que siempre revisar compatibilidad entre los elementos
    a usar
51 !Elemento de contacto para interfaz
```

```

52 ET,3,INTER205! tiene 8 nodos
53 TB,CZM,3,,,BILI !Material adhesivo todo en Pascales y micrometros
54 TBDATA,1,23540000,0.04,-23540000,0.04,0.999,1.0
55
56 !Creacion de la geometria, se crea primero un octavo del RVE
57 BLOCK,0,a2,0,a3,0,a1 !Bloque de resina
58 ! definicion geometrica
59 CYLIND,rf,,0,a1,0,90
60 !WPOFF,a2,a3
61 !CYLIND,rf,,0,a1,180,270
62
63
64 VOV LAP,all ! Sobrepone los volumens
65 NUMCMP,all ! Renumerar los volúmenes
66
67
68 !Con las siguientes opciones se puede ver con forma de vector los elementos
69
70 ! sirve para saber si se crearon los elementos de interfaz, solo se deben
71
72 ! activar cuando se quiera ver eso luego hay que desactivarlos para ver mejor
    las geometrias
73 !/DEVICE,VECTOR,1
74 !/VIEW,1,1,2,3
75 !/ANG,1
76 !/PNUM,VOLU,1
77 !/PNUM,MAT,1
78 !/REPLO T
79
80 !Como el mallado es mapeado se debe hacer division por lineas
81
82 !Con los siguientes comandos se puede ver el numero de las lineas y las areas
83
84 !https://www.youtube.com/watch?v=uk5jiDwQJig ese es un link de un video
85
86 !Me lo paso el profesor Alexis
87
88 !basicamente explica como mallar de forma mapeada en APDL
89
90
91 LSEL,U,LOC,Z,A1
92 VSEL,S,,2 ! Selecciona el volumen de interes
93 LSEL,S,HPT,1,20 ! el 20 son el total de lineas que hay en el volumen
94 /PNUM,LINE,1 ! Con esto se ve el numero de lineas asi se puede refinar el
    mallado
95 /PNUM,AREA,1 ! Con esto se ve el numero de areas asi se puede
    refinar el mallado
96 L PLOT !plot de linea
97 A PLOT !plot de areas
98 /REPLO T !vuelve a plotear todo
99
100 !Ahora comienza la division de lineas empezando con la fibra
101 VSEL,S,,,1 !Seleccionar volumen 1
102 ASLV,S !Selecciona las areas
103 LSLA,S !selecciona las lineas

```

```

104
105 div=9 !division en el grosor eje Z
106 LESIZE,11,0,0,div
107 LESIZE,5,0,0,div
108 LESIZE,12,0,0,div
109
110 div=20
111 LESIZE,16,0,0,div
112 LESIZE,14,0,0,div
113 LESIZE,15,0,0,div
114 LESIZE,13,0,0,div
115
116 div=20
117 LESIZE,10,0,0,div
118 LESIZE,9,0,0,div
119
120
121
122 ALLSEL,ALL
123
124 ACCAT,1,2 !Junta las dos areas para poder mapearlas importante a la hora de
    mapear
125 VSEL,S,,,2
126 MSHKEY,1 !Mallado mapeado
127 MSHAPE,0,3D !Fuerzo a que la malla sea geometria hexaedrica
128
129 !Divisiones de la matriz segun sus lineas
130 div=8
131 LESIZE,20,0,0,div
132 LESIZE,19,0,0,div
133
134 div=8
135 LESIZE,17,0,0,div
136 LESIZE,18,0,0,div
137
138 div=9 !division en el grosor eje Z
139 LESIZE,8,0,0,div
140 LESIZE,11,0,0,div
141 LESIZE,7,0,0,div
142 LESIZE,12,0,0,div
143 LESIZE,6,0,0,div
144
145 div=20
146 LESIZE,10,0,0,div
147 LESIZE,9,0,0,div
148
149 div=10
150 LESIZE,1,0,0,div
151 LESIZE,4,0,0,div
152
153 div=10
154 LESIZE,2,0,0,div
155 LESIZE,3,0,0,div
156
157 ALLSEL

```

```

158
159 ! En esta parte se asocia el material y los elementos con el volumen
160 TYPE,1
161 MAT,1
162 ! ASSOCIATE MATERIAL #1 WITH VOLUMES 1
163 VMESH,1
164
165 TYPE,2
166 MAT,2 ! ASSOCIATE MATERIAL #2 WITH VOLUME 2.
167 VSWEEP,2
168
169 !Simetria en todos los ejes, esto no es condicion de borde de simetria
170 ALLSEL
171 VSYMM,X,ALL
172 VSYMM,Y,ALL
173 VSYMM,Z,ALL
174 NUMMRG,ALL !Unificamos los nodos coincidentes
175
176 !La siguiente seccion es mi descenso a la locura
177
178 !seccion de mallado de interfaz
179 !Segun un loco de research gate se debe tomar elementos donde esta la
      interfaz y juntarlos como !componentes(ej elemento fibra interfaz se
      asigna como cm1, elemento matriz interfaz se asigna !cm2 y esos se mallan)
180 !Toca buscar como se hace eso
181 !Primera forma se hara por creacion de sistema coordenado cilindrico
182 !Definicion de sistema local sistema local (ID 11, solo es un valor para
      llamar al sistema !coordenado) el ID debe ser mayor a 10 ya que del 1 al
      10 estan definidos, de tipo cilindrico !(1), en el origen (0,0,0)
183 LOCAL,11,1,0,0,0
184 ! Activa el sistema coordenado local 11. Ahora, Ansys piensa en terminos de
      Radio, Angulo y Z.
185 CSYS,11
186 !Seleccionar solo el volumen de la fibra en el centro
187 VSEL,S,VOLU,,1
188 ! selecciona (S) Elementos (E) por su Localizacion (LOC) en la coordenada X (
      que ahora es el Radio)
189 ! Se usa una peque a tolerancia para asegurar la seleccion, aunque la malla
      sea imperfecta.
190 ESEL,R,CENT,X,0,3.5
191 !Con los nodos ya seleccionados se crea un componente con solo esos nodos
192 CM,ELEM_FIBRA,ELEM
193 !Volver siempre al sistema cartesiano global (ID 0)
194 CSYS,0
195 !ALLSEL
196 ! En este punto, solo los nodos del diametro exterior estan seleccionados.
197 ! Graficarlos para confirmar.
198 !CMSEL,S,ELEM_FIBRA
199 !EPLT
200 ALLSEL
201 !Parece que funciono ahora a hacer lo mismo con la resina
202 LOCAL,11,1,0,0,0
203 VSEL,S,VOLU,,2
204 ESEL,R,CENT,X,3.5,10
205 CM,ELEM_MATRIZ,ELEM

```



```

206 CSYS,0
207 ALLSEL
208
209 !Mallar interfaz
210 TYPE,3
211 MAT,3
212 CZMESH,ELEM_FIBRA,ELEM_MATRIZ
213
214 !/DEVICE,VECTOR,1
215 /VIEW,1,1,2,3
216 !/ANG,1
217 !/PNUM,VOLU,1
218 !/PNUM,MAT,1
219 EPLLOT
220
221 !Cambio de color de los elementos, si la interfaz grafica es negro sugiero
222 ! el gris claro en la matriz y el naranjo en la fibra, no afecta en la
223 !visualizacion de resultados pero se ve TUKI
224 /COLOR,CM,RED,CZME_EL01
225 /REPLOTT
226 !*
227 /COLOR,CM,GCYA,ELEM_FIBRA
228 /REPLOTT
229 !*
230 /COLOR,CM,BLUE,ELEM_MATRIZ
231 /REPLOTT
232 !*
233
234 FINISH
235 ! EXIT PRE-PROCESSOR MODULE
236
237 /SOLU
238 ANTYPE,STATIC ! Tipo de analisis: estatico
239 CSYS,0 !Establecemos el sistema de coordenadas cartesianas
240
241
242 !Aca comienza otra locura que son las condiciones de borde periodicas, estas
243 !salen del libro de Barbero lo importante aca es saber donde cambiar las
244 !deformaciones, lo demas es darle play y confiar que converja
245
246 !ARCHIVO CONDICIONES DE CONTORNO
247 !-----
248 ! a1,a2,a3,epsi_Z,epsi_X,epsi_Y,gamma_XY,gamma_YZ,gamma_XZ
249 !-----
250 ! ceRVE,a1,a2,a3,1,0,0,0,0,0 !Primera columna: deformacion unitaria eje de la
    fibra Z
251 ! ceRVE,a1,a2,a3,0,1,0,0,0,0 !Segunda columna: deformacion unitaria eje
    transversal X
252 ! ceRVE,a1,a2,a3,0,0,1,0,0,0 !Tercera columna: deformacion unitaria eje
    transversal Y
253 ! ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0,1,0,0 !Cuarta columna: deformacion unitaria ejes XY
254 ! ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0,0,1,0 !Quinta columna: deformacion unitaria ejes YZ
255 ! ceRVE,a1,a2,a3,0,0,0,0,0,1 !Sexta columna: deformacion unitaria ejes XZ
256
257

```

```

258 !Esto es importante ya que aca hay que ubicar las deformaciones
259 arg1 = a1
260 arg2 = a2
261 arg3 = a3
262 arg4 = -0.00058
263 arg5 = -0.0028
264 arg6 = 0.0115
265 arg7 = 0
266 arg8 = 0
267 arg9 = 0
268
269 ! This macro applies CE to a periodic hexaedral RVE
270 ! The RVE must be centred at (0,0,0) and
271 ! a node must exist at (0,0,0)
272 ! --- Definicion de Parametros de Carga ---
273
274 !+!a1=arg1
275 !+!a2=arg2
276 !+!a3=arg3
277
278 ! APPLIED STRAINS
279 eps11=arg4
280 eps22=arg5
281 eps33=arg6
282 !---Note: must enter epsij=1/2*gamma
283 eps12=arg9/2
284 eps13=arg8/2
285 eps23=arg7/2 ! (x-y in model)
286 !---Note: here recovers the other 1/2*gamma
287 eps21 = eps12
288 eps31 = eps13
289 eps32 = eps23
290 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
291 ! DIR THEORY      ANSYS MODEL
292 !   1           Z
293 !   2           X
294 !   3           Y
295
296 !-----
297 !   CREATE COMPONENT SET: periodic corners, edges and sides
298 !-----
299
300 ! select side +a1 and -a1 -----
301 nsel,s,loc,z,-a1-0.001,-a1+0.001
302 cm,a1n_nodes,node
303 nsel,s,loc,z,a1-0.001,a1+0.001
304 cm,a1p_nodes,node
305
306 ! select side +a2 and -a2 -----
307 nsel,s,loc,x,-a2-0.001,-a2+0.001
308 cm,a2n_nodes,node
309 nsel,s,loc,x,a2-0.001,a2+0.001
310 cm,a2p_nodes,node
311
312 ! select side +a3 and -a3 -----

```

```

313 nsel,s,loc,y,-a3-0.001,-a3+0.001
314 cm,a3n_nodes,node
315 nsel,s,loc,y,a3-0.001,a3+0.001
316 cm,a3p_nodes,node
317
318 ! select edges a1 a2 -----
319 cmsel,s,a1n_nodes
320 cmsel,r,a2n_nodes
321 cm,a1n_a2n_nodes,node
322 cmsel,s,a1n_nodes
323 cmsel,r,a2p_nodes
324 cm,a1n_a2p_nodes,node
325 cmsel,s,a1p_nodes
326 cmsel,r,a2n_nodes
327 cm,a1p_a2n_nodes,node
328 cmsel,s,a1p_nodes
329 cmsel,r,a2p_nodes
330 cm,a1p_a2p_nodes,node
331
332 ! select edges a1 a3 -----
333 cmsel,s,a1n_nodes
334 cmsel,r,a3n_nodes
335 cm,a1n_a3n_nodes,node
336 cmsel,s,a1n_nodes
337 cmsel,r,a3p_nodes
338 cm,a1n_a3p_nodes,node
339 cmsel,s,a1p_nodes
340 cmsel,r,a3n_nodes
341 cm,a1p_a3n_nodes,node
342 cmsel,s,a1p_nodes
343 cmsel,r,a3p_nodes
344 cm,a1p_a3p_nodes,node
345
346 ! select edges a3 a2 -----
347 cmsel,s,a3n_nodes
348 cmsel,r,a2n_nodes
349 cm,a3n_a2n_nodes,node
350 cmsel,s,a3n_nodes
351 cmsel,r,a2p_nodes
352 cm,a3n_a2p_nodes,node
353 cmsel,s,a3p_nodes
354 cmsel,r,a2n_nodes
355 cm,a3p_a2n_nodes,node
356 cmsel,s,a3p_nodes
357 cmsel,r,a2p_nodes
358 cm,a3p_a2p_nodes,node
359
360 cmsel,s,a1n_a2n_nodes
361 cmsel,a,a1n_a2p_nodes
362 cmsel,a,a1p_a2n_nodes
363 cmsel,a,a1p_a2p_nodes
364 cmsel,a,a1n_a3n_nodes
365 cmsel,a,a1n_a3p_nodes
366 cmsel,a,a1p_a3n_nodes
367 cmsel,a,a1p_a3p_nodes

```

```

368 cmsel ,a,a3n_a2n_nodes
369 cmsel ,a,a3n_a2p_nodes
370 cmsel ,a,a3p_a2n_nodes
371 cmsel ,a,a3p_a2p_nodes
372 cm,edges_nodes,node
373
374 ! select corners a1 a2 a3 -----
375 nsel,ALL
376 a1n_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3,-a1)
377 a1n_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3,-a1)
378 a1n_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3,-a1)
379 a1n_a2p_a3p_corner=node( a2, a3,-a1)
380 a1p_a2n_a3n_corner=node(-a2,-a3, a1)
381 a1p_a2p_a3n_corner=node( a2,-a3, a1)
382 a1p_a2n_a3p_corner=node(-a2, a3, a1)
383 a1p_a2p_a3p_corner=node( a2, a3, a1)
384 nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
385 nsel,a,node,,a1n_a2n_a3p_corner
386 nsel,a,node,,a1n_a2p_a3n_corner
387 nsel,a,node,,a1n_a2p_a3p_corner
388 nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner
389 nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
390 nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
391 nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
392 cm,corners_nodes,node
393 ALLSEL,ALL
394
395 NSEL,S,LOC,x,0
396 NSEL,R,LOC,Y,0
397 NSEL,R,LOC,Z,0
398 D,ALL,ALL
399 ALLSEL,ALL
400 CEDELE,ALL
401 ALLSEL,ALL
402 ceeq=0
403
404 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 2-DIR (X-DIR)
405 !
406 pos_node=
407 neg_node=
408 cmsel,s,a2n_nodes
409 cmsel,u,edges_nodes
410 *get,num_nodes,node,0,count,max
411 *do,i,1,num_nodes,1
412 cmsel,s,a2n_nodes
413 cmsel,u,edges_nodes
414 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
415 *if,i,ne,1,then
416 neg_node=ndnext(neg_node)
417 *else
418 *get,neg_node,node,0,num,min
419 *endif
420 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
421 x_=nx(neg_node)
422 y_=ny(neg_node)

```

```

423 z_=nz(neg_node)
424 cmsel,s,a2p_nodes
425 !   get closest node from component neg_a2
426 pos_node=node(-x_,y_,z_)
427 ceeq=ceeq+1
428 ce,ceeq,(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
429 ceeq=ceeq+1
430 ce,ceeq,(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
431 ceeq=ceeq+1
432 ce,ceeq,(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
433 *enddo
434
435 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 3-DIR (Y-DIR)
436 !
437
438 pos_node=
439 neg_node=
440 cmsel,s,a3n_nodes
441 cmsel,u,edges_nodes
442 *get,num_nodes,node,0,count,max
443 *do,i,1,num_nodes,1
444 cmsel,s,a3n_nodes
445 cmsel,u,edges_nodes
446 !   neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
447 *if,i,ne,1,then
448 neg_node=ndnext(neg_node)
449 *else
450 *get,neg_node,node,0,num,min
451 *endif
452 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
453 x_=nx(neg_node)
454 y_=ny(neg_node)
455 z_=nz(neg_node)
456 cmsel,s,a3p_nodes
457 !   get closest node from component neg_a2
458 pos_node=node(x_,-y_,z_)
459 ceeq=ceeq+1
460 ce,ceeq,(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
461 ceeq=ceeq+1
462 ce,ceeq,(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
463 ceeq=ceeq+1
464 ce,ceeq,(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
465 *enddo
466
467 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 1-DIR (Z-DIR)
468 !
469 pos_node=
470 neg_node=
471 cmsel,s,a1n_nodes
472 cmsel,u,edges_nodes
473 *get,num_nodes,node,0,count,max
474 *do,i,1,num_nodes,1
475 cmsel,s,a1n_nodes
476 cmsel,u,edges_nodes
477 !   neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1

```

```

478 *if,i,ne,1,then
479 neg_node=ndnext(neg_node)
480 *else
481 *get,neg_node,node,0,num,min
482 *endif
483 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
484 x_=nx(neg_node)
485 y_=ny(neg_node)
486 z_=nz(neg_node)
487 cmsel,s,a1p_nodes
488 !   get closest node from component neg_a2
489 pos_node=node(x_,y_,z_)
490 ceeq=ceeq+1
491 ce,ceeq,(eps21*(a1*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
492 ceeq=ceeq+1
493 ce,ceeq,(eps31*(a1*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
494 ceeq=ceeq+1
495 ce,ceeq,(eps11*(a1*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
496 *enddo
497
498 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 23-DIR (XY-DIR)
499 !
500 pos_node=
501 neg_node=
502 cmsel,s,a3n_a2n_nodes
503 cmsel,u,cornerRadius_nodes
504 *get,num_nodes,node,0,count,max
505 *do,i,1,num_nodes,1
506 cmsel,s,a3n_a2n_nodes
507 cmsel,u,cornerRadius_nodes
508 !   neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
509 *if,i,ne,1,then
510 neg_node=ndnext(neg_node)
511 *else
512 *get,neg_node,node,0,num,min
513 *endif
514 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
515 x_=nx(neg_node)
516 y_=ny(neg_node)
517 z_=nz(neg_node)
518 cmsel,s,a3p_a2p_nodes
519 !   get closest node from component neg_a2
520 pos_node=node(-x_,-y_,z_)
521 ceeq=ceeq+1
522 ce,ceeq,(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
523 ceeq=ceeq+1
524 ce,ceeq,(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
525 ceeq=ceeq+1
526 ce,ceeq,(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
527 *enddo
528 !
529 pos_node=
530 neg_node=
531 cmsel,s,a3n_a2p_nodes
532 cmsel,u,cornerRadius_nodes

```

```

533 *get,num_nodes,node,0,count,max
534 *do,i,1,num_nodes,1
535 cmsel,s,a3n_a2p_nodes
536 cmsel,u,corners_nodes
537 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
538 *if,i,ne,1,then
539 neg_node=ndnext(neg_node)
540 *else
541 *get,neg_node,node,0,num,min
542 *endif
543 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
544 x_=nx(neg_node)
545 y_=ny(neg_node)
546 z_=nz(neg_node)
547 cmsel,s,a3p_a2n_nodes
548 ! get closest node from component neg_a2
549 pos_node=node(-x_, -y_, z_)
550 ceeq=ceeq+1
551 ce,ceeq,(-eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
552 ceeq=ceeq+1
553 ce,ceeq,(-eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
554 ceeq=ceeq+1
555 ce,ceeq,(-eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
556 *enddo
557
558 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 31-DIR (YZ-DIR)
559 !
560 pos_node=
561 neg_node=
562 cmsel,s,a1n_a3n_nodes
563 cmsel,u,corners_nodes
564 *get,num_nodes,node,0,count,max
565 *do,i,1,num_nodes,1
566 cmsel,s,a1n_a3n_nodes
567 cmsel,u,corners_nodes
568 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
569 *if,i,ne,1,then
570 neg_node=ndnext(neg_node)
571 *else
572 *get,neg_node,node,0,num,min
573 *endif
574 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
575 x_=nx(neg_node)
576 y_=ny(neg_node)
577 z_=nz(neg_node)
578 cmsel,s,a1p_a3p_nodes
579 ! get closest node from component neg_a2
580 pos_node=node(x_, -y_, -z_)
581 ceeq=ceeq+1
582 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
583 ceeq=ceeq+1
584 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
585 ceeq=ceeq+1
586 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
587 *enddo

```

```

588 !
589 pos_node=
590 neg_node=
591 cmsel,s,a1n_a3p_nodes
592 cmsel,u,corners_nodes
593 *get,num_nodes,node,0,count,max
594 *do,i,1,num_nodes,1
595 cmsel,s,a1n_a3p_nodes
596 cmsel,u,corners_nodes
597 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
598 *if,i,ne,1,then
599 neg_node=ndnext(neg_node)
600 *else
601 *get,neg_node,node,0,num,min
602 *endif
603 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
604 x_=nx(neg_node)
605 y_=ny(neg_node)
606 z_=nz(neg_node)
607 cmsel,s,a1p_a3n_nodes
608 ! get closest node from component neg_a2
609 pos_node=node(x_,y_,z_)
610 ceeq=ceeq+1
611 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
612 ceeq=ceeq+1
613 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
614 ceeq=ceeq+1
615 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
616 *enddo
617
618 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION EQNS 12-DIR (YZ-DIR)
619 !
620 pos_node=
621 neg_node=
622 cmsel,s,a1n_a2n_nodes
623 cmsel,u,corners_nodes
624 *get,num_nodes,node,0,count,max
625 *do,i,1,num_nodes,1
626 cmsel,s,a1n_a2n_nodes
627 cmsel,u,corners_nodes
628 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
629 *if,i,ne,1,then
630 neg_node=ndnext(neg_node)
631 *else
632 *get,neg_node,node,0,num,min
633 *endif
634 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
635 x_=nx(neg_node)
636 y_=ny(neg_node)
637 z_=nz(neg_node)
638 cmsel,s,a1p_a2p_nodes
639 ! get closest node from component neg_a2
640 pos_node=node(-x_,y_,z_)
641 ceeq=ceeq+1
642 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2

```



```

643 ceeq=ceeq+1
644 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
645 ceeq=ceeq+1
646 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
647 *enddo
648 !
649 pos_node=
650 neg_node=
651 cmsel,s,a1n_a2p_nodes
652 cmsel,u,cornerRadius_nodes
653 *get,num_nodes,node,0,count,max
654 *do,i,1,num_nodes,1
655 cmsel,s,a1n_a2p_nodes
656 cmsel,u,cornerRadius_nodes
657 ! neg_node is undefined; use lowest active node number when i=1
658 *if,i,ne,1,then
659 neg_node=ndnext(neg_node)
660 *else
661 *get,neg_node,node,0,num,min
662 *endif
663 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
664 x_=nx(neg_node)
665 y_=ny(neg_node)
666 z_=nz(neg_node)
667 cmsel,s,a1p_a2n_nodes
668 ! get closest node from component neg_a2
669 pos_node=node(-x_,y_,z_)
670 ceeq=ceeq+1
671 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,ux,1 ! x->2
672 ceeq=ceeq+1
673 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,uy,1 ! y->3
674 ceeq=ceeq+1
675 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,uz,1 ! z->1
676 *enddo
677
678 ! PERIODIC BOUNDARY CONDITION Corners
679 !
680 nsel,s,node,,a1n_a2n_a3n_corner
681 *get,neg_node,node,0,num,min
682 ! get x,y,z locations of current node in active coord system
683 x_=nx(neg_node)
684 y_=ny(neg_node)
685 z_=nz(neg_node)
686 nsel,a,node,,a1p_a2p_a3p_corner
687 pos_node=node(-x_,y_,z_)
688 ceeq=ceeq+1
689 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,
    ux,1 ! x->2
690 ceeq=ceeq+1
691 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,
    uy,1 ! y->3
692 ceeq=ceeq+1
693 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,
    uz,1 ! z->1
694

```

```

695 nsel,s,node,,a1n_a2n_a3p_corner
696 *get,neg_node,node,0,num,min
697 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
698 x_=nx(neg_node)
699 y_=ny(neg_node)
700 z_=nz(neg_node)
701 nsel,a,node,,a1p_a2p_a3n_corner
702 pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
703 ceeq=ceeq+1
704 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))+(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,
      ux,1    ! x->2
705 ceeq=ceeq+1
706 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))+(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,
      uy,1    ! y->3
707 ceeq=ceeq+1
708 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))+(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,
      uz,1    ! z->1
709
710 nsel,s,node,,a1n_a2p_a3n_corner
711 *get,neg_node,node,0,num,min
712 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
713 x_=nx(neg_node)
714 y_=ny(neg_node)
715 z_=nz(neg_node)
716 nsel,a,node,,a1p_a2n_a3p_corner
717 pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
718 ceeq=ceeq+1
719 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))+(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,
      ux,1    ! x->2
720 ceeq=ceeq+1
721 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))+(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,
      uy,1    ! y->3
722 ceeq=ceeq+1
723 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))+(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,
      uz,1    ! z->1
724
725 nsel,s,node,,a1n_a2p_a3p_corner
726 *get,neg_node,node,0,num,min
727 !   get x,y,z locations of current node in active coord system
728 x_=nx(neg_node)
729 y_=ny(neg_node)
730 z_=nz(neg_node)
731 nsel,a,node,,a1p_a2n_a3n_corner
732 pos_node=node(-x_,-y_,-z_)
733 ceeq=ceeq+1
734 ce,ceeq,(eps21*(a1*2))-(eps22*(a2*2))-(eps23*(a3*2)),neg_node,ux,-1,pos_node,
      ux,1    ! x->2
735 ceeq=ceeq+1
736 ce,ceeq,(eps31*(a1*2))-(eps32*(a2*2))-(eps33*(a3*2)),neg_node,uy,-1,pos_node,
      uy,1    ! y->3
737 ceeq=ceeq+1
738 ce,ceeq,(eps11*(a1*2))-(eps12*(a2*2))-(eps13*(a3*2)),neg_node,uz,-1,pos_node,
      uz,1    ! z->1
739
740 ALLSEL,ALL

```

```

741
742 ! --- Configuracion del Solver No Lineal ---
743 NLGEOM,ON          ! Activa los efectos de grandes deformaciones
744 AUTOTS,ON          ! Activa el paso de tiempo automatico para ayudar a la
      convergencia
745 TIME,1             ! El tiempo final de la simulacion es 1 (representa el
      100\% de la carga)
746 NSUBST,100,1000,50 ! Pasos: Inicial=100, Maximo=1000, Minimo=50
747 OUTRES,ALL,ALL     ! Guarda los resultados de todos los subpasos para el
      post-procesado
748 ! --- Ayudas para la Convergencia ---
749 NROPT,FULL,,ON
750 PRED,ON
751 STABILIZE,CONSTANT,ENERGY,0.01
752 ! --- Resolver el sistema ---
753 SOLVE
754 FINISH
755
756 !Normalmente lo que sigue es post-procesado yo lo hago en la interfaz
757 !primero leyendo los resultados y luego selecciono los elementos que quiero
758 !analizar y saco resultados
759 !Aun asi dejo codigos que me dio APDL
760
761 /POST1 !Post procesador
762 SET,1,LAST,1,      !Leer resultados importante esta opcion
763 ESEL,S,MAT,,1      !Elegir elementos del material 1
764 !*
765 /EFACET,1
766 PLNSOL,S,Y,0,1.0   !Esfuerzo en Y
767 ESEL,S,MAT,,2      !Elige elementos del material 2
768 EPLLOT             !plotea esos elementos
769 !*
770 /EFACET,1
771 PLNSOL,S,Y,0,1.0   !Esfuerzo en Y
772 ESEL,S,MAT,,3      !Elige elementos del material 2
773 EPLLOT             !plotea esos elementos
774 !*
775 /EFACET,1
776 PLNSOL,SS,X,0,1.0 !Esfuerzo normal en interfaz

```

Listing 1 Modelo RVE en APDL