



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Simulación del ensayo 45° Fiber Bundle Test

Ignacio Alejandro Vergara Saavedra

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 Salgado

Julio 2025
Concepción, Chile

©2025 Ignacio Alejandro Vergara Saavedra

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

Agradecimientos

Agradeciendo a toda mi familia, que me ha apoyado durante estos años. Quiero mencionar especialmente a mi madre, a mi padre y a mi hermano. Si bien no suelo expresar mi cariño con palabras, no saben cuánto los quiero. Incluyo, por supuesto, a mis michis y perrunos como parte de mi familia.

También quiero agradecer a mis amigas y amigos de Ingeniería Mecánica, quienes hicieron que esta etapa fuera mucho mejor. Lo único que lamento es no haberlos conocido antes. Asimismo, agradezco a mis amigas y amigos fuera de la carrera, y que algunos los conozco de desde la básica.

Agradezco al Dr. Ing. Alexis Salas por su apoyo durante la memoria y por su paciencia.

Valoro la oportunidad de haber estudiado esta carrera, de haber podido desarrollar esta memoria y emplear los conocimientos que he adquirido a lo largo de los años, y además de adquirir nuevos en el proceso de este trabajo.

También agradezco por el apoyo del FONDECYT de iniciación 11251620 para la realización de la memoria.

Resumen

En este trabajo se desarrolla un modelo de simulación multiescala de una vía para el análisis mecánico de materiales compuestos utilizando el ensayo 45FBT, con énfasis en la caracterización de la interfase entre la fibra y la matriz. El objetivo principal es estimar la resistencia al corte interfacial (IFSS) a partir de una simulación por elementos finitos que integre tanto el comportamiento macroscópico del material como la respuesta microscópica de sus constituyentes. Para ello, se identifican las propiedades relevantes de la fibra y la matriz, y se implementa un modelo de acoplamiento global-local unidireccional, donde las deformaciones obtenidas a nivel macroscópico se aplican a un volumen representativo (RVE) a nivel microscópico, construido en APDL. El RVE incluye la interfase como una tercera fase, lo que permite evaluar su influencia en la distribución de esfuerzos.

Los resultados obtenidos muestran que la distribución de esfuerzos de corte simulada concuerda en forma con los datos experimentales, aunque presenta diferencias de magnitud atribuibles a las idealizaciones geométricas del modelo, como el arreglo hexagonal de fibras en vez de un arreglo aleatorio. Se identificaron las zonas de mayor concentración de esfuerzos en la interfase, coherentes con los modos de falla observados en la literatura. Además, se estimó el IFSS mediante dos enfoques: el valor máximo y el promedio sobre la interfase, obteniendo 35.42 MPa y 25.23 MPa, respectivamente, ambos dentro de los rangos reportados para compuestos con matriz epoxi y refuerzo de fibra de carbono.

Este trabajo demuestra que es posible estimar el IFSS de manera efectiva sin recurrir a sistemas ópticos avanzados, utilizando únicamente propiedades de los constituyentes y parámetros de ensayo al momento del fallo. Finalmente, se identifican posibles líneas de desarrollo futuro, como el uso de modelos cohesivos, acoplamiento bidireccional, y métodos micromecánicos más avanzados como el GMC, con el objetivo de mejorar la precisión del análisis y extender su aplicabilidad.

Abstract

In this work, a one-way multiscale model is developed for the mechanical analysis of composite materials using the 45FBT test, with emphasis on the interphase characterization that is between the fiber and the matrix. The main goal is to measure the interfacial shear strength (IFSS) from a finite element simulation that takes into account both the macroscopic response and the microscopic one between the constituents of the composite. To achieve this, the relevant properties of the fiber and matrix are identified and implemented in a one-way global coupling model, where the strains are obtained at the macroscopic level and then applied to the Representative Volume Element (RVE) at the microscopic level, built in APDL. The RVE takes into account the interphase as a third phase, enabling evaluation of its influence on the stress distribution.

The results obtained show that the simulated shear stress distribution somewhat matches the experimental data, although a difference in magnitude is seen and attributed to the geometric idealization of the model, such as the hexagonal arrangement of fibers instead of a random one. The highest stress concentration in the interphase is identified, consistent with the failure mode reported in the literature. Furthermore, IFSS was estimated in two ways: the maximum value and the average of the elements, obtaining 35.42 MPa and 25.23 MPa respectively, both within the reported range for composites with an epoxy matrix and carbon fiber reinforcement.

This work shows that it is possible to estimate the IFSS effectively without the need for advanced optical systems, using only the constituents' properties and the test parameters. Finally, possible lines of future work are identified, like the use of cohesive zone models, bidirectional coupling, and more advanced micromechanical methods like GMC, with the objective of improving the accuracy of the analysis and broadening its applicability.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	3
Nomenclatura	4
1 Introducción	5
1.1 Contexto	5
1.2 Justificación	6
1.3 Hipótesis	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivos específicos	7
2 Estado del arte y Marco Teórico	8
2.1 Interfaz	8
2.1.1 Caracterización de la interfaz	8
2.2 Ensayos en microescala	9
2.3 Ensayos en mesoescala	10
2.3.1 Ensayo Transverse fibre bundle tensile (TFBT)	10
2.3.2 Ensayo 45° Fiber Bundle Test (45FBT)	11
2.4 Simulaciones 45FBT	12
2.5 Modelo de Mori-Tanaka	13
2.6 Modelo homogenización numérica	14
2.7 Calculo resistencia a la tracción ultima	16
2.8 Propiedades de la interfase	16
2.9 Análisis global-local	16
3 Metodología	18
3.1 Fase 1: Recolección de información y revisión bibliográfica	18
3.1.1 Recolección de información	18
3.1.2 Selección de modelos	18
3.2 Fase 2: Realización del modelo e iteraciones	18
3.2.1 Creación de modelos microscópico y macroscópico	18
3.2.2 Acoplamiento, análisis y validación	18
3.3 Planificación	19
4 Desarrollo de la metodología	20
4.1 Caracterización mecánica de la matriz	20
4.2 Fabricación probetas 45FBT	20
4.2.1 Preparación de moldes y fibras	20
4.2.2 Inyección de resina y curado	21
4.2.3 Maquinado CNC	21
4.2.4 Preparación para análisis por correlación digital de imágenes (DIC)	21
4.3 Ensayo experimental de 45FBT	21
4.4 Selección de software	22
4.5 Modelo probeta	22
4.6 Modelo RVE	24
4.7 Propiedades de los materiales	26

4.8	Tipo de análisis	27
5	Resultados y discusión	29
5.1	Comparación macroescala experimental-simulación	29
5.2	Modo de falla	32
5.3	Distribución de esfuerzos equivalentes matriz y fibra RVE	32
5.4	Distribución de esfuerzos de corte en la interfase y estimación valores IFSS .	34
6	Conclusiones	39
6.1	Conclusiones	39
6.2	Perspectivas	39
Anexo A Códigos en APDL		42
Anexo B Carta Gantt		52

Lista de Figuras

Figura 2.1	Esquema de un material compuesto. a) Las dos fases principales de un material compuesto. b) Zona de la interfaz e interfase.	8
Figura 2.2	Ensayos mecánicos a microescala.a) SFFT b) Single Fiber Pull-out c) Microbond d) Single fiber push-in.	10
Figura 2.3	Ensayos a) TFBT y b) 45FBT.	11
Figura 2.4	Vistas de corte de RVE de 2 fases.	14
Figura 2.5	Empaquetamiento hexagonal de fibras [15].	15
Figura 2.6	Vista de corte del arreglo hexagonal [15].	15
Figura 2.7	Análisis Global-Local con RVE [15].	17
Figura 2.8	Formulación GMC [6].	17
Figura 3.1	Diagrama de la metodología.	19
Figura 4.1	Ensayos muestras de Resina EPO 200/813.	20
Figura 4.2	Probetas con patrón de puntos.	21
Figura 4.3	Condiciones de borde probeta.	22
Figura 4.4	Mallado de la matriz.	23
Figura 4.5	Mallado del compuesto.	24
Figura 4.6	a) Dirección fibra nivel macro, b) Dirección fibra RVE en APDL.	24
Figura 4.7	Dimensiones del RVE.	25
Figura 4.8	RVE en APDL.	25
Figura 4.9	Diagrama ejemplo deformaciones en RVE.	26
Figura 4.10	Asignación de materiales.	27
Figura 4.11	Esquema análisis de una vía.	28
Figura 4.12	Diagrama ilustrativo análisis con acoplamiento de una vía.	28
Figura 5.1	Distribución de deformación de corte XY experimental.	29
Figura 5.2	Distribución de deformación de corte XY simulación.	30
Figura 5.3	Distribución de deformación de corte XY del compuesto.	30
Figura 5.4	Comparación curva fuerza-desplazamiento.	31
Figura 5.5	Espécimen de ensayo 45FBT desmoldado [6].	31
Figura 5.6	Esfuerzo equivalente en el compuesto.	31
Figura 5.7	Factor de seguridad en el compuesto.	32
Figura 5.8	Distribución de esfuerzos equivalentes en las fibras.	33
Figura 5.9	Distribución de esfuerzos equivalentes en la matriz.	33
Figura 5.10	Distribución de esfuerzos de corte τ_{rz}	35

Figura 5.11 Distribución de esfuerzos de corte comparación área τ_{rz}	35
Figura 5.12 Elementos con los mayores esfuerzos de corte τ_{rz}	36
Figura 5.13 Inicio (b), propagación (c), daño completo (d) de la capa de compuesto [6].	36
Figura 5.14 Valores IFSS comparación.	37
Figura 5.15 Valores IFSS comparación con diferentes D_i/r_f	38
Figura 5.16 Valores IFSS comparación con diferente desplazamiento con caso base. . .	38
Figura B.1 Carta Gantt	52

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Dimensiones ASTM D638	11
Tabla 3.1	Carta Gantt simplificada	19
Tabla 4.1	Caracterización mecánica de la resina EPO 200/813.	20
Tabla 4.2	Promedio de IFSS obtenidos en diferentes ensayos.	22
Tabla 4.3	Métricas del mallado promedio	23
Tabla 4.4	Propiedades elásticas de los constituyentes para RVE y Mori-Tanaka de 2 fases	26
Tabla 5.1	Factor de seguridad	32
Tabla 5.2	Resultados esfuerzos de corte τ_{rz}	34
Tabla 5.3	Comparación esfuerzos de corte máximos τ_{rz}	34
Tabla 5.4	Comparación esfuerzos de corte mínimos τ_{rz}	34

Nomenclatura

Acrónimos

45FBT 45° fiber bundle test
ACP Ansys Composite PrePost
APDL Ansys Parametric Design Language
ASTM American Society of Testing Materials
CFRP Polímero reforzado con fibra de carbono
CRF Compuestos reforzados con fibra
GMC Método generalizado de celdas
IFFT Tenacidad interfacial a la fractura
IFSS Resistencia al corte interfacial
ILSS Resistencia al corte intra-laminar
INS Resistencia normal interfacial
PRF Plásticos reforzados con fibra
RVE Elemento representativo de volumen
SEM Escaneo microscópico de electrones
SFFT Single-fibre fragmentation test
SMC Moldeados de plancha
TFBT Transverse fiber bundle tensile

Variables

A Área [m^2]
 D_i Espesor de la interfaz [μm]
 E Modulo elástico [Pa]
 F Fuerza [N]
 G Modulo de corte [Pa]
 L Largo [μm]
 S Tensor de Eshelby
 V Volumen [m^3]
 ϵ Deformaciones normales [-]
 γ Deformaciones de corte [-]
 ν Poisson [-]
 σ Esfuerzo [Pa]
 σ_u Resistencia ultima [Pa]
 σ_o Esfuerzo ultimo promedio [Pa]
 τ Esfuerzo de corte [Pa]
 τ_{rz} Esfuerzos de corte a lo largo de la fibra [Pa]
 ε Deformación [-]
 m Modulo de Weibull
 r_f Radio fibra [μm]
 v Fracción de volumen [-]

1 Introducción

1.1 Contexto

Los materiales compuestos han surgido debido a la necesidad de materiales con mejoras en resistencia, rigidez, densidad y menor costo [1]. Estos consisten en el ensamblaje de dos o más materiales a una macro-escala, obteniéndose así un tercer material, el cual posee ventajas que sus componentes por sí mismos no poseen. Los materiales utilizados se presentan en la fase matriz, que protege, alinea y estabiliza el otro material en forma de fibra o partículas, las cuales son las encargadas de soportar una porción significativa de la carga aplicada [1, 2]. Los materiales compuestos se pueden clasificar a partir de sus constituyentes, en específico, el componente base y el relleno, siendo los tres principales [1]; Partículas reforzadas (PRC), que son utilizadas en caminos y estructuras de concreto, las cuales poseen una resistencia mayor al desgaste pero no a la falla; Moldeados de plancha (SMC), los cuales son fabricados uniendo capas homogéneas de materiales utilizando el proceso de moldeo por compresión para obtener laminados no homogéneos de material compuesto, y se utiliza principalmente para una mayor estabilidad ante el pandeo; Y Compuestos reforzados con fibra (CRF), que son los relacionados con la investigación presente.

Los CRF son extensivamente utilizados en diversas áreas de la ingeniería, tales como, aeroespacial, automotriz, construcción civil y militar, esto debido a su alta resistencia y bajo peso [3, 4]. Las fibras utilizadas pueden ser naturales, sintéticas o híbridas, esta última es la combinación de las dos. Las naturales son más fáciles de obtener, contaminan menos y presentan biodegradabilidad en comparación con los sintéticos. Algunos ejemplos de fibras naturales son; sisal, cáñamo, kenaf, lino, ramio e inclusive plumas de gallina. En cambio las sintéticas son producidas por síntesis química, teniendo resistencias y rigideces considerablemente mayores a la matriz. Los ejemplos de fibras sintéticas son: vidrio, carbono, grafeno, basalto y kevlar [1].

Las matrices también pueden variar las propiedades del compuesto, y en el caso específico de los Plásticos reforzados con fibra (PRF), pueden atribuir con resistencia a las llamas, químicos, a la corrosión, al agua, y entre otras [1]. Las matrices frecuentemente utilizadas en los PRF son polímeros termoplásticos como el polipropileno, poliamido, policarbonato y termoestables como el epoxi [5].

A pesar de todas las ventajas que ofrecen los materiales compuestos y en específico los PRF, la zona entre la matriz y las fibras, conocida como la interfaz matriz-fibra, y que es resultado de interacciones fisicoquímicas de los constituyentes [5], influye en la resistencia al corte, a la resistencia a la compresión, durabilidad, y reacción al ambiente del compuesto [5, 6, 7, 8]. Una adhesión fuerte permite la transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra, mientras que una adhesión débil y de baja calidad tiende a provocar un desprendimiento de las fibras y delaminación, ya que los esfuerzos no pueden ser transferidos de forma efectiva [3].

Las propiedades de la interfase de los PRF se identifican a través de la Resistencia al corte interfacial (IFSS), y en el caso de láminas de PRF, se utiliza la Resistencia al corte intra-laminar (ILSS) [9]. Los ensayos para determinar estas resistencias se diferencian principalmente por la escala de ensayo, las cuales son: nanoescala, microescala (100nm - $2\mu m$), mesoescala (1μ - $100\mu m$) y macroescala (mayor a $100\mu m$) [3, 5].

Los principales ensayos de la microescala son la fractura de fibra singular, pull-out de fibra singular, microadhesión y push-in/-out de fibra. En la macroescala se incluyen los ensayos de corte a en plano 45° , corte de viga corta, fibre bundle pull-out, transverse fibre bundle tensile

(TFBT) y 45° fibre bundle tensile (45FBT) tests [5, 9]. La nano-escala no son relevantes para las típicas fibras en PRF, mientras que los ensayos a macroescala son más idóneos para comparación relativa en vez de mediciones absolutas de propiedades interfaciales [5].

El ensayo relacionado con el estudio es el 45FBT, que consiste en la manufactura de probetas de acuerdo a la norma ASTM D638, donde en el centro se encuentran insertadas un conjunto de fibras en un ángulo de 45°, permitiendo la consideración de distribución de esfuerzos de las fibras, y a diferencia del TFBT, la orientación debería aumentar la sensibilidad a los esfuerzos de corte interfacial, simplificando el análisis comparado con los ensayos de fibras singulares [6].

La ventaja de los ensayos a macroescala es que análisis de fallas han reportado que las fibras se separan en grupos en lugar de forma singular [6]. Por lo tanto, una forma de establecer un análisis diverso en cuanto a escalas, y de fallas, es a través de la utilización de simulaciones a multiescala, ya que, teniendo datos experimentales se podría validar el modelo y analizar lo que sucede a escalas menores a la macro-escala, permitiendo optimizaciones en los diseños, de manufactura y prevención de fallas.

1.2 Justificación

Como se mencionó anteriormente, la ventaja de las simulaciones es la posibilidad de un análisis a multiescala, lo que permite estudiar la distribución de esfuerzos, predecir el fallo y optimizar el diseño de los materiales compuestos. Además, los requisitos de los ensayos de acuerdo a la norma ASTM D638, se debe tener mínimo 5 muestras, las cuales poseen dimensiones precisas y exactas para una interpretación correcta, y procedimientos que toman un tiempo considerable. Lo anterior se traduce en que los tiempos de ensayo más post-procesamiento son considerablemente altos, sin contar que ante una falla o error en el procedimiento significaría rehacer las muestras, comprar materiales y la generación de desechos.

En cuanto a la factibilidad de los ensayos, se ha visto en diversos estudios el uso del software de elementos finitos (FE) ABAQUS para calcular discretizar el nivel estructural macroscópico [6], utilizar modelos de daño continuo, zona cohesiva y fricción de Coulomb [9], simular estados críticos de esfuerzos en un ensayo TFBT y 45FBT [10], creación de un modelo de especímenes de tracción [11]. Un caso destacable es el de una simulación a multiescala, donde se utiliza el programa ABAQUS para el nivel macroscópico y microscópico, utilizando el lenguaje de programación FORTRAN con el fin de implementar el modelo de Método generalizado de celdas (GMC) [8].

Por esas razones se considera factible, y se propone la realización de un modelo a través de elementos finitos, como a modo de ejemplo, en el programa ANSYS, utilizando los componentes presentes en el programa con el fin de lograr un análisis a multiescala, y poder validarlo con datos obtenidos de ensayos experimentales de 45FBT, y en el caso de ser necesario, datos encontrados en la literatura con distintos materiales.

1.3 Hipótesis

Si se obtiene un modelo de elementos finitos a multiescala, se podrá analizar la distribución de esfuerzos y caracterizar los comportamientos mecánicos de un material compuesto, incluyendo la IFSS.

1.4 Objetivos

Simular mediante el método de elementos finitos el ensayo Transverse 45° Bundle Test, evaluando la distribución de esfuerzos y el comportamiento mecánico de materiales compuestos.

1.4.1 Objetivos específicos

- OE1: Identificar modelo optimo de elementos finitos y variables importantes del ensayo 45FBT
- OE2: Crear modelo de elementos finitos de la probeta con los parámetros del ensayo
- OE3: Analizar mediante el modelo la respuesta a esfuerzos de corte y tracción combinada ante las condiciones del ensayo
- OE4: Validar el modelo de elementos finitos con datos experimentales

2 Estado del arte y Marco Teórico

2.1 Interfaz

Un material compuesto está conformado por 2 o más materiales constituyentes con propiedades significativamente distintas, esto con el objetivo de obtener un material con propiedades diferentes y superiores a los de sus constituyentes por separado. En un material compuesto se distinguen dos fases principales, la matriz y la fibra, como se muestra en la Fig. 2.1(a). La matriz es una fase continua cuya función es contener a las fibras, recubrirlas y distribuir el esfuerzo ejercido en el material compuesto hacia ellas. Mientras que, las fibras, son usualmente las que poseen mayor resistencia y rigidez, por lo tanto, son las principales responsables de soportar las cargas en todo el material.

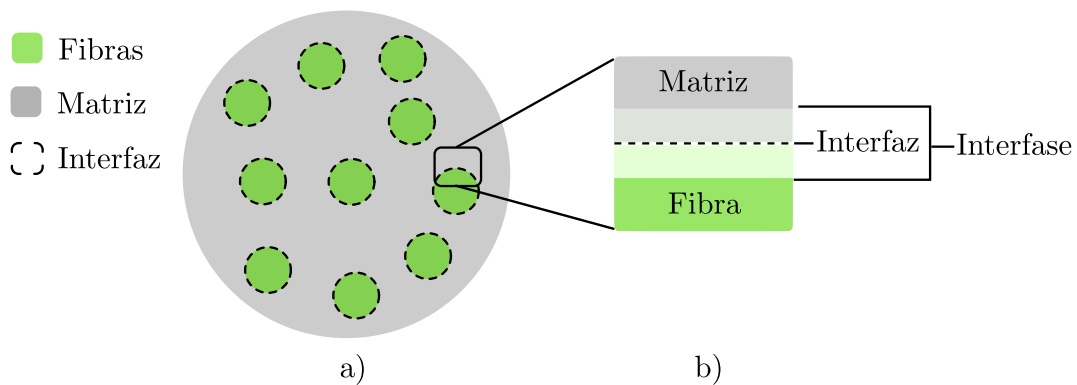


Figura 2.1 Esquema de un material compuesto. a) Las dos fases principales de un material compuesto. b) Zona de la interfaz e interfase.

Adicionalmente, se plantea la existencia de una tercera fase, denominada interfase, que es una región tridimensional generada a través de las interacciones físico-químicas entre los materiales constituyentes, poseyendo propiedades variables de estos [5]. Dentro de esta tercera fase se distingue una región bidimensional llamada interfaz, que se encuentra en los puntos de contacto entre la matriz con la fibra dentro de la interfase, estas zonas son de interés. Las fases descritas se muestran en la Fig. 2.1(b).

La interfaz es importante debido a que no siempre se obtienen los resultados esperados a partir de las propiedades de los constituyentes, y se ha observado que el tratamiento superficial de las fibras mejora la resistencia a la fractura inter e intra laminar, [5]. Asimismo, la calidad de los enlaces también afecta propiedades macroscópicas dependientes de la interfaz. Estas incluyen la resistencia al corte, a la compresión, la tenacidad ante la fractura translaminar, así como la respuesta al ambiente y al impacto [5].

2.1.1 Caracterización de la interfaz

Algunos de los parámetros críticos para caracterizar la interfaz son la IFSS, Tenacidad interfacial a la fractura (IFFT) y el coeficiente de fricción (μ_i) [5]. La propiedad de interés en el presente estudio es la IFSS, ya que representa el esfuerzo requerido para que ocurra la falla interfacial, es decir, cuando se separa la fibra de la matriz, lo que indica la fuerza de la unión entre la matriz y la fibra. En el Polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP), esta propiedad influye en el desempeño de la fibra-matriz, ya que regula la capacidad de transferencia de esfuerzos entre ambas fases. Dicho comportamiento varía según diversos factores.

Se ha observado que existe una correlación entre la IFSS y la temperatura a la que se ha realizado el ensayo. En específico, se encontró que la IFSS disminuye mientras aumenta la temperatura en un análisis mecánico diferencial, de forma paulatina. Sin embargo, al estar a una temperatura cercana a la temperatura de transición vítrea de la resina epoxi, se produce una baja significativa y repentina [12].

La presencia de tratamiento superficial es también un aspecto a considerar, donde la realización de un "Sizing" (mezcla de agua con epoxi en particular), se observa que entre 4 razones de epoxi y agua (sin sizing, 1:10, 1:15 y 1:20), la razón 1:15 fue la que obtuvo el mayor valor de IFSS, aproximadamente 10 MPa superior al sin tratamiento [13].

Además del Sizing, también se estudió la oxidación electroquímica, donde se encontró que al someter fibras de carbono a un baño electroquímico con distintas corrientes se mejora la IFSS en alrededor de 10 MPa [13], por lo cual, los tratamientos superficiales modifican la IFSS de forma significativa.

Otro aspecto importante es la aplicación correcta de resina sobre la fibra, ya que en un estudio de comparación de "tow size" (cuántas fibras se utilizan de forma unidireccional y sin torceduras en una sola hebra) se observó que un tow size alto (de 9 000 a 24 000 fibras) baja considerablemente la IFSS, ya que esto conduce a una baja aplicación de matriz a la fibra, presencia de vacíos, que se traducen en una unión inexistente entre matriz y fibra, donde la falla se atribuye a la ausencia de interfaz más que la debilidad en sí [14].

Por lo tanto, caracterizar la IFSS y que factores influyen en ella resulta fundamental, ya que el análisis debe contemplar estos, y considerarlos. Por ejemplo ante la diferencia entre simulaciones y ensayos experimentales se puede deber a la falta o mala configuración de uno de estos en la simulación y/o la aplicaciones erróneas de ensayos, ya sea en la fabricación o en el procedimiento del ensayo en sí.

Existen dos formas principales de caracterizar las interfases. Primero son los métodos directos o indirectos de observación e incluyen al Escaneo microscópico de electrones (SEM), transmisión microscópica de electrones y espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier. Y la segunda es a través de ensayos mecánicos, los cuales se dividen en la nanoescala, microescala, mesoescala y macroescala, de estos, los de interés son los de microescala y mesoescala, ya que se busca las propiedades de la interfaz y la interacción matriz-fibra respectivamente.

2.2 Ensayos en microescala

El ensayo Single-fibre fragmentation test (SFFT) (Fig. 2.2(a)) es el más común de los ensayos en microescala y consiste en la fabricación de una probeta que contiene una sola fibra de forma longitudinal en el centro, la cual se somete a un ensayo de tracción donde el espécimen se fractura consecutivamente a lo largo de su eje, y el ensayo se realiza hasta que se alcanza el estado de saturación, es decir, no ocurren nuevas fragmentaciones. Una de sus ventajas es que es un método más directo para determinar propiedades interfaciales comparado a los macroscópicos, ya que depende de los largos críticos de la fibra [5], algo que es medible con las herramientas adecuadas. Otra ventaja es que la aplicación de la matriz es directa, por lo tanto, posee una condición ideal de aplicación de la matriz en la fibra [14].

El ensayo Single-fibre pull-out test (Fig. 2.2(b)) consiste en tener una fibra parcialmente insertada en una porción de resina, donde se mide la fuerza requerida para extraer la fibra. La ventaja de este ensayo es que se puede estimar directamente la IFSS y aporta información

respecto a los coeficientes de fricción y presión de encogimiento [5].

El microbond (Fig. 2.2(c)), nacido a partir del ensayo anteriormente mencionado, consiste en la aplicación de una gota de resina en la longitud de la fibra, la cual se remueve con cuchillas de carga que se mueven a una velocidad constante en la dirección longitudinal (alternativamente se puede mover la fibra mientras las cuchillas están inmóviles). La ventaja de este ensayo es que es aplicable a casi todos los sistemas fibras-matriz [5].

El Push-in/-out (Fig. 2.2(d)) consiste en empujar una fibra inserta en una matriz utilizando un indentador, haciendo que ocurra una falla interfacial debido a los altos esfuerzos de corte. Este ensayo permite obtener las propiedades elásticas de los constituyentes, tanto radial como axial, y también puede determinar propiedades interfaciales [5].

El problema de estos ensayos radica en que debido a los tamaños en los que se trabajan se deben seleccionar y medir de forma correcta y precisa, ya que un ligero error puede afectar todo el resultado. También se tiene el problema de la aplicabilidad, ya que se debe considerar ciertos aspectos de superficie de la fibra, el diámetro, y el largo, además de que la selección de una fibra ideal acompleja aún más el ensayo, sobre todo si se realizó de mala forma, aumentando el costo y la variabilidad de resultados entre especímenes.

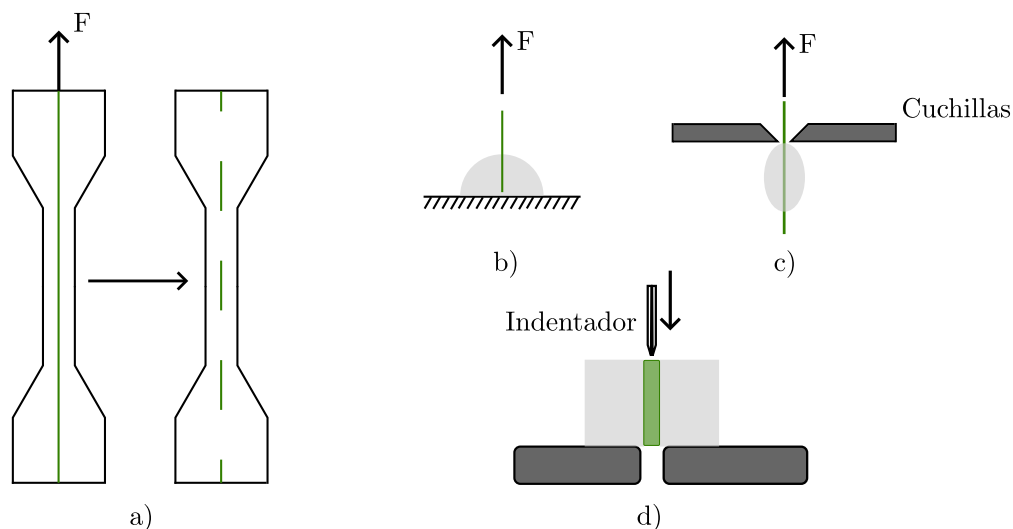


Figura 2.2 Ensayos mecánicos a microescala. a) SFFT b) Single Fiber Pull-out c) Microbond d) Single fiber push-in.

2.3 Ensayos en mesoescala

Debido a que los materiales compuestos fallan en hebras en vez de una sola fibra [6], resulta más útil analizar a una mesoescala, ya que así se considera la interacción entre hebras y la matriz. Dentro de los ensayos que conciernen al estudio, se destacan dos, el Transverse fiber bundle tensile (TFBT) y el 45° fiber bundle test (45FBT).

2.3.1 Ensayo Transverse fibre bundle tensile (TFBT)

El ensayo TFBT consiste en realizar un ensayo de tracción a una probeta compuesta por una matriz que contiene en el centro una hebra de fibras, la cual está orientada de forma transversal a la longitud de la probeta (Fig. 2.3 (a)). Debido a la orientación, la fibra está sometida a esfuerzos de tracción, lo cual permite determinar la Resistencia normal interfacial (INS).

2.3.2 Ensayo 45° Fiber Bundle Test (45FBT)

El ensayo 45FBT es similar al TFBT, solo que las hebras están orientadas a 45° (Fig. 2.3(b)) y la principal ventaja radica en que con este ensayo es posible la determinación del IFSS, en contraste al ensayo TFBT que determina la INS, esto debido a que el 45FBT aumenta la sensibilidad ante los esfuerzos de corte interfacial. Esto facilita el análisis en comparación con los ensayos de fibras singulares [6].

El ensayo se realiza a partir de la norma American Society of Testing Materials (ASTM) D638, que es la norma que engloba los métodos de ensayos estándares para las propiedades de tensión de plásticos (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics). En específico, se utiliza esta norma debido a que el ensayo 45FBT es de tracción, y a que considera a los materiales compuestos reforzados. En específico, los ensayos realizados fueron bajo las dimensiones tipo IV que se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Dimensiones ASTM D638

Dimensión (mmn)	Tipo IV
Espesor (máximo)	4
Ancho de sección angosta	6
Largo de sección angosta	33
Ancho general (mínimo)	19
Largo general (mínimo)	115
Distancia entre agarre	115
Radio del filete	14
Radio externo	25

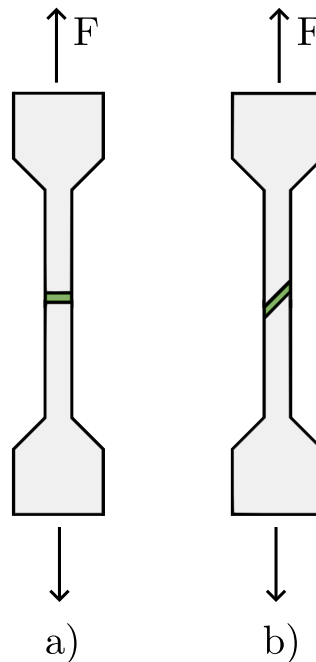


Figura 2.3 Ensayos a) TFBT y b) 45FBT.

2.4 Simulaciones 45FBT

Hasta el momento, se han realizado simulaciones a multiescala de 45FBT, en específico, una simulación de fibra carbono-epoxi [6] y dos simulaciones con fibras de aramida-epoxi (K-49 [8] y FIII [10]). De forma general, las tres simulaciones usan el mismo programa, ABAQUS, para realizar el modelo macroscópico, junto a alguna forma de subrutina dentro del programa, con el fin de modelar tanto el modelo microscópico como en alguno de los casos el modelo de daño o falla. Las medidas específicas en general son ambiguas o no se detallan completamente, no obstante, uno de los papers señala que se utiliza como base la configuración Tipo IV descrita en la norma ASTM D638, la cual se muestra en la Tabla 2.1.

A pesar de no poseer las dimensiones generales utilizadas directamente, establecen que para las simulaciones, utilizan un espesor de 0.3 mm en la zona donde va inserta la hebra para el caso de fibra de carbono, ancho y espesor de la sección de la hebra son respectivamente, 6 mm y 1 mm para la simulación FIII, mientras que las K-49 tienen un espesor entre 0.24 mm a 0.40 mm en los casos experimentales. Por lo visto, estos valores y otros como la razón espesor de la interfaz a radio de la fibra lo asumen a partir de caracterizaciones de otros estudios [6] y no de información directa de sus propios ensayos experimentales.

De los modelos micromecánicos utilizados, han utilizado el GMC, escrito en FORTRAN y acoplado mediante la subrutina definida por el usuario (USDFLD) de ABAQUS para el modelo de elementos finitos. De acuerdo a sus iteraciones, establecieron que un GMC con 100x100 subceldas es lo suficientemente preciso para el análisis micromecánico.

En cuanto a los resultados u objetivos de cada paper es diferente, para el caso del FIII [10] no se calculó la IFSS a partir del modelo, simplemente fue utilizado para modelar y explicar el modo de falla principalmente. En cuanto a los otros dos, se utilizan para calcular la IFSS, ya que en el caso del K-49 [8], se utiliza para calcular el IFSS a partir de datos de esfuerzos experimentales y el mismo IFSS, sin embargo, logra expandir aún más viendo como cambia la resistencia con el cambio de parámetros como la razón de módulos del núcleo con el recubrimiento y el espesor de este. Y finalmente, donde se utilizan fibras de carbono [6], se realizaron los experimentos, de donde se obtuvieron la resistencia a la tracción de las probetas de 45FBT, y con esos datos, hicieron que coincidiera aquellos valores en la simulación y así obtener la IFSS vía esta, y un caso interesante es la del T800S, donde la interfaz se presume que es tan fuerte que no fue posible calcular el IFSS, solamente se podía asumir que la IFSS es mayor a cierto valor.

Con lo anterior, se considera posible realizar una simulación del ensayo 45FBT, y que es necesario tener datos experimentales tanto para calibrar como validar el modelo, ya que si no se tienen los IFSS de los ensayos, se deben estimar vía simulación, y en el caso de tener aquellos datos, proporcionaría una opción de mejora a los materiales compuestos ya que permitirá el cambio de parámetros y como aquello influye en la IFSS, lo cual, es el objetivo de las simulaciones, permitir la iteración de ensayos, materiales y condiciones. Sin embargo, cabe mencionar que las simulaciones a multiescala son complejas, por lo tanto, las simulaciones realizadas en este trabajo podrían no cumplir con los requisitos de un modelo multiescala y es posible que se limiten a modelos de elementos de volúmenes representativos con acoplamiento de una vía, y el modelo acoplado de dos vías se realice en futuras investigaciones.

2.5 Modelo de Mori-Tanaka

El modelo de Mori-Tanaka de dos fases se utiliza para calcular las propiedades elásticas efectivas de un compuesto formado por una matriz y una inclusión. Este enfoque se basa en la matriz de rigidez efectiva $[C]$, presentada en la Ec. 1 para un comportamiento transversalmente isotrópico [15], la cual se determina a partir del tensor de Eshelby $[S]$; la matriz de rigidez proviene de la ley de Hooke ($[\sigma] = [C][\varepsilon]$). En el caso de una matriz isotrópica con una inclusión cilíndrica, como la mostrada en la Fig. 2.4, correspondiente al presente estudio, el tensor $[S]$ se expresa mediante la Ec. 2 [16], asumiendo un comportamiento transversalmente isotrópico.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \quad (2)$$

con

$$\begin{aligned} S_{1111} = 0, S_{2222} = S_{3333} &= \frac{5 - 4\nu^m}{8(1 - \nu^m)}, S_{2211} = S_{3311} = \frac{\nu^m}{2(1 - \nu^m)}, \\ S_{2233} = S_{3322} &= \frac{4\nu^m - 1}{8(1 - \nu^m)}, S_{1122} = S_{1133} = 0, S_{1313} = S_{1212} = 1/4 \\ S_{2323} &= \frac{3 - 4\nu^m}{8(1 - \nu^m)} \end{aligned}$$

Obteniéndose estos valores, se puede asociar a la matriz de rigidez efectiva a través de las Ec. 3-5:

$$[C] = [C^m] + v_f([C^f] - [C^m])[A_1] \quad (3)$$

con

$$[A_1] = \langle [A] \rangle [v_m[I] + v_f[\tilde{A}_1]]^{-1} \quad (4)$$

$$\langle [A] \rangle = [[I] + [S](C^m)^{-1}([C^f] - [C^m])]^{-1} \quad (5)$$

Donde, $[C_i]$, ν^i y v_i son la matriz de rigidez, coeficiente de Poisson y fracción de volumen de la matriz o fibra dependiendo del índice.

Las propiedades mecánicas resultantes para un compuesto transversalmente isotrópico se relacionan a través de la matriz de rigidez como se señala en el conjunto de Ec. 6 [15]:

$$\begin{aligned}
E_1 &= C_{11} - 2C_{12}^2/(C_{22} + C_{23}) \\
E_2 &= E_3 = [C_{11}(C_{22} + C_{23}) - 2C_{12}^2](C_{22} - C_{23})/(C_{11}C_{22} - C_{12}^2) \\
v_{12} &= v_{13} = C_{12}/(C_{22} + C_{23}) \\
v_{23} &= [C_{11}C_{23} - C_{12}^2]/(C_{11}C_{22} - C_{12}^2) \\
G_{12} &= G_{13} = C_{66} \\
G_{23} &= \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23})
\end{aligned} \tag{6}$$

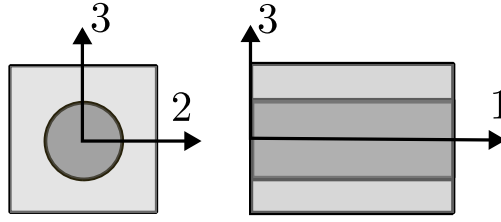


Figura 2.4 Vistas de corte de RVE de 2 fases.

La idea de calcular las propiedades elásticas efectivas a través de Mori-Tanaka, es tener una referencia para la homogenización numérica, a la cual se le puede incluir una interfase. Y si bien existe Mori-Tanaka de tres fases, se opta por el de dos fases debido a su simplicidad y porque su propósito es únicamente servir como base de comparación.

2.6 Modelo homogenización numérica

Además de servir como referencia, el modelo de Mori-Tanaka presenta suposiciones simplificadas sobre la geometría del refuerzo. Por ello, se emplea también un método de homogenización numérica basado en un empaquetamiento hexagonal para el cálculo de las propiedades elásticas efectivas a utilizar en la simulación macroscópica. Este enfoque se implementa a partir de un código de APDL disponible en la literatura [15], el cual utiliza un Elemento representativo de volumen (RVE) con disposición hexagonal, como se muestra en la Fig. 2.5, mientras que las medidas se muestran en la Fig. 2.6.

Los componentes de la matriz de rigidez se obtienen a partir de los esfuerzos principales y de cortes (σ_i y σ_{ij} respectivamente) promedios en el RVE y su volumen total V , aplicando condiciones de borde específicas para calcular cada componente. Las expresiones correspondientes a estos componentes se presentan en las Ec. 8–12, derivadas de la Ec. 7 que contienen los promedios de esfuerzos $\bar{\sigma}$, componentes de la matriz de rigidez y componentes de la deformación ε .

$$\bar{\sigma}_\alpha = C_{\alpha\beta} \bar{\varepsilon}_\beta \tag{7}$$

$$C_{\alpha\beta} = \bar{\sigma}_\alpha = \frac{1}{V} \int_V \sigma_\alpha(x_1, x_2, x_3) dV \tag{8}$$

con $\alpha, \beta = 1 \dots 6$.

$$C_{\alpha 1} = \bar{\sigma}_\alpha = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{\alpha 2}(x_1, x_2, x_3) dV \tag{9}$$

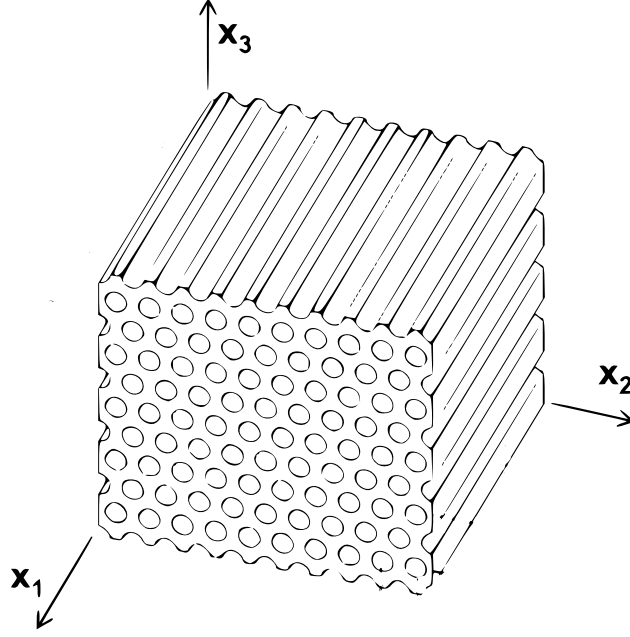


Figura 2.5 Empaquetamiento hexagonal de fibras [15].

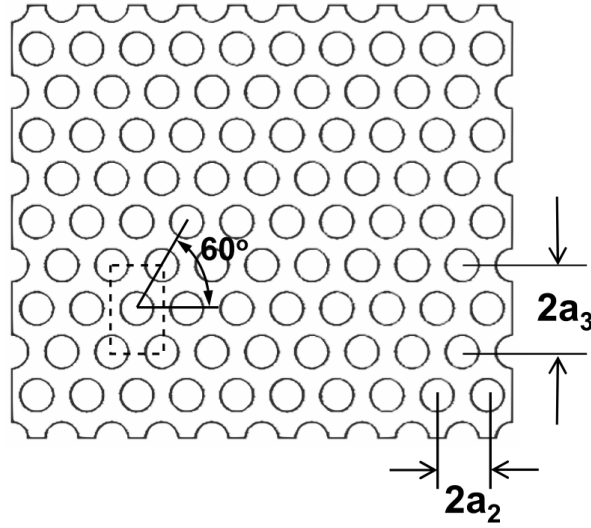


Figura 2.6 Vista de corte del arreglo hexagonal [15].

con $\alpha = 1, 2, 3$

$$C_{44} = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \quad (10)$$

$$C_{66} = \bar{\sigma}_6 = \frac{1}{V} \int_V \sigma_6(x_1, x_2, x_3) dV \quad (11)$$

$$C_{55} = C_{66} \quad (12)$$

2.7 Cálculo resistencia a la tracción última

El esfuerzo último de tracción puede calcularse con el modelo de Curtin [17], el que utiliza el radio de la fibra r_f , volumen de la fibra f , módulo de Weibull m , esfuerzo último promedio σ_o , largo de la fibra L_0 y la resistencia al deslizamiento por fricción τ , a través de las Ec. 13 y 14.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_o^m \tau L_0^{1/(m+1)}}{r_f} \quad (13)$$

$$\sigma_u = f \sigma_c \left(\frac{2}{m+2} \right)^{1/(m+1)} \frac{m+1}{m+2} \quad (14)$$

Este permite la estimación de resistencia del compuesto σ_u en la simulación 45FBT para evitar realizar un análisis sobre una falla de ruptura de uno de los constituyentes y no de la interfaz.

2.8 Propiedades de la interfase

El módulo elástico promedio de la interfase puede calcularse a través de la Ec. 15 que se basa en la ley de variación de potencia [8], utilizado para calcular el módulo elástico de la interfase en fibras de carbono con matriz epoxi. En cuanto al coeficiente de Poisson, se utilizan los promedios del coeficiente de la matriz y fibra de carbono.

$$\overline{E_i} = \frac{r_f}{(1+B)D_i} \left[\left(1 + \frac{D_i}{r_f} \right)^{1+B} - 1 \right] E_f \quad (15)$$

$$\text{con } B = \frac{\ln(E_m/E_f)}{\ln(1+D_i/r_f)}.$$

La ecuación depende del radio de la fibra r_f , el espesor de la interfase D_i , y los módulos elásticos de la fibra E_m y la matriz E_f . También, se le llamará a la razón D_i/r_f , la razón interfase-fibra.

2.9 Análisis global-local

El análisis de la IFSS se realiza mediante el enfoque global-local [15], el cual permite reducir los problemas de convergencia y el costo computacional. Primero se resuelve el problema a nivel global, considerando al compuesto como un material homogéneo. Luego, las deformaciones obtenidas en el análisis se transfieren a un modelo representativo más detallado, que permite analizar localmente la respuesta de la fibra, la matriz y la interfase. La Fig. 2.7 muestra en un diagrama el concepto de análisis global-local.

De esta manera, es posible aplicar las deformaciones del modelo macroscópico a un RVE, por ejemplo, implementado en Ansys Parametric Design Language (APDL), permitiendo analizar con mayor detalle regiones de interés. En este trabajo, se emplea un acoplamiento de una sola vía, es decir, sin retroalimentación del modelo micro al macro.

La motivación para emplear este enfoque surge del estudio de Guocheng [6], quien utiliza el GMC. Este método consiste en dividir un RVE en una malla de celdas (en su estudio, de 100×100 celdas, como se ilustra en la Fig. 2.8) e iterar entre las soluciones macroscópica y microscópica hasta alcanzar la convergencia. Aunque este procedimiento es más preciso, implica un costo computacional significativamente mayor en comparación con el propuesto.

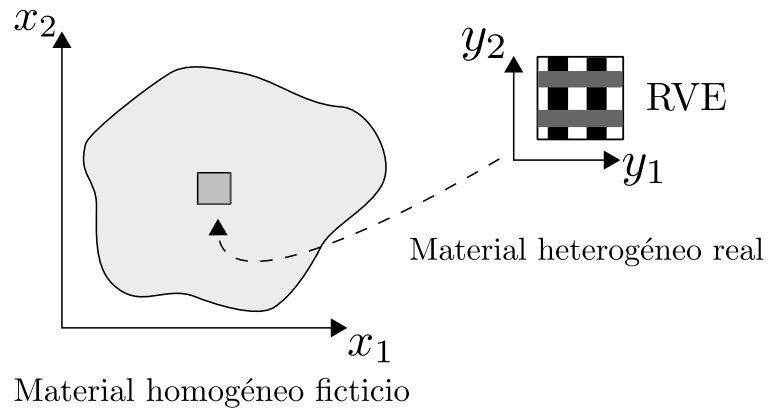


Figura 2.7 Análisis Global-Local con RVE [15].

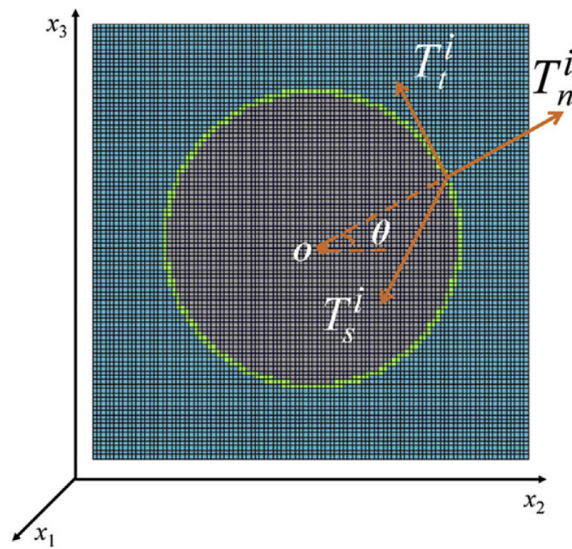


Figura 2.8 Formulación GMC [6].

3 Metodología

3.1 Fase 1: Recolección de información y revisión bibliográfica

3.1.1 Recolección de información

Como primer paso, será buscar todo lo relacionado con el ensayo 45FBT, principalmente las medidas y condiciones de ensayo. Además, se requerirá de los datos experimentales y los materiales utilizados para los ensayos.

3.1.2 Selección de modelos

Una vez realizado lo anterior se deberá identificar los componentes y módulos disponibles como forma de ejemplo, en ANSYS se encuentran el Mechanical, APDL, Ansys Composite PrePost (ACP), entre otros. La idea es que se pueda implementar el modelo microscópico al macroscópico a través de los módulos, de forma similar al ABAQUS visto en la introducción. Una vez encontrado los componentes y módulos candidatos, se deberá realizar búsqueda de sus capacidades y limitaciones, el que cumpla lo deseado será el seleccionado.

Esta fase en particular ayuda al objetivo específico 1.

3.2 Fase 2: Realización del modelo e iteraciones

3.2.1 Creación de modelos microscópico y macroscópico

Teniendo el plan de como entrelazar los componentes juntos dentro de ANSYS para obtener un modelo multiescala, se debe proceder a realizar un modelo para el análisis macroscópico (Como por ejemplo en Mechanical o Inventor). También se deberán importar los atributos de los materiales al software en caso de no estar presentes de forma predeterminada, y las condiciones del ensayo. En el caso de la microescala, se deberá utilizar el modelo seleccionado en la fase 1, esto podría ser en forma de código o módulo del programa seleccionado.

Estas actividades están diseñadas para contribuir al objetivo específico 2.

3.2.2 Acoplamiento, análisis y validación

Con el modelo macroscópico y microscópico realizados, se deberá realizar el método de acople seleccionado en la fase 1. Esto daría como resultado el modelo de simulación del ensayo de 45FBT. Estando listo el modelo, se realizará un análisis de la distribución de esfuerzos y propiedades mecánicas, lo cual se compararan con los resultados experimentales. En el caso de ser iguales o similares, se podría considerar que esta validado, mientras que si no son iguales se debe modificar parámetros dentro del programa como los métodos de solución hasta que el modelo pueda ser validado.

Cabe destacar que en el caso de coincidir o no coincidir, se debe dudar de la validez de los resultados experimentales, ya que estos también pueden ser erróneos, y sea este el caso, se deberá validar de otra forma, ya sea con resultados en la literatura y/o con la realización de nuevos ensayos experimentales 45FBT, lo que requeriría la fabricación de nuevas probetas.

Las actividades de estas ultimas dos secciones apuntan a los objetivos específicos 3 y 4.

Se muestra un diagrama de flujo de lo explicado previamente en la Fig. 3.1.

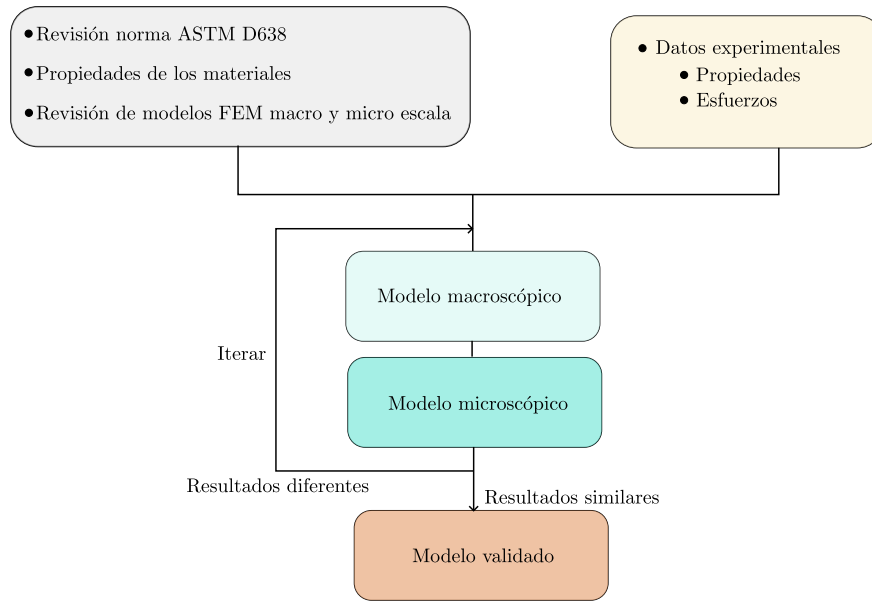


Figura 3.1 Diagrama de la metodología.

3.3 Planificación

La planificación se muestra la carta Gantt en la Tabla 3.1 de forma simplificada. Mientras que la carta Gantt completa se encuentra en el Anexo en la Fig. B.1

Tabla 3.1 Carta Gantt simplificada

Actividades		Semanas																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Fase 1																				
1	Revisión bibliográfica relacionada al ensayo 45FBT																			
2	Búsqueda de componentes y/o módulos																			
3	Revisión bibliográfica de modelos microscópicos																			
Fase 2																				
1	Creación modelo FEM																			
2	Creación modelo microscópico																			
3	Acople modelos																			
4	Análisis y comparación con resultados experimentales																			
5	Validación de modelo multiescala																			

4 Desarrollo de la metodología

4.1 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 con medidas tipo IV. Se realizó el ensayo con 9 muestras, y las propiedades obtenidas se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Caracterización mecánica de la resina EPO 200/813.

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

Adicionalmente, la Fig. 4.1 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.

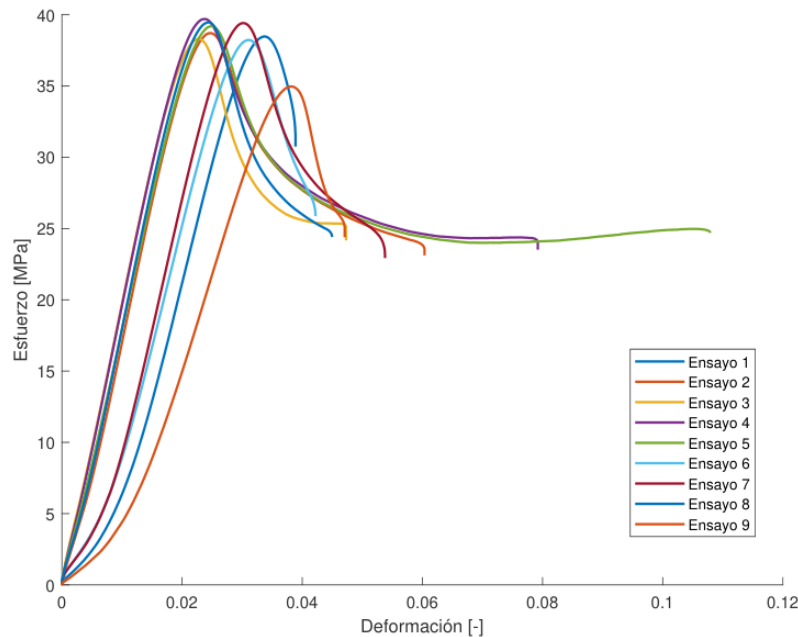


Figura 4.1 Ensayos muestras de Resina EPO 200/813.

4.2 Fabricación probetas 45FBT

4.2.1 Preparación de moldes y fibras

Los moldes fueron limpiados con jabón y aire comprimido, y posteriormente recubiertos con cera desmoldante para evitar la adhesión de la resina. Las hebras de refuerzo se dispusieron de manera escalonada y alineada mediante un arco de tensión, diseñado para cada molde.

4.2.2 Inyección de resina y curado

Se preparó la resina epoxi EPO200 con endurecedor 813 en proporción 2:1. La mezcla fue sometida a ultrasonido durante 10 minutos a 19°C para eliminar burbujas de aire. Posteriormente, se vertió en los moldes y se dejó curar por 72 horas a temperatura ambiente, seguido de un post-curado en horno a 70°C durante 16 horas.

4.2.3 Maquinado CNC

Una vez curadas, las probetas fueron mecanizadas para cumplir con las dimensiones establecidas por normativa. Se utilizó un Router CNC controlado mediante G-code generado en Inventor CAM, con una velocidad de corte de 1200rpm.

4.2.4 Preparación para análisis por correlación digital de imágenes (DIC)

Finalmente, las probetas destinadas a ensayos con sistema ARAMIS fueron recubiertas con pintura blanca y un patrón aleatorio de puntos negros como se muestra en la Fig. 4.2. Este tratamiento permite el seguimiento preciso de las deformaciones mediante DIC, garantizando datos fiables para el análisis tridimensional.

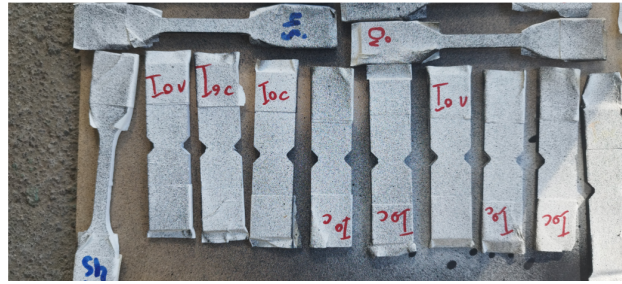


Figura 4.2 Probetas con patrón de puntos.

4.3 Ensayo experimental de 45FBT

Se ensayaron 10 probetas sometidas a tracción bajo la norma ASTM D638 en una máquina de ensayo universal Zwick Roell Proline Z05, usando las mordazas para ensayos de tracción y, utilizando el sistema de correlación de imágenes digitales (DIC) Aramis, esto con el fin de obtener el IFSS, y desplazamiento al cual las probetas fallan, este ultimo se encuentra entre 2.75 a 3 mm, considerando solamente las probetas que fallaron en la zona del compuesto. Para el IFSS, se realizaron 2 tipos de análisis, uno que es capturar la fuerza dividida por el área del compuesto, mientras que el otro tipo de análisis es utilizando el criterio de falla de Yamada-Sun [18], mostrada en la Ec. 16, donde σ_{11} es el esfuerzo de tracción o compresión, y τ_{12} es el esfuerzo de corte y los que tienen subíndice p son los permisibles.

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_p}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_p}\right)^2 = 1 \quad (16)$$

Además se poseen datos de IFSS de otros ensayos, a partir de un trabajo previo, los promedios se resumen en la Tabla 4.2, los cuales permiten tener una idea de magnitud al que se debe llegar con las simulaciones.

Se puede observar que el valor de IFSS utilizando la fuerza dividida por el área es mayor a los demás, lo cual podría deberse a que de una forma más completa la interacción fibra/matriz bajo cargas combinadas, reflejando una mayor contribución de las fibras a la resistencia

Tabla 4.2 Promedio de IFSS obtenidos en diferentes ensayos.

Iosipescu [MPa]	SFFT [MPa]	45FBT F/A [MPa]	45FBT Yamada [MPa]
23.37	21.18	38.70	25.34

interfacial. Utilizando la Ec. 16, el IFSS se acerca más a los valores de ensayos microscópicos, lo cual puede ser más representativo que F/A .

4.4 Selección de software

El software principal a utilizar es ANSYS, ya que se posee conocimiento previo de este programa. Para la realización del modelo macroscópico se utilizó Ansys Static Structural, ya que no hay una respuesta que dependa del tiempo o largas deformaciones que impliquen torsión o flexión significativos. Mientras que para el análisis microscópico se implementó Mechanical APDL, debido a que permite realizar iteraciones de distintos elementos y es programable.

4.5 Modelo probeta

Para las dimensiones de la probeta se utilizaron las medidas Tipo IV de la norma ASTM D638 como se indican en la Tabla 2.1. En la Fig. 4.3 y 4.4, donde se puede apreciar un corte en el centro de la probeta, se encuentra un volumen a 45° del eje X, representando el volumen del compuesto, donde se considero un espesor arbitrario de 0.3 mm para las hebras, dado que es el mismo valor utilizado para simulaciones de CFRP [6].

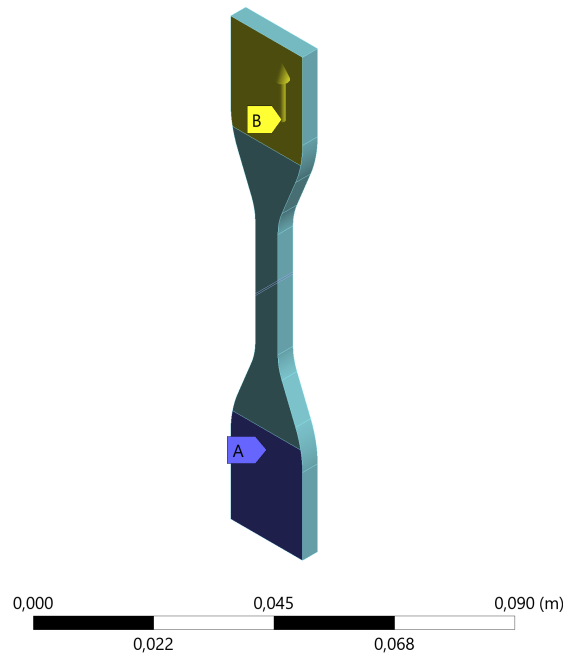


Figura 4.3 Condiciones de borde probeta.

Para representar el ensayo, se sometió a la probeta a desplazamientos de acuerdo a como lo hacen las mordazas en ensayos experimentales, las inferiores fijas verticalmente, mientras que las superiores son las que se desplazan hasta los 3 mm . El desplazamiento es seleccionado

debido a que es el valor máximo a las que fallaron las probetas en la zona del compuesto (entre 2.5 y 3mm), siendo una forma de criterio de falla para el modelo.

El mallado de la probeta en la matriz es la predeterminada de Static Structural, ya que no es la de interés, y se necesita el comportamiento a gran escala simplemente. En cambio, el volumen del compuesto es más fina en comparación a la matriz, ya que la sensibilidad y representación de las deformaciones son importantes para la representación en el RVE. Ambos mallados se muestran en las Fig. 4.4 y 4.5 respectivamente.

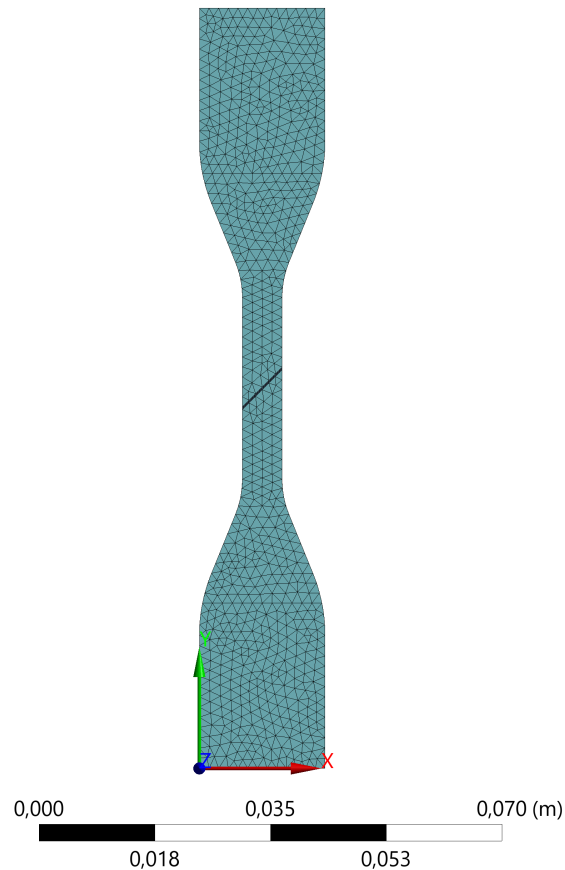


Figura 4.4 Mallado de la matriz.

Las métricas del mallado promedio para cada material se encuentran en la Tabla 4.3, donde la calidad de elemento se encuentra en valores superior a 0.05, lo que es aceptable para el solucionador de Ansys, así que las calidades son buenas comparando con el mínimo. En cuanto a la razón de aspecto, se estima que bajo un valor de 5 es óptimo, por lo tanto, se encuentra en un valor ideal. Y el skewness debe ser de 0 a 0.75, lo que se cumple. Estos promedios son de 4374 y 12012 elementos de la mezcla y matriz respectivamente.

Tabla 4.3 Métricas del mallado promedio

Métrica	Compuesto	Matriz
Calidad de elemento	0.70307	0.80627
Razón de aspecto	1.5714	1.9491
Skewness	0.5	0.27971

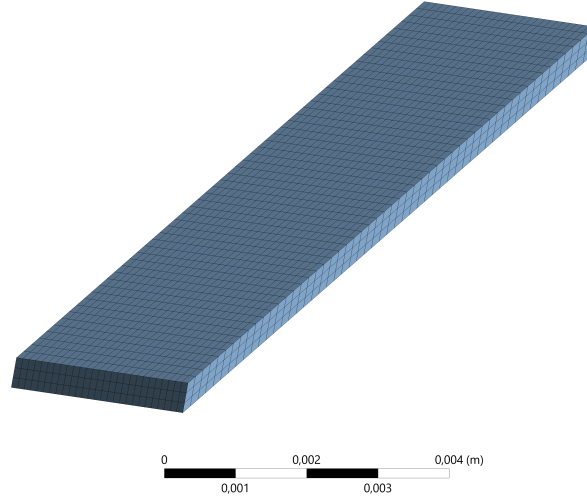


Figura 4.5 Mallado del compuesto.

Debido a la simetría del problema, se analizan las deformaciones normales y de corte en 1/4 del compuesto, las cuales se ingresarán al programa APDL para realizar el análisis de esfuerzos. A partir de estos resultados, se estimará el IFSS utilizando dos enfoques: el valor máximo del esfuerzo de corte entre todos los elementos y el valor promedio, con el fin de compararlos con los datos obtenidos experimentalmente mediante probetas y el ensayo SFFT.

Aparte del sistema cartesiano predeterminado, se crean 2 nuevos sistemas de coordenadas, la primera, mostrada en la Fig. 4.6(a), se utiliza para definir la dirección longitudinal y transversal de la fibra. La segunda es con el fin de exportar los datos de deformación en el sistema cartesiano del programa APDL donde se encuentra el RVE, este sistema de coordenadas se muestra en la Fig. 4.6(b).

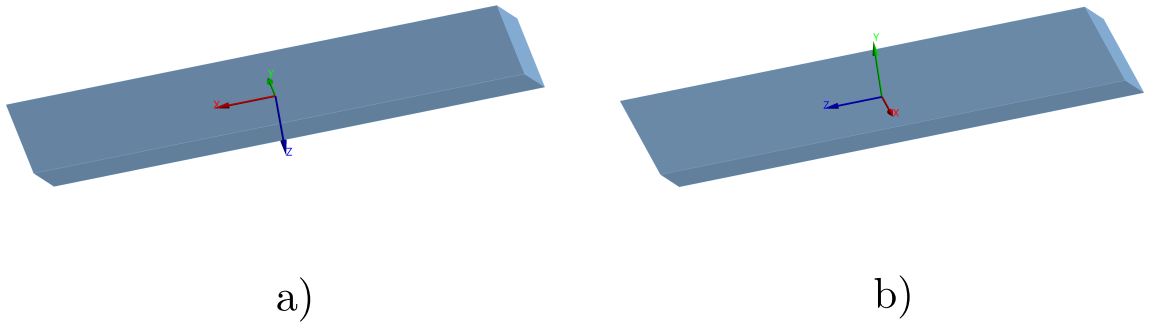


Figura 4.6 a) Dirección fibra nivel macro, b) Dirección fibra RVE en APDL.

4.6 Modelo RVE

Con el objetivo de capturar la respuesta microscópica, se implementa un modelo RVE con empaquetamiento hexagonal, utilizando un diámetro de fibra de $7\mu\text{m}$ y una fracción volumétrica de fibra del 50%. A partir de estos parámetros, se obtienen las dimensiones mostradas en la Fig. 4.7.

Además, se incorpora una interfase con una razón D_i/r_f de 0.04, valor reportado en simulaciones de CFRP [6], lo que resulta en un espesor de interfase de $0.14\mu\text{m}$.

El RVE resultante es mostrado en la Fig 4.8, donde los elementos son SOLID185 cuando se quiere buscar el promedio de los esfuerzos con una precisión menor, sin embargo, se utilizan elementos de SOLID186 que poseen una mayor cantidad de nodos, lo que significa una precisión mayor en comparación al SOLID185, el cual se utilizará en los valores altos en comparación al promedio, con el fin de extraer un IFSS más preciso a partir del elemento con mayor esfuerzo de corte.

La razón por la cual se utiliza el SOLID186 de forma exclusiva para elementos críticos es debido a que posee un alto costo computacional y debido a la cantidad de elementos, no es ideal la utilización de este para grandes cantidades.

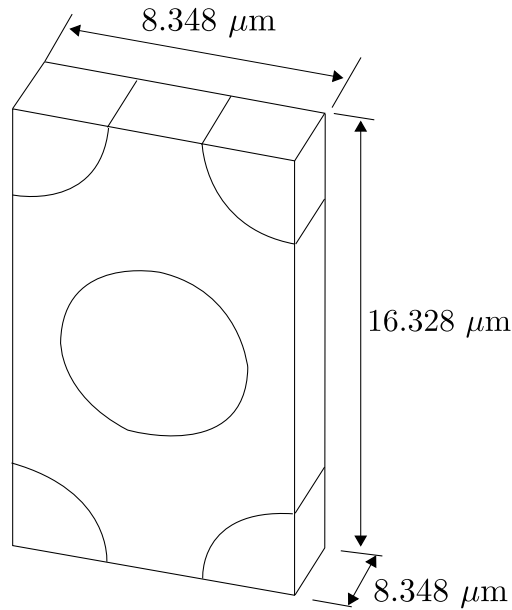


Figura 4.7 Dimensiones del RVE.

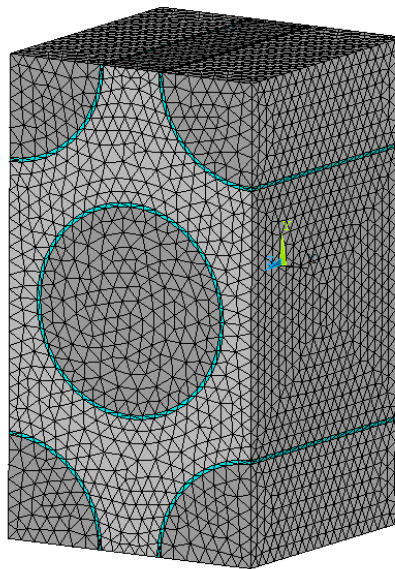


Figura 4.8 RVE en APDL.

Luego de realizar el ensayo a macroescala, se obtienen las deformaciones como se menciono previamente, con el fin de someter al RVE a estas en forma de condiciones de borde. La Fig. 4.9 muestra un diagrama de ejemplo del RVE bajo deformación en el eje X a las

caras laterales debido a las deformaciones normales ϵ y de corte γ , esto se repite para cada componente normal y de corte (x, y, z, xy, yz, xz) .

En el caso del RVE, se consiguió la información de posición de cada nodo y se sometió a las deformaciones totales dependiente de su altura y posición, lo que permitió replicar el estado de deformación derivado del análisis macroscópico.

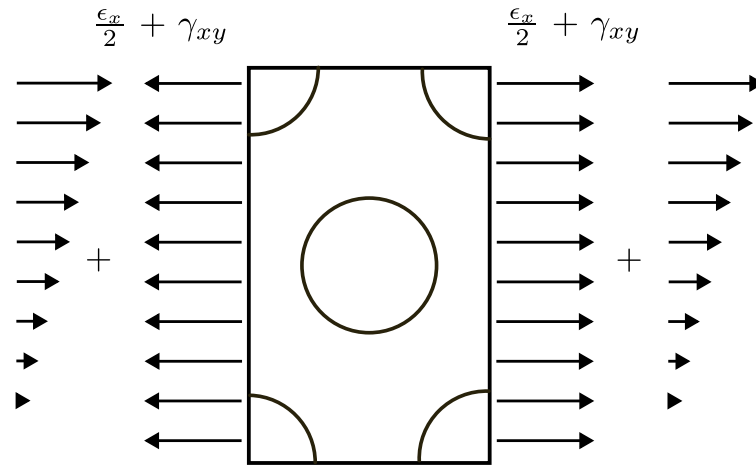


Figura 4.9 Diagrama ejemplo deformaciones en RVE.

4.7 Propiedades de los materiales

Se considera la fibra y resina como una fibra unidireccional (Dirección de la fibra es 1) con orden hexagonal, y con una fracción de volumen de fibra del 50% y un diámetro de fibra de $7 \mu m$. Las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 4.4, las cuales para la matriz y fibra, provienen de catalogo y de valores usuales, mientras que el elemento homogenizado (MT2 y HN) se calculan a partir de la matriz y fibra. En cuanto al modulo elástico y coeficiente de Poisson de la interfase se calculan utilizando las propiedades elásticas transversales de la matriz y fibra.

Tabla 4.4 Propiedades elásticas de los constituyentes para RVE y Mori-Tanaka de 2 fases

Elemento	E_1 [GPa]	$E_{2=3}$ [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{13}$ [-]	ν_{23} [-]	$G_{12} = G_{13}$ [GPa]	G_{23} [GPa]
Matriz	1.17826	1.17826	0.35	0.35	0.43639	0.43639
Fibra	240	24	0.22	0.44	9	8.2143
Interfaz	7.5	7.5	0.395	0.395	2.686	2.686
MT2	120.59	3.3732	0.2766	0.4855	1.2938	1.1354
HN (RVE)	120.86	3.9048	0.27825	0.45157	1.4218	1.3406

Las diferencias entre el RVE y Mori-Tanaka de 2 fases son máximo de alrededor del 15% y mínimo 0.2%, lo cual indica que la implementación del RVE es correcta, considerando que Mori-Tanka de 2 fases no posee interfase. Y si bien existe un modulo de homogenización numérica en Ansys, llamado Material Designer, se opta por el RVE debido a que se puede implementar la interfase, lo cual puede modificar las propiedades elásticas y es más fiel a la realidad.

Teniendo todas las propiedades, se asoció a cada parte de la probeta su respectivo material, en la Fig. 4.10(a) se aplican a las dos secciones de la probeta el material de la resina caracterizada, mientras que en la Fig. 4.10(b) el del material compuesto calculado a través del

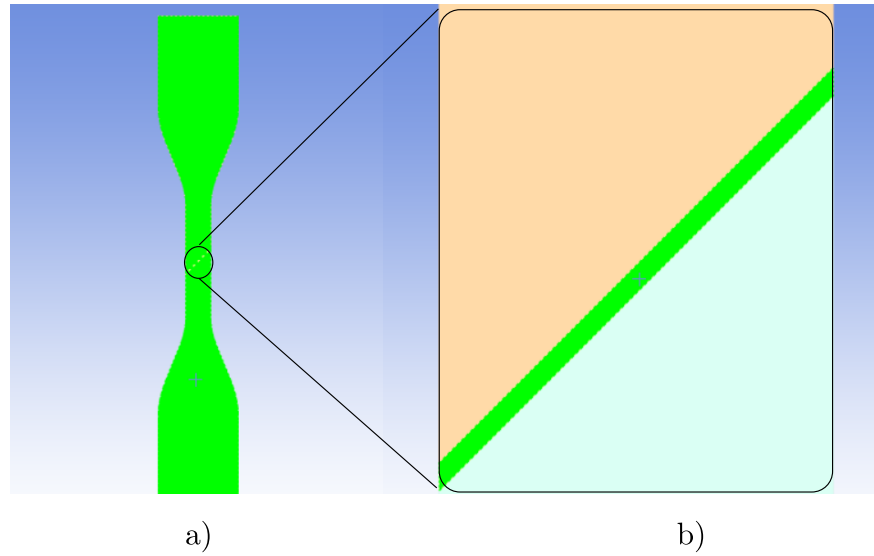


Figura 4.10 Asignación de materiales.

RVE. En cuanto al RVE, se le insertaron los datos de cada constituyente en los volúmenes correspondientes como se muestra en la Fig. 4.8, donde la matriz, fibra e interfase son representados por el color gris claro, oscuro y celeste respectivamente.

Además se introdujo un esfuerzo ultimo de tracción representativo, para lo cual al no tener lo suficientes datos, se utilizó un valor a desventaja del material, el $\tau = 0.5$ MPa, mientras que los otros parámetros se consideraron como: $m = 27$, y un esfuerzo ultimo de 4000 MPa y 24.87 MPa de la fibra y matriz, resultando en un esfuerzo ultimo equivalente de 846 MPa para el compuesto.

4.8 Tipo de análisis

El análisis se basa en un modelo multiescala de una vía, en el cual la información fluye desde la macroescala hacia la microescala. En la simulación macroscópica (modelo completo de la probeta, implementado en Static Structural), se introducen las propiedades elásticas homogenizadas del RVE, junto con la resistencia última a tracción y las condiciones del ensayo.

A partir de esta simulación se obtienen las deformaciones normales y de corte en los elementos que representan las hebras reforzadas con matriz. Por ejemplo, si una hebra está discretizada con 1000 elementos finitos, se obtienen 1000 valores de deformación en cada dirección principal, así como en los componentes de corte.

Estas deformaciones se transfieren posteriormente, mediante APDL, como condiciones de entrada a un modelo representativo de volumen (RVE) a nivel microscópico. Para cada conjunto de deformaciones extraídas, se ejecuta una simulación independiente del RVE, permitiendo obtener la distribución de esfuerzos a escala micro. En el ejemplo mencionado, esto implica realizar 1000 simulaciones individuales del RVE, una por cada conjunto de deformaciones elementales. Un esquema de resumen se muestra en la Fig. 4.11

La Fig. 4.12 presenta un diagrama ilustrativo con 12 elementos como ejemplo simplificado, donde se analizan 3 de ellos para visualizar claramente el flujo de simulaciones desde la escala macro hacia la micro. En (a), se muestra un RVE utilizado para obtener las propiedades elásticas homogenizadas mediante homogenización numérica. Estas propiedades se asignan al modelo macroscópico en Static Structural, donde se aplican cargas o desplazamientos definidos (b). Como resultado, se generan deformaciones en los elementos del modelo (c); en

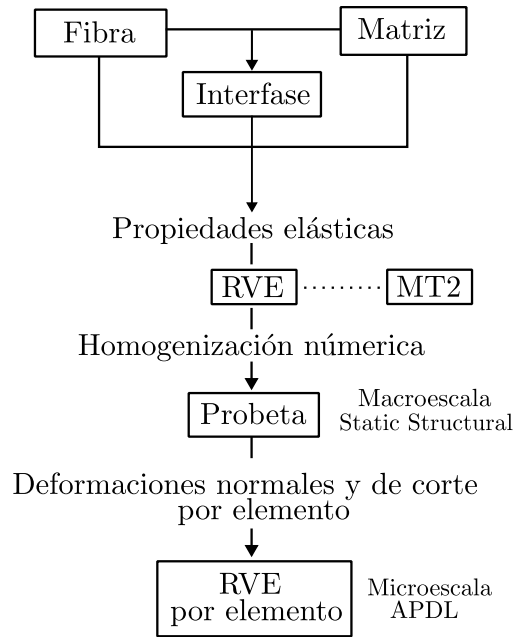


Figura 4.11 Esquema análisis de una vía.

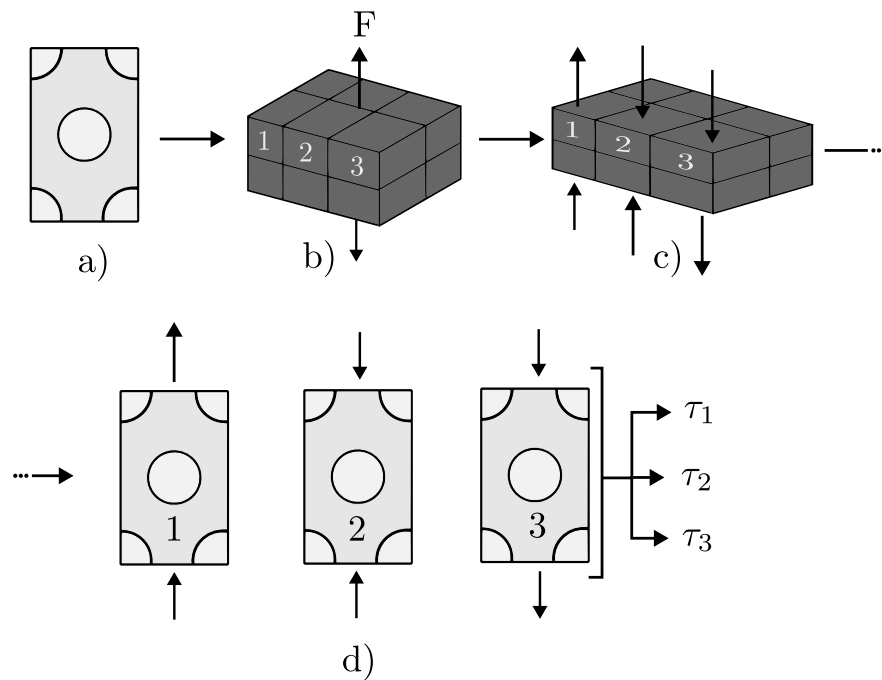


Figura 4.12 Diagrama ilustrativo análisis con acoplamiento de una vía.

este caso, se seleccionan 3 elementos con sus respectivas deformaciones. Estas deformaciones se imponen como condiciones de borde en modelos RVE independientes (d), en los cuales se obtienen los esfuerzos de corte representados como τ_1 , τ_2 y τ_3 .

5 Resultados y discusión

5.1 Comparación macroescala experimental-simulación

La distribución de la deformación de corte es similar en ambos casos, como se puede apreciar en las Fig. 5.1 y 5.2. Aunque a nivel macroscópico los valores parecen diferir significativamente. En el caso experimental, la matriz presenta deformaciones del orden de 0.0015, mientras que en la simulación los valores oscilan entre 0.0017 a 0.008, lo cual si bien hay diferencias, se encuentran en ordenes de magnitud similares.

Por otro lado, al analizar específicamente el volumen de las hebras, se observa una diferencia significativa también. El valor máximo de deformación de corte en el experimento es de aproximadamente 0.005, mientras que en la simulación, mostrada en la Fig. 5.3, se tienen valores máximos de 0.0155, lo cual es 3 veces más que el experimental, aunque en promedio, se tiene que la deformación es de 0.008, un tanto más cercano al experimental. Estas diferencias se pueden deber a las idealizaciones realizadas, sobre todo considerando que es una simulación de una vía.

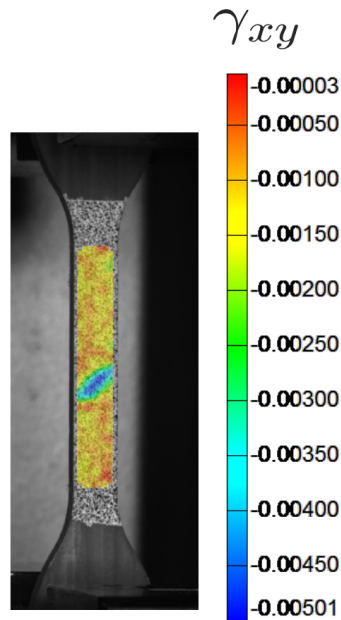


Figura 5.1 Distribución de deformación de corte XY experimental.

En cuanto a la curva fuerza-desplazamiento, se obtienen valores diferentes: la fuerza simulada para un desplazamiento de 3 mm, como se puede observar en la Fig. 5.4, alcanza aproximadamente 1665 N, mientras que la fuerza experimental es del orden de 1150 N. Esto representa una diferencia de alrededor de 550 N, por lo tanto, los parámetros del modelo deben ser ajustados, particularmente aquellos asociados al comportamiento del compuesto. Esta discrepancia puede deberse al uso de propiedades idealizadas, como un volumen de fibra del 50% y un arreglo hexagonal regular, sin considerar vacíos ni defectos de fabricación. En la realidad, como se observa en la Fig. 5.5, el compuesto presenta un arreglo aleatorio con zonas de aglomeración y otras con baja concentración de fibra, lo cual afecta directamente la rigidez y la resistencia global del material. No obstante, estos resultados son consistentes con el enfoque adoptado en el presente trabajo, donde se modela explícitamente una interfase dentro del RVE, permitiendo capturar el efecto de dicha variabilidad en las propiedades elásticas de manera más realista que mediante métodos de homogenización simplificados.

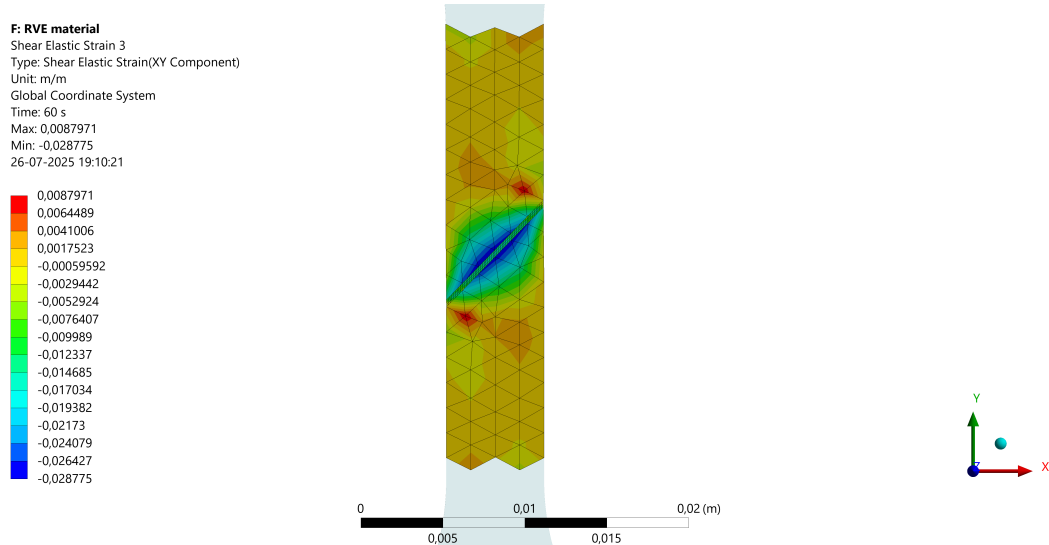


Figura 5.2 Distribución de deformación de corte XY simulación.

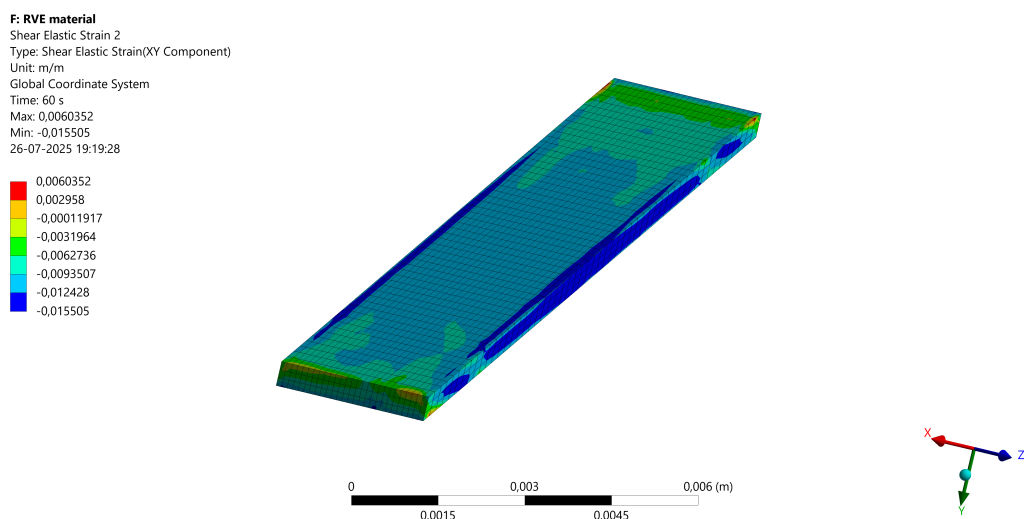


Figura 5.3 Distribución de deformación de corte XY del compuesto.

Cabe destacar que en la Fig. 5.4 se incluye una línea vertical roja, la cual indica el desplazamiento real al cual falla la probeta (2.74 mm aproximadamente, valor similar al desplazamiento menor obtenido en los ensayos) luego de realizar una toe compensation de acuerdo con la norma ASTM D638, y la distribución del esfuerzo de corte para dicho desplazamiento se muestra en la Fig. 5.16 junto con su análisis.

En cuanto a la distribución de esfuerzos equivalentes en el compuesto, se observa en la Fig. 5.6 que tienden a ser mayores en el centro y continua hacia el lado de la cara más cercana al extremo de la probeta por esa cara, también es posible observar que tiende a aumentar en las orillas del compuesto, específicamente, tiende a incrementar en las esquinas, y en el caso de la Fig. 5.6 en la izquierda superior.

Los valores de deformación normal y de corte se obtienen considerando un cuarto del compuesto, debido a la simetría del modelo. Estos valores corresponden a promedios elementales, de modo que representen el comportamiento local y tengan sentido en un análisis a microescala.

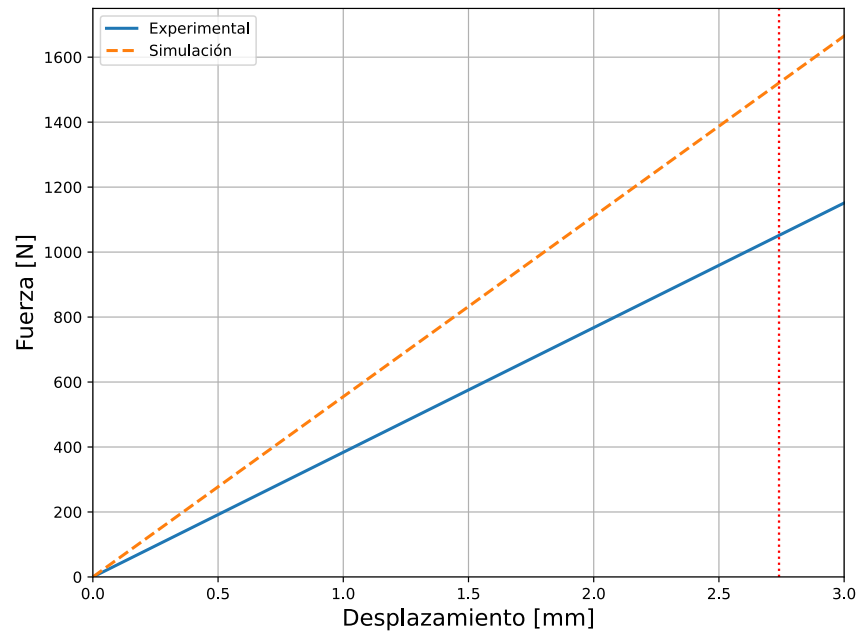


Figura 5.4 Comparación curva fuerza-desplazamiento.

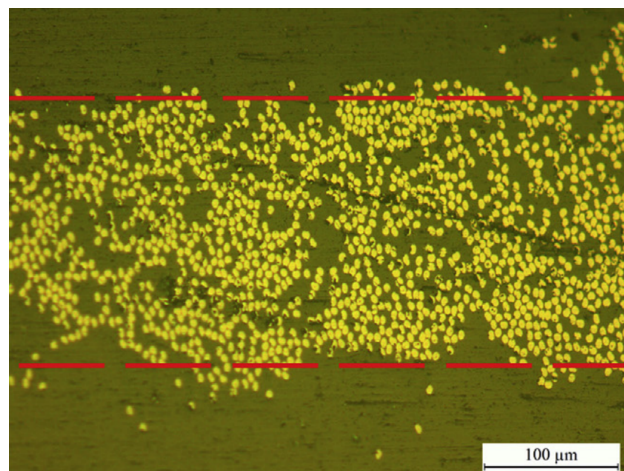


Figura 5.5 Espécimen de ensayo 45FBT desmoldado [6].

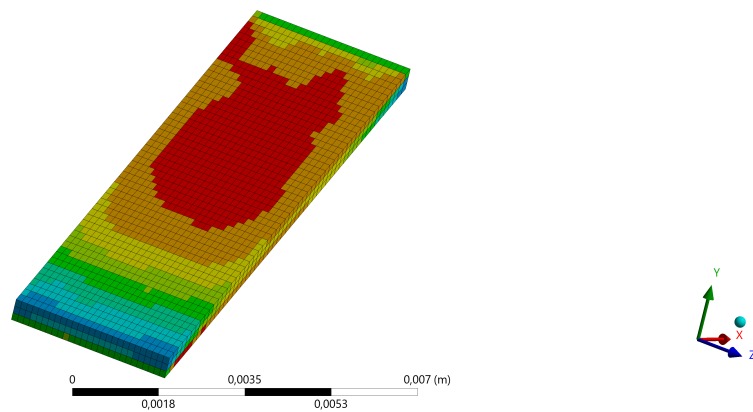


Figura 5.6 Esfuerzo equivalente en el compuesto.

5.2 Modo de falla

Con el valor de esfuerzo ultimo calculado en la sección 4.7, se concluye que no hay falla de uno de los constituyentes, ya que no se alcanza un factor de seguridad menor a 1 a los 3 mm de desplazamiento del ensayo. En la Fig. 5.7 se muestra los valores de factor de seguridad, donde se puede observar que los que poseen un mayor riesgo de fractura es en los extremos. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de los factores de seguridad resumidos.

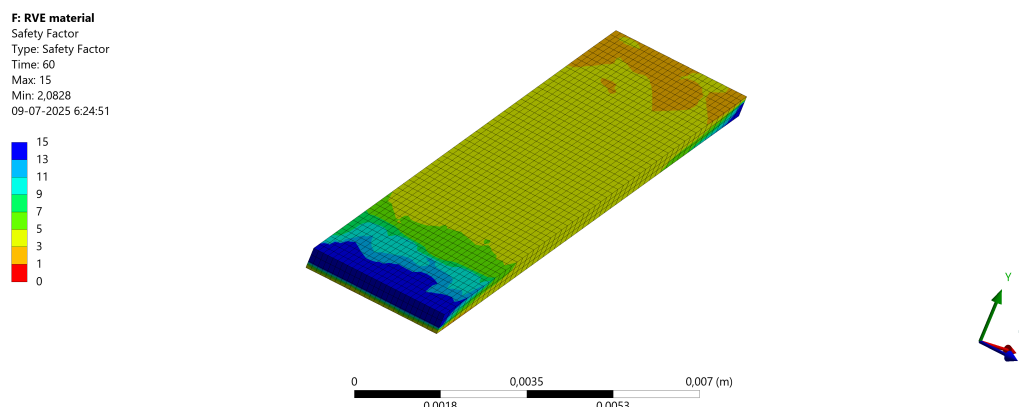


Figura 5.7 Factor de seguridad en el compuesto.

Tabla 5.1 Factor de seguridad

Máximo	Mínimo	Promedio
15	2.083	5.5162

De estos factores de seguridad se puede suponer que no ocurre falla por alguna ruptura de los constituyentes, si no más bien una falla en la interfase y/o adhesión, y en conjunto al esfuerzo equivalente mostrado en la Fig. 5.6, se predijo que la falla ocurriría en las orillas diagonales de las caras perpendiculares al eje Y.

5.3 Distribución de esfuerzos equivalentes matriz y fibra RVE

De forma complementaria, en las Fig. 5.8 y 5.9 se presentan las distribuciones de esfuerzos equivalentes para las fibras y la matriz, respectivamente.

En el caso de las fibras, se observan valores relativamente altos, en torno a los 3680 MPa. Sin embargo, estos se atribuyen principalmente a las condiciones de borde, las cuales no reflejan con precisión el comportamiento real en esa región. A diferencia de los esfuerzos de corte, que dependen en mayor medida de las zonas centrales, los esfuerzos equivalentes elevados se concentran en los bordes debido a las restricciones impuestas. Al observar el centro de las fibras, los valores disminuyen considerablemente, ubicándose entre 22.4 MPa y 835 MPa. Estos niveles no resultan absurdos si se considera que la resistencia de las fibras de carbono se encuentra en el orden de miles de MPa.

En cuanto a la matriz, se aprecia un comportamiento similar. Los mayores esfuerzos se localizan en las zonas de borde, mientras que en la región central los valores oscilan entre 13.1 MPa y 47.5 MPa. Aunque el límite superior se acerca a la resistencia del material, es importante destacar que se realizó un análisis conservador de la resistencia del compuesto (ver Fig. 5.7), el cual indica que no se produce falla en los constituyentes. Por tanto, los altos

esfuerzos observados se deben a efectos de borde, y es fundamental considerar este aspecto para evitar conclusiones erróneas sobre posibles fallas por ruptura.

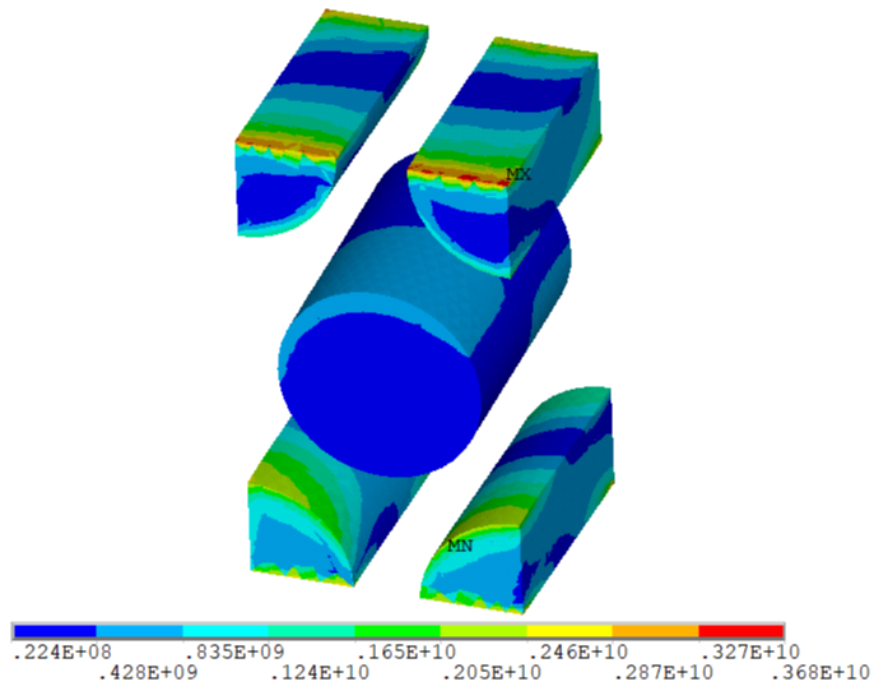


Figura 5.8 Distribución de esfuerzos equivalentes en las fibras.

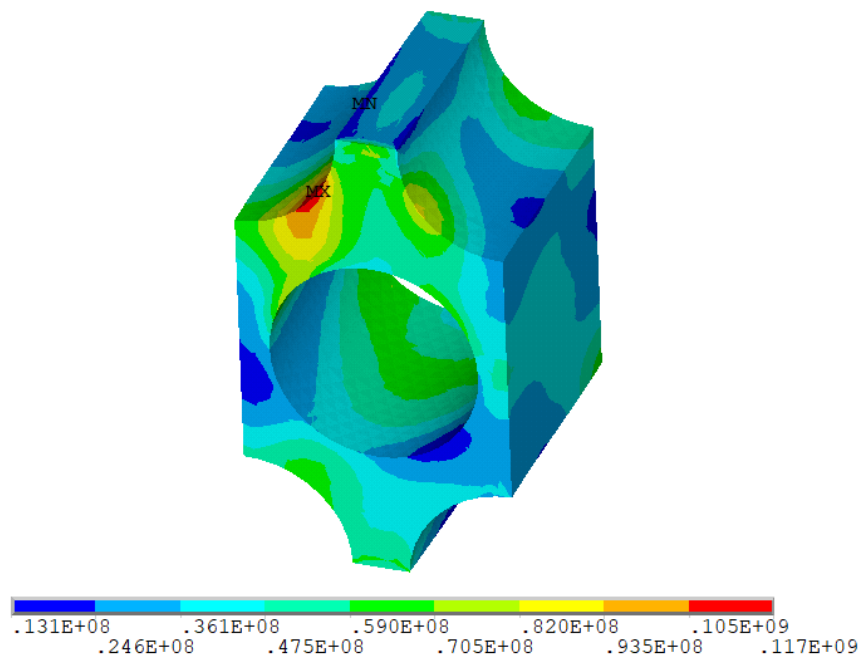


Figura 5.9 Distribución de esfuerzos equivalentes en la matriz.

5.4 Distribución de esfuerzos de corte en la interfase y estimación valores IFSS

El código utilizado para iterar, implementar las deformaciones obtenidas de los elementos en la macroescala, obtener los valores de esfuerzo de corte, y transformarlos en coordenadas cilíndricas se encuentran en el Anexo A.

Los valores de esfuerzos de corte τ_{rz} para el análisis con elementos SOLID185 se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados esfuerzos de corte τ_{rz}

Valor	Máximo	Mínimo	Promedio
$\tau_{rz}[MPa]$	37.711	-36.604	25.228

Con el fin de realizar un análisis más preciso de los valores más altos del análisis previo, se utilizan elementos SOLID186 que poseen una mayor cantidad de nodos y es más realista, aunque aumenta el costo computacional, por lo que se redujo el análisis a los 7 elementos con mayor esfuerzos de corte, las diferencias se muestran en la Tabla 5.3 para los valores positivos, y en la Tabla 5.4 para los negativos.

Tabla 5.3 Comparación esfuerzos de corte máximos τ_{rz}

Elemento	SOLID185 [MPa]	SOLID186	Diferencia [%]
2055	37.711	35.127	-6.851
2058	37.427	35.398	-5.421
2220	35.788	33.653	-5.967
2061	35.016	33.430	-4.528
2217	34.643	32.2616	-6.875
2223	34.208	32.412	-5.250
3369	33.233	32.670	-1.606

Tabla 5.4 Comparación esfuerzos de corte mínimos τ_{rz}

Elemento	SOLID185 [MPa]	SOLID186	Diferencia [%]
2055	-36.604	-35.152	-3.967
2058	-36.471	-35.4158	-2.894
2220	-34.929	-33.674	-3.593
2061	-34.287	-33.374	-2.663
2217	-33.744	-32.286	-4.321
2223	-33.532	-32.405	-3.361
3369	-33.702	-32.759	-2.801

La distribución de esfuerzos de corte se asemeja a los conseguidos por otros estudios [6, 8], donde se observa una mayor concentración en los ángulos de 90° y 180° como se observa en la Fig. 5.10. También en la Fig. 5.11 se puede observar que hay una distribución más extensa al área de contacto con la fibra que con la matriz.

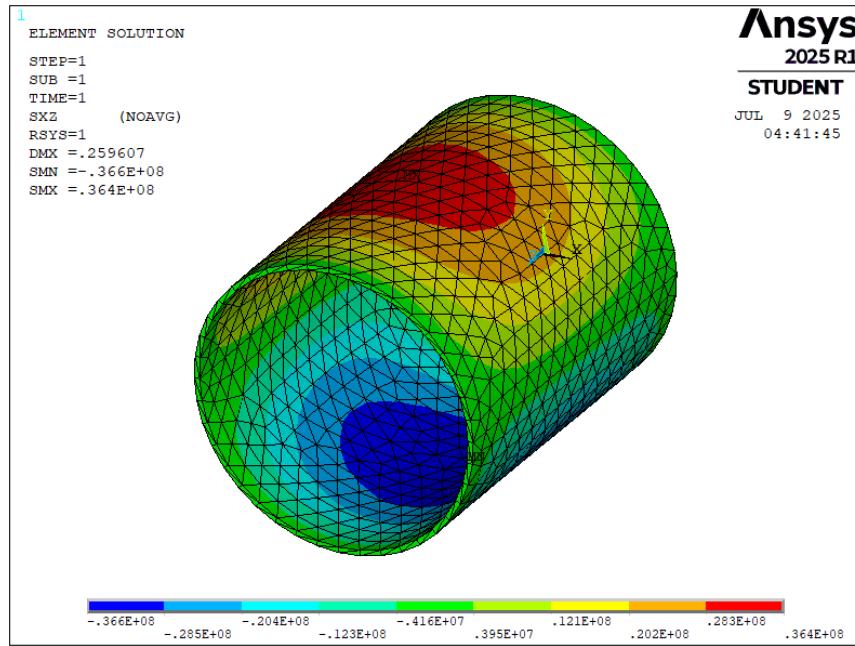


Figura 5.10 Distribución de esfuerzos de corte τ_{rz} .

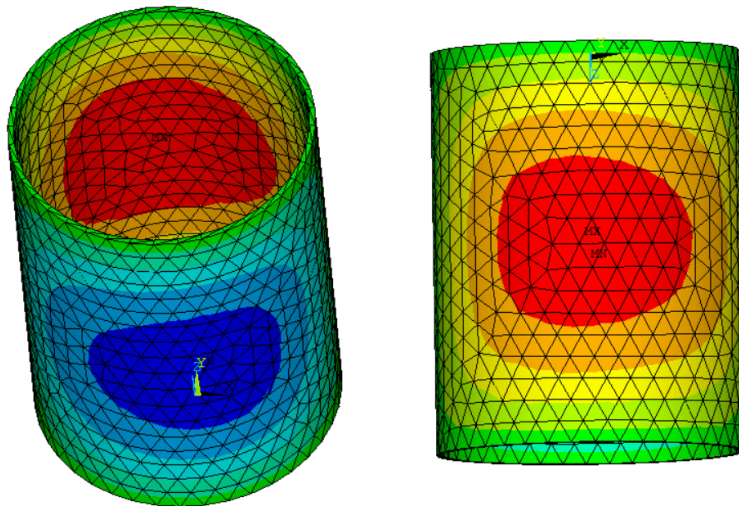


Figura 5.11 Distribución de esfuerzos de corte comparación área τ_{rz} .

Como se predijo, los elementos con mayores valores de esfuerzos de corte son los que se encuentran en las esquinas más cercanas a los extremos de la probeta y algunos entre el centro y las esquinas como se observa en la Fig. 5.12, donde los elementos verdes son los que poseen los esfuerzos de corte más altos. Por lo tanto, se puede concluir que la delaminación comienza en las esquinas, y debido a que las probetas son simétricas, se da como hipótesis que la falla comienza en las esquinas y se expande hacia los extremos de la longitud y posteriormente hacia el centro del compuesto. Esta hipótesis tiene similitud a lo encontrado en un estudio [6], donde la simulación de 45FBT con daño en la interfaz que se realizó se muestra en la Fig. 5.13, donde se inicia en las esquina, se propaga a los extremos para luego ir hacia el centro, hasta fallar completamente todo el compuesto.

A través de los valores máximos analizados previamente y los valores promedio de los elementos SOLID185, se estima que los IFSS por el método promedio calculados poseen ordenes

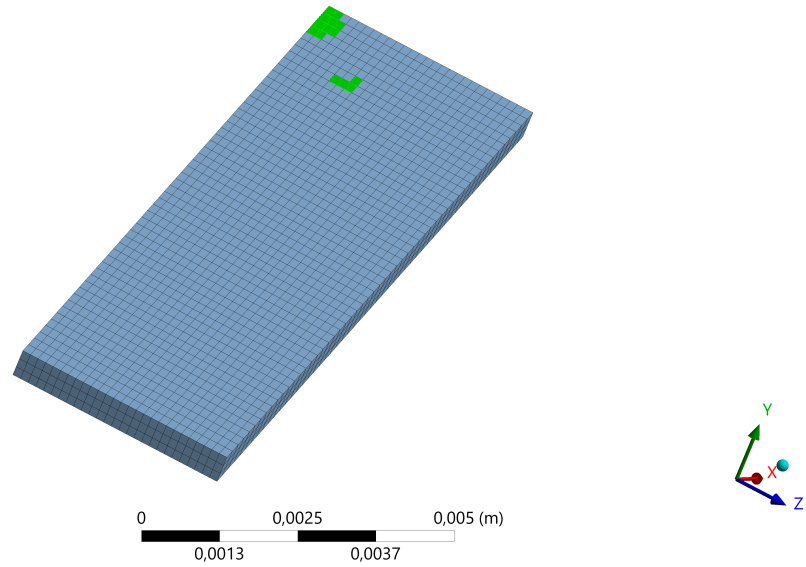


Figura 5.12 Elementos con los mayores esfuerzos de corte τ_{rz} .

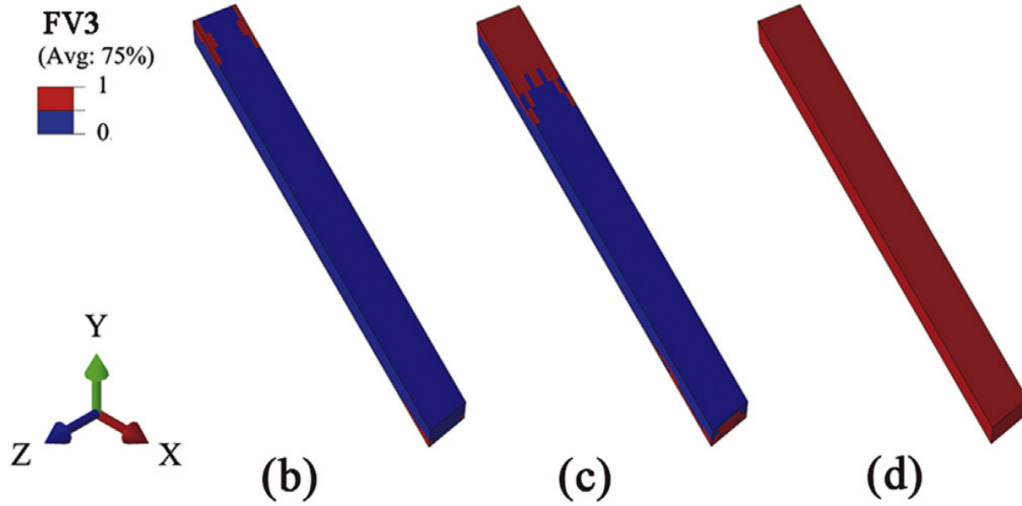


Figura 5.13 Inicio (b), propagación (c), daño completo (d) de la capa de compuesto [6].

de magnitud cercanos a los del Iosipescu y SFFT, lo cual da indicios de que los valores son válidos y tienen sentido, sobre todo considerando que se utilizó el valor de desplazamiento más alto de los ensayos, lo que podría reducir los valores máximos a unos más cercanos de los Iosipescu y SFFT (ver Fig. 5.14). También se podría considerar que los valores altos significan que pueden deberse al comportamiento real de las fibras al ser hebras, aumentando su IFSS aparente. En cuanto al IFSS por valor promedio de elementos, podría considerarse el más cercano a los IFSS calculados, sin embargo, esta forma de cálculo se tendría que verificar con otros ensayos experimentales, con el fin de observar correlación, ya que podría considerarse que los valores extremos pueden ser por ser bordes, lo cual en fórmulas matemáticas pueden conducir a un valor no representativo, sumado a que si bien se calcula un compuesto representativo, las fases en realidad están en un conjunto, por lo tanto el cambio de fase repentino también puede conducir a una diferencia en esfuerzos, y puede ser la razón de por qué indica un IFSS alto y no cercano a los valores promedios.

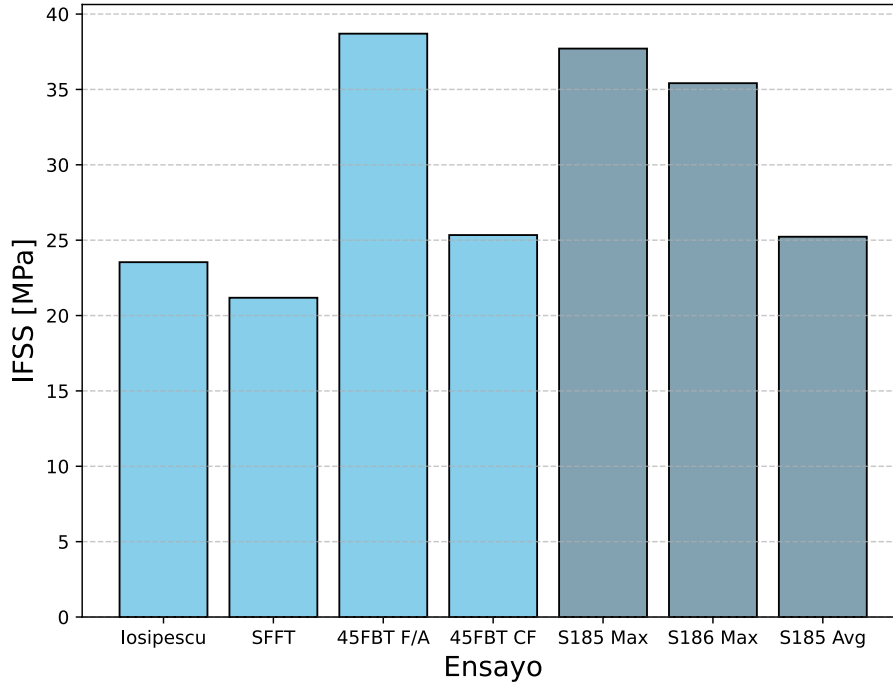


Figura 5.14 Valores IFSS comparación.

A continuación, se evaluarán casos particulares considerando diferentes razones interfaz-fibra, así como el caso del desplazamiento real de falla obtenido en la Fig. 5.4. Para ello, se emplearán únicamente elementos SOLID185, ya que el objetivo es comparar los resultados con el caso principal del trabajo, correspondiente a un desplazamiento de 3 mm y una razón interfaz-fibra de 0.04.

Se calcularon valores con el fin de comparar 2 valores diferentes de D_i/r_f , estos siendo 0.02 y 0.1, y los resultados se observan en la Fig. 5.15, de forma similar al caso principal, se calculan los valores máximos y promedios entre los elementos analizados. Se puede observar que la razón interfaz-fibra posee un efecto leve para un cambio geométrico significativo (el espesor para las razones de 0.02 y 0.1 es de 0.07 y 0.35 μm respectivamente), con la mayor diferencia siendo de alrededor de 3 MPa. Esto coincide con lo observado en la literatura [8].

En cuanto a la diferencia entre un desplazamiento de 3 mm y 2.74 mm, esto se muestra en la Fig. 5.16, donde similar al caso anterior, se tiene una diferencia de 3 MPa, por lo tanto, esto sugiere que la diferencia entre los ensayos y la simulación presentados en la Fig. 5.14 (En el caso del valor máximo), es debido a las idealizaciones, mientras que el valor promedio, si bien posee un valor cercano a los ensayos de Iosipescu y SFFT, se deben realizar ensayos con distintos materiales con el fin de confirmar si son valores que tienden a ser similares a los métodos microscópicos.

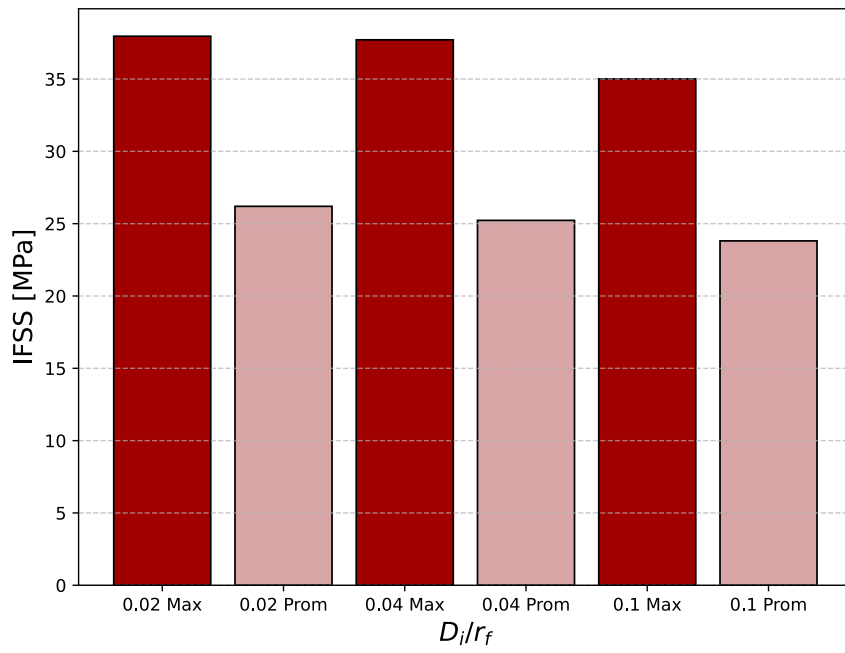


Figura 5.15 Valores IFSS comparación con diferentes D_i/r_f .

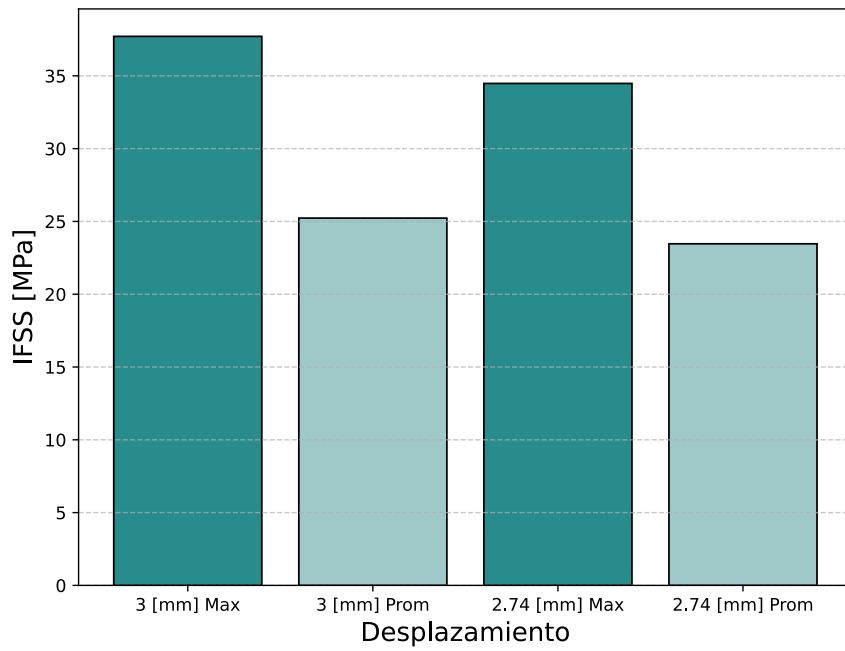


Figura 5.16 Valores IFSS comparación con diferente desplazamiento con caso base.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

Cumpliendo con los objetivos planteados, se logró identificar las variables más relevantes del ensayo 45FBT, así como las propiedades mecánicas de la fibra y la matriz que influyen directamente en la respuesta global del compuesto. A partir de esta información, se implementó una simulación multiescala de acoplamiento unidireccional, desde el nivel macro hacia el nivel microscópico, utilizando los parámetros experimentales obtenidos. Los resultados numéricos de distribución de deformaciones por esfuerzo cortante fueron comparados con los observados experimentalmente, mostrando formas similares, aunque con diferencias en magnitud. No obstante, estas diferencias se consideran aceptables, dado que el modelo incorpora idealizaciones necesarias (como el arreglo regular de fibras o la ausencia de defectos) que permiten reducir la complejidad computacional sin comprometer significativamente la validez del análisis.

A partir del análisis de los esfuerzos de corte en el modelo microscópico, fue posible identificar las zonas más propensas a fallar en caso de una delaminación causada por esfuerzos interfaciales. Lo anterior coincide con patrones descritos en la literatura, lo que respalda la validez del enfoque propuesto. Además, se estimó el valor del esfuerzo cortante interfacial máximo (IFSS) mediante dos enfoques: el valor máximo y el valor promedio sobre los elementos de la interfase. Los resultados obtenidos fueron de 35.42 MPa y 25.23 MPa, respectivamente, encontrándose ambos dentro del rango reportado para compuestos de matriz epoxi con fibras de carbono, lo cual refuerza la precisión del modelo en la estimación de parámetros críticos para el diseño de materiales compuestos.

Aunque se lograron resultados satisfactorios, se deben reconocer ciertas limitaciones, como el costo computacional, los tiempos de simulación, las idealizaciones geométricas del RVE, y la falta de experiencia previa en modelos como el método de celdas generalizadas (GMC) o el acoplamiento multiescala bidireccional. No obstante, este trabajo constituye una base sólida, al haber explorado e implementado herramientas fundamentales que permiten abordar problemáticas más complejas en el análisis de materiales compuestos. Asimismo, el modelo propuesto permite estimar el IFSS sin necesidad de sistemas ópticos avanzados como el ARAMIS, reduciendo significativamente el costo experimental, ya que solo se requieren las propiedades de los constituyentes y el desplazamiento de falla en el ensayo.

6.2 Perspectivas

Como trabajo futuro se propone:

- Realizar un acoplamiento de dos vías y la utilización de empaquetamiento aleatoria para las fibras, mejorando la precisión y realismo del modelo.
- Realizar ensayos que permitan obtener propiedades para la realización de una simulación con modelo de zonas cohesivas (CZM) representativo del ensayo.
- Utilización de otros métodos de análisis microscópicos como el GMC.
- Sincronizar maquina universal con ARAMIS para la optimización de la obtención de resultados.

Referencias

- [1] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes, and E. Linul, “Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications,” 10 2019.
- [2] W. J. Cantwell and A. Morton, “The impact resistance of composite materials-a review,” tech. rep., 1991.
- [3] 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.
- [4] S. Shah, P. J. Hazell, H. Wang, and J. P. Escobedo, “Shock response of unidirectional carbon fibre-reinforced polymer composites: Influence of fibre orientation and volume fraction,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 299, p. 112438, 6 2025.
- [5] S. AhmadvashAghbash, I. Verpoest, Y. Swolfs, and M. Mehdikhani, “Methods and models for fibre–matrix interface characterisation in fibre-reinforced polymers: a review,” 2023.
- [6] G. Qi, S. Du, B. Zhang, and Y. Yu, “A new approach to assessing carbon fiber/epoxy interfacial shear strength by tensile test of 45° fiber bundle composites: Experiment, modeling and applicability,” *Composites Science and Technology*, vol. 129, pp. 214–221, 6 2016.
- [7] S. Khandelwal and K. Y. Rhee, “Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface,” 7 2020.
- [8] G. Qi, B. Zhang, S. Du, and Y. Yu, “Estimation of aramid fiber/epoxy interfacial properties by fiber bundle tests and multiscale modeling considering the fiber skin/core structure,” *Composite Structures*, vol. 167, pp. 1–10, 5 2017.
- [9] S. Huang, Q. Fu, L. Yan, and B. Kasal, “Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – a critical review,” 7 2021.
- [10] G. Qi, B. Zhang, and S. Du, “Assessment of f-iii and f-12 aramid fiber/epoxy interfacial adhesions based on fiber bundle specimens,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 112, pp. 549–557, 9 2018.
- [11] 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.
- [12] H. Wang, X. Zhang, Y. Duan, and L. Meng, “Experimental and numerical study of the interfacial shear strength in carbon fiber/epoxy resin composite under thermal loads,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 2018, pp. 1–8, 2018.
- [13] 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.
- [14] F. Stojceveski, A. Hendlmeier, J. D. Randall, C. L. Arnold, M. K. Stanfield, D. J. Eyckens, R. Alexander, and L. C. Henderson, “Effect of tow size and interface interaction

- on interfacial shear strength determined by iosipescu (v-notch) testing in epoxy resin,” *Materials*, vol. 11, p. 1786, 9 2018.
- [15] E. J. Barbero, *Finite element analysis of composite materials using ANSYS*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
 - [16] S. I. Kundalwal, “Review on micromechanics of nano- and micro-fiber reinforced composites,” 12 2018.
 - [17] W. A. Curtin, “Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites,” tech. rep., 1991.
 - [18] F. Paris and G. Washington, “A study of failure criteria of fibrous composite materials,” tech. rep., 2001.

A Códigos en APDL

FINISH

/CLEAR

!Limpieza completa del entorno previo

!Las unidades utilizadas son del sistema SI

FINISH

/CLEAR

/UNITS, SI

/PREP7

ET,1,SOLID185 !Definición del elemento sólido para la matriz

MP,EX,1,1.717E9 !Módulo de elasticidad en X para material 1

MP,EY,1,1.717E9 !Módulo de elasticidad en Y para material 1

MP,EZ,1,1.717E9 !Módulo de elasticidad en Z para material 1

MP,NUXY,1,0.35 !Coeficiente de Poisson XY para material 1

MP,NUYZ,1,0.35 !Coeficiente de Poisson YZ para material 1

MP,NUXZ,1,0.35 !Coeficiente de Poisson XZ para material 1

ET,2,SOLID185 !Definición del elemento sólido para la fibra de carbono

MP,EX,2,2.4E10 !Módulo de elasticidad en X para material 2

MP,EY,2,2.4E10 !Módulo de elasticidad en Y para material 2

MP,EZ,2,2.4E11 !Módulo de elasticidad en Z para material 2

MP,GXY,2,8.2143E9 !Módulo de corte XY para material 2

MP,GYZ,2,9E9 !Módulo de corte YZ para material 2

MP,GXZ,2,9E9 !Módulo de corte XZ para material 2

MP,NUXY,2,0.44 !Coeficiente de Poisson XY para material 2

MP,NUYZ,2,0.022 !Coeficiente de Poisson YZ para material 2

MP,NUXZ,2,0.022 !Coeficiente de Poisson XZ para material 2

```

EMZ=7.5E9

EMZi=7.5E9

NUMZ=0.395

NUMZi=0.39501

ET,3,SOLID185          !Definición del elemento sólido para la interfaz tipo 1

MP,EX,3,EMZ            !Módulo de elasticidad para material 3

MP,EY,3,EMZ

MP,EZ,3,EMZ

MP,NUXY,3,NUMZ         !Coeficiente de Poisson para material 3

MP,NUYZ,3,NUMZ

MP,NUXZ,3,NUMZ

ET,4,SOLID185          !Definición del elemento sólido para la interfaz tipo 2

MP,EX,4,EMZi           !Módulo de elasticidad para material 4 (Solo para plottear)

MP,EY,4,EMZi

MP,EZ,4,EMZi

MP,NUXY,4,NUMZi        !Coeficiente de Poisson para material 4

MP,NUYZ,4,NUMZi

MP,NUXZ,4,NUMZi

KEYOPT,1,2,2

KEYOPT,2,2,2

KEYOPT,3,2,2

ifid=3

!Definición geométrica

pi=acos(-1)

radio=3.5              !Radio principal [variable]

radio_if=radio*0.04+radio

```

```

a2=4.714                !Longitud en X2 [micrones]

a3=8.164                !Longitud en X3 [micrones]

a1=a2                  !Longitud en X1 [micrones]

BLC5,0,0,a2*2,a3*2,a1*2    !Rectángulo base de la muestra

CYL4,0,0,radiio_if,,, ,a1*2  !Cilindro de interfaz externo

NUMCMP,ALL

NUMMRG,ALL

!Definición de volúmenes para matriz e interfaz

CYL4,0,0,radiio,,, ,a1*2      !Cilindro de fibra

CYL4,a2,a3,radiio_if,180,,270,a1*2

CYL4,-a2,a3,radiio_if,-90,,0,a1*2

CYL4,-a2,-a3,radiio_if,0,,90,a1*2

CYL4,a2,-a3,radiio_if,90,,180,a1*2

CYL4,a2,a3,radiio,180,,270,a1*2    !Fibra - cuadrante superior derecho

CYL4,-a2,a3,radiio,-90,,0,a1*2    !Fibra - cuadrante superior izquierdo

CYL4,-a2,-a3,radiio,0,,90,a1*2    !Fibra - cuadrante inferior izquierdo

CYL4,a2,-a3,radiio,90,,180,a1*2    !Fibra - cuadrante inferior derecho

VOVLAP,ALL

NUMCMP,ALL

LESIZE,ALL,0.5

LSEL,ALL

!Configuración del mallado

ESIZE,0.6

MSHAPE,1,3              !1=Tetraedros,3D

MSHKEY,0                !Mallado libre

!Asignación material a volumen matriz

```

```

VSEL,S,VOLU,,11

VATT,1,1

VMESH,ALL

!Asignación material a volumen fibra

VSEL,S,VOLU,,1,5

VATT,2,2

VMESH,ALL

!Asignación material a volúmenes interfaz

VSEL,S,VOLU,,6,9

VATT,ifid,3

VMESH,ALL

VSEL,S,VOLU,,10

VATT,ifid+1,4

VMESH,ALL

VSEL,S,VOLU,,ALL

NUMCMP,ALL

NUMMRG,ALL

FINISH

!Número total de nodos:13865

!Gestión de archivos de entrada

*SET,basepathy,'direccion_aqui'

*SET,basepathz,'direccion_aqui'

*SET,basepathx,'direccion_aqui'

*SET,basepathxy,'direccion_aqui'

*SET,basepathxz,'direccion_aqui'

*SET,basepathyz,'direccion_aqui'

```

```

*SET,basefull,'direccion_aqui'

*SET,photobasexy,'XY'

*SET,photobaseyz,'YZ'

*SET,photobasexz,'XZ'

to_skip=1

/INQUIRE,numlinesord,LINES,basefull,csv

to_read=numlinesord-to_skip

*DIM,tableorder,TABLE,to_read

*TREAD,tableorder,basefull,csv,,to_skip

!Apertura archivo de salida

*SET,baseopen,'direccion_aqui'

*SET,fullopen,STRCAT(baseopen,CHRVAL(1))

*cfopen,fullopen,txt

!Procedimiento de solución

*D0,1,3,3,1

*SET,fullpathy,STRCAT(basepathy,CHRVAL(1))

*SET,fullpathz,STRCAT(basepathz,CHRVAL(1))

*SET,fullpathx,STRCAT(basepathx,CHRVAL(1))

*SET,fullpathxy,STRCAT(basepathxy,CHRVAL(1))

*SET,fullpathxz,STRCAT(basepathxz,CHRVAL(1))

*SET,fullpathyz,STRCAT(basepathyz,CHRVAL(1))

*SET,photosbasexy,STRCAT(photobasexy,CHRVAL(1))

*SET,photosbaseyz,STRCAT(photobaseyz,CHRVAL(1))

*SET,photosbasexz,STRCAT(photobasexz,CHRVAL(1))

/INQUIRE,numlinesordes,LINES,fullpathy,csv

to_read2=numlinesordes-1

```

```

*DEL,mytabley,,NOPR

*DIM,mytabley,TABLE,to_read2

*TREAD,mytabley,fullpathy,csv,,to_skip

*DEL,mytablez,,NOPR

*DIM,mytablez,TABLE,to_read2

*TREAD,mytablez,fullpathz,csv,,to_skip

*DEL,mytablex,,NOPR

*DIM,mytablex,TABLE,to_read2

*TREAD,mytablex,fullpathx,csv,,to_skip

*DEL,mytablexy,,NOPR

*DIM,mytablexy,TABLE,to_read2

*TREAD,mytablexy,fullpathxy,csv,,to_skip

*DEL,mytablexz,,NOPR

*DIM,mytablexz,TABLE,to_read2

*TREAD,mytablexz,fullpathxz,csv,,to_skip

*DEL,mytableyz,,NOPR

*DIM,mytableyz,TABLE,to_read2

*TREAD,mytableyz,fullpathyz,csv,,to_skip

*D0,k,953,to_read,1

*SET,photoxy,STRCAT(photosbasexy,CHRVAL(k))

*SET,photoyz,STRCAT(photosbaseyz,CHRVAL(k))

*SET,photoxz,STRCAT(photosbasexz,CHRVAL(k))

elk=tableorder(k)

/COM, ===== Solución para k = , %k%

/SOLU

ANTYPE,STATIC          !Análisis estático

```

```

CSYS,0                                !Sistema de coordenadas cartesiano

Defnormx=mytablex(elk)

Defnormy=mytabley(elk)

Defnormz=mytablez(elk)

Defshxy=mytablexy(elk)

Defshyz=mytableyz(elk)

Defshxz=mytablexz(elk)

ASEL,S,LOC,X,-a2

NSLA,S,1

*DEL,nlist,,NOPR

*GET,ncount,NODE,0,COUNT

*DIME,nlist,ARRAY,ncount

*VGET,nlist(1),NODE,,NLIST

*DO,i,1,ncount

node_id=nlist(i)

*GET,xcoord,NODE,node_id,LOC,x

*GET,ycoord,NODE,node_id,LOC,y

*GET,zcoord,NODE,node_id,LOC,z

dispsh=(ycoord+a3)*Defshxy+(zcoord)*Defshxz

disptot=dispsh-(Defnormx*a2)

D,node_id,UX,disptot

*ENDDO

ASEL,S,LOC,X,a2

NSLA,S,1

*DEL,nlist,,NOPR

*GET,ncount,NODE,0,COUNT

```

```

*DIM,nlist,ARRAY,ncount

*VGET,nlist(1),NODE,,NLIST

*DO,i,1,ncount

node_id=nlist(i)

*GET,xcoord,NODE,node_id,LOC,x

*GET,ycoord,NODE,node_id,LOC,y

*GET,zcoord,NODE,node_id,LOC,z

dispsh=(ycoord+a3)*Defshxy+(zcoord)*Defshxz

disptot=dispsh+(Defnormx*a2)

D,node_id,UX,disptot

*ENDDO

ASEL,S,LOC,Y,a3

NSLA,S,1

*DEL,nlist,,NOPR

*GET,ncount,NODE,0,COUNT

*DIM,nlist,ARRAY,ncount

*VGET,nlist(1),NODE,,NLIST

*DO,i,1,ncount

node_id=nlist(i)

*GET,zcoord,NODE,node_id,LOC,z

*GET,ycoord,NODE,node_id,LOC,y

dispsh=(zcoord)*Defshyz

disptot=dispsh+(Defnormy*a3)

D,node_id,UY,disptot

*ENDDO

ASEL,S,LOC,Y,-a3

```

```

NSLA,S,1

*DEL,nlist,,NOPR

*GET,ncount,NODE,0,COUNT

*DIME,nlist,ARRAY,ncount

*VGET,nlist(1),NODE,,NLIST

*DO,i,1,ncount

node_id=nlist(i)

*GET,zcoord,NODE,node_id,LOC,z

*GET,ycoord,NODE,node_id,LOC,y

dispsh=(zcoord)*Defshyz

disptot=dispsh-(Defnormy*a3)

D,node_id,UY,disptot

*ENDDO

ASEL,S,LOC,Z,a1*2

NSLA,S,1

D,ALL,UZ,(Defnormz*a1)

ASEL,S,LOC,Z,0

NSLA,S,1

D,ALL,UZ,-(Defnormz*a1)

ALLSEL,ALL

SOLVE

*ENDDO

*ENDDO

FINISH

/POST1

SET,1

```

```

ESEL,S,MAT,,4                !Selección de elementos, 4 corresponde a la interfase central
RSYS,1
PLESOL,S,XZ
ETABLE,RSim,S,XZ
ESORT,ETAB,RSIM,0            !Orden ascendente
*GET,MaxShPl,sort,0,max
*GET,MaxShNv,sort,0,min
eltod=MaxShPl
esfhtod=MaxShNv
*VWRITE,'Max_Sh: ',eltod,esfhtod
(A10,F15.0,F15.0)
*cfclose

```

B Carta Gantt

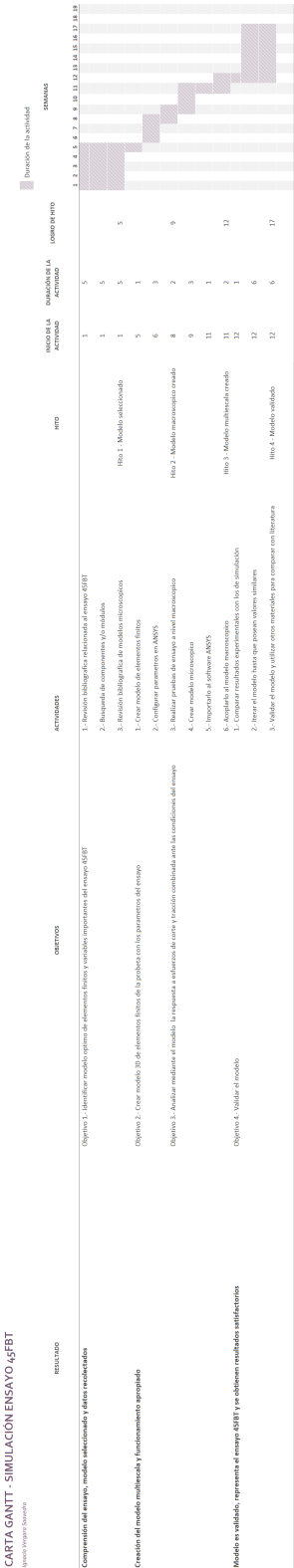


Figura B.1 Carta Gantt