



Saltillo, Coahuila a 28 de septiembre de 2021

Programa de Maestría en Tecnología de Polímeros

**Coordinación de Posgrado
Presente**

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por **DANIEL ELLIUD ORDUÑA ALTAMIRANO** titulado "Efecto del contenido de esferas huecas de vidrio en espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio: Análisis por elementos finitos basado en micromecánica en el régimen elástico para elucidar el mecanismo de reforzamiento" el cual fue presentado el día 22 de septiembre de 2021, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento adjunto corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

SINODALES



Dr. Carlos Alberto Ávila Orta
Presidente



Dra. Adriana Berenice Espinoza Martínez
Secretario



Dr. Roberto Yáñez Macías
Vocal

ASESORES



Dr. Jorge Enrique Rivera Salinas



Dr. Ernesto Hernández Hernández



TESIS CON CARACTER ABIERTO

PROGRAMA: MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE POLÍMEROS

AUTOR: DANIEL ELLIUD ORDUÑA ALTAMIRANO FIRMA 

TITULO: “Efecto del contenido de esferas huecas de vidrio en espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio: Análisis por elementos finitos basado en micromecánica en el régimen elástico para elucidar el mecanismo de reforzamiento”.

ASESORES: Dr. Jorge Enrique Rivera Salinas

FIRMA



Dr. Ernesto Hernández Hernández

FIRMA



El Centro de Investigación en Química Aplicada clasifica el presente documento de tesis como ABIERTO.

Un documento clasificado como Abierto se expone en los estantes del Centro de Información para su consulta. Dicho documento no puede ser copiado en ninguna modalidad sin autorización por escrito del Titular del Centro de Información o del Director General del CIQA.

Saltillo, Coahuila, a 22 de Septiembre de 2021



Sello de la Institución



Dr. Oliverio Santiago Rodríguez Fernández
Director General del CIQA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA
Programa de Maestría en Tecnología de Polímeros

TESIS

Efecto del contenido de esferas huecas de vidrio en espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio: Análisis por elementos finitos basado en micromecánica en el régimen elástico para elucidar el mecanismo de reforzamiento

Presentada por:

DANIEL ELLIUD ORDUÑA ALTAMIRANO


Para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología de Polímeros

Asesorado por:

Dr. Jorge Enrique Rivera Salinas
Dr. Ernesto Hernández Hernández


SINODALES



Dr. Carlos Alberto Ávila Orta
Presidente



Dra. Adriana B. Espinoza Martínez
Secretario



Dr. Roberto Yáñez Macías
Vocal

Saltillo, Coahuila

Septiembre, 2021



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA
Programa de Maestría en Tecnología de Polímeros

TESIS

Efecto del contenido de esferas huecas de vidrio en espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio: Análisis por elementos finitos basado en micromecánica en el régimen elástico para elucidar el mecanismo de reforzamiento

Presentada por:

DANIEL ELLIUD ORDUÑA ALTAMIRANO

Para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología de Polímeros

Asesorado por:

Dr. Jorge Enrique Rivera Salinas
Dr. Ernesto Hernández Hernández

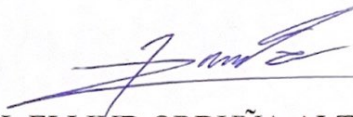
Saltillo, Coahuila. México.

Septiembre, 2021

DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el período que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 22 de septiembre de 2021



DANIEL ELLIUD ORDUÑA ALTAMIRANO

Nombre y Firma

Índice

Índice de Figuras	III
Índice de Tablas.....	VI
Resumen	VII
Agradecimientos.....	IX
1 Introducción.....	1
2 Antecedentes.....	4
2.1 Materiales Compuestos.....	4
2.1.1 Espumas sintácticas poliméricas	5
2.1.2 Diseño de materiales avanzados.....	7
2.1.3 Polímeros reforzados.....	10
2.1.4 Compuestos polímero-fibra de vidrio	13
2.2 Micromecánica.....	17
2.2.1 Regla de las mezclas	19
2.2.2 Modelo de Hashin-Shtrikman	19
2.2.3 Modelo de Gupta.....	20
2.2.4 Modelo de Halpín-Tsai.....	21
2.2.5 Análisis por elemento finito	22
2.3 Simulación	25
2.3.1 Software	26
3 Justificación.....	31
4 Hipótesis	32
5 Objetivos.....	33
5.1 Objetivo general.....	33
5.2 Objetivos específicos	33
6 Desarrollo experimental	34
6.1 Diagrama de proceso del proyecto.....	34
6.2 Materiales.....	35
6.3 Métodos	35
6.3.1 Establecer el Elemento de Volumen Representativo (RVE).....	35
6.3.2 Establecer las Condiciones Iniciales en el Software	38
6.3.3 Establecer un Tamaño de Malla Inicial.....	38

6.3.4 Simulación de Aplicación de Carga.....	40
6.3.5 Análisis de la Deformación y Cálculo del Módulo.....	41
6.3.6 Validar Resultados con Valores Experimentales	43
6.3.7 Estudio de Convergencia: Reducción del Tamaño de Malla	43
7 Presentación y discusión de resultados.....	45
7.1 Modelos representativos RVE	45
7.2 Simulación de una carga: desplazamiento en las direcciones de carga	47
7.3 Predicción del módulo de Young: post procesado en COMSOL	48
7.3.1 Predicción del módulo de Young: módulo en las direcciones de carga.....	53
7.4 Esfuerzos en los modelos y comportamiento en los refuerzos.	56
7.4.1 Elucidar el mecanismo de reforzamiento	64
7.5 Influencia de las esferas en los desplazamientos	66
7.6 Evaluación del módulo general y comprobación del modelo.....	68
Conclusiones.....	71
Trabajo a futuro	73
Glosario	74
Referencias bibliográficas	75

Índice de Figuras

Figura 1.1: Diagrama de Ashby que relaciona la densidad y resistencia de diversos materiales [1].	2
Figura 1.2: Escalas micro, meso y macro en la modelización de materiales por elemento finito (adaptada de Müzel [2].	3
Figura 2.1: Modificación superficial de microesferas huecas de vidrio con silano (aminopropil trietoxisilano-APTES). Adaptado de [26].	8
Figura 2.2: Imágenes de SEM de una espuma sintáctica compuesta de nylon 6 reforzado con 14% en peso de fibra de vidrio y contenido del 10% en peso de HGM [25]: a) Buena adhesión interfacial y b) poca adhesión interfacial.	15
Figura 2.3: Imágenes de SEM de espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio con diferentes concentraciones de HGM [25]: a) 5% en peso, b)10% en peso y c) 15% en peso.	16
Figura 2.4: Selección del volumen representativo en una muestra de una espuma sintáctica de Nylon 6 reforzada con fibra de vidrio.	24
Figura 2.5: Representación de una celda unitaria de un compuesto de polímero (azul) - fibra (rojo) - esferas huecas (naranja) y las diferentes configuraciones de posición que puede tener [64].	25
Figura 2.6: Diagrama de flujo para un proceso de simulación, adaptado de [63].	26
Figura 2.7: Ejemplos de simulación en la predicción de módulo en COMSOL para un RVE de una espuma sintáctica de Nylon 6 con un 10% en peso de HGM: a) Resultados locales en el volumen y b) Resultado homogéneo en todo el volumen.	30
Figura 6.1: Diagrama de proceso del proyecto.	34
Figura 6.2: Modelo de RVE con dimensiones de 20*20*20 μm , composición de nylon 6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.	36
Figura 6.3: Modelo RVE con dimensiones 50*50*50 μm , composición de nylon 6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.	37
Figura 6.4: Modelo RVE con dimensiones 50*200*50 μm , composición de nylon 6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.	37
Figura 6.5: Mallado en el RVE de composición nylon 6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 10% en peso de microesferas.	39

Figura 6.6: Mallado en el RVE de composición nylon 6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 15% en peso de microesferas.....	40
Figura 6.7: Prueba de tensión ASTM D638.....	40
Figura 6.8: Condiciones frontera de la simulación en direcciones x, y, z. las flechas representan la carga aplicada normal a la superficie. La cara opuesta a la superficie normal a la carga es una restricción fija. Se toma como referencia el compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.	42
Figura 6.9: Vista general de cómo se ven los resultados al analizar la deformación por aplicación de carga en las direcciones x (izquierda), y (centro), z (derecha). Se toma como referencia el compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.	42
Figura 6.10: Vista general de cómo se ven los resultados al analizar el módulo en las direcciones a) x (izquierda), b) y (centro) y c) z (derecha). Se toma como referencia un compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.	42
Figura 6.11: Cambio del tamaño de malla para el estudio de convergencia. Se toma como referencia un compuesto con contenido del 10% en peso de HGM: a) Tamaños de malla máximo de 12 μm y mínimo de 1 μm y b) Tamaños de malla máximo de 3 μm y mínimo de 1 μm . Ambos con un acercamiento a la zona adyacente a una esfera para comparar el tamaño del mallado.	44
Figura 7.1: Elementos RVE de geometría cúbica. A la derecha dimensiones de 20 μm por lado, a la izquierda dimensiones de 50 μm por lado. Ambas representaciones de Nylon 6 reforzado con 14% en peso de fibra de vidrio y contenido del 10% en peso de HGM. Las flechas azules representan la extensión de la fibra al considerarla como continua.	45
Figura 7.2: comparación entre una micrografía de SEM y la vista frontal de un modelo RVE de dimensiones 50*200*50, el dominio mostrado en color azul corresponde a las fibras...	46
Figura 7.3: Factores que intervienen en el desplazamiento uniaxial del RVE, las flechas rojas indican la dirección del desplazamiento, el dominio en azul muestra la superficie que se desplaza, el dominio en rojo muestra la superficie sobre la que actúa una restricción fija y sobre cada figura la fuerza aplicada por unidad de área: a) en dirección x, b) en dirección y y c) en dirección z.....	48
Figura 7.4: Cálculo del módulo a través de la homogenización geométrica [86], se pueden apreciar zonas con mayores valores en el módulo debido a los cálculos realizados en todo el	

volumen en un modelo RVE correspondiente al compuesto con 10% en peso de contenido de HGM.	49
Figura 7.5: Módulo en la dirección “y” del RVE con 10% en peso de HGM. a) visualizando los refuerzos y b) visualizando la matriz de nylon 6.	49
Figura 7.6: Valores altos de módulo señalados en los modelos del 10% en peso de HGM para las 3 direcciones de carga aplicada; a) en dirección x, b) en dirección y, c) en dirección z.	50
Figura 7.7: Valores altos de módulo señalados en la dirección y para los modelos con distinto contenido de HGM; a) 0% en peso, b) 5% en peso, c) 10% en peso, d) 15% en peso.....	52
Figura 7.8: Zona de mayor módulo en un modelo con contenido del 15% en peso de HGM. La zona es casi imperceptible, aunque todavía existe.	53
Figura 7.9: Modelo de RVE correspondiente al 10% en peso de contenido de HGM, desplazamiento en μm para a) el RVE completo y b) los reforzantes presentes.....	54
Figura 7.10: Comparación entre los desplazamientos causados en los refuerzos y los valores de módulo resultantes en el RVE del 10% en peso de contenido de HGM: a) desplazamiento en μm y b) módulo en GPa.....	54
Figura 7.11: Homogeneidad del valor del módulo en el modelo RVE del 10% en peso de HGM, donde solo unas pequeñas zonas localizadas presentan valores altos.	55
Figura 7.12: Esfuerzos de Von Mises en el modelo RVE del 10% en peso de HGM.	56
Figura 7.13: Comparación entre la tensión soportada en los reforzantes de los modelos RVE: a) sin HGM y b) contenido del 15% en peso de HGM.....	57
Figura 7.14: Esfuerzos de Von Mises en los reforzantes del RVE sin HGM, comparado con los campos de desplazamiento: a) vista frontal y b) vista posterior.	58
Figura 7.15: Esfuerzos de von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 5% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento: a) vista frontal y b) vista posterior.	59
Figura 7.16: Esfuerzos de von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 10% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento.....	60
Figura 7.17: Esfuerzos de Von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 15% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento.....	61

Figura 7.18: Esfuerzo y campos de desplazamiento en los reforzantes para los modelos de RVE: a) contenido de 5% en peso de HGM, b) contenido de 10% en peso de HGM y c) contenido de 15% en peso de HGM.	62
Figura 7.19: Diferencia en la magnitud de los esfuerzos soportados por las fibras en los modelos de a) 5% en peso de HGM y b) 15% en peso de HGM.	64
Figura 7.20: Resultados de simulación de carga en dirección y: a) esfuerzos de von mises en el RVE con 10% e.p. HGM, b) módulo en el RVE con 10% e.p. HGM, c) esfuerzos de von mises en el RVE con 15% e.p. HGM y d) módulo en el RVE con 15% e.p. HGM.....	65
Figura 7.21: Diferentes campos de desplazamiento en los diferentes modelos de RVE y la distribución de las HGM: a) compuesto sin esferas, b) contenido de 10% en peso de HGM, c) contenido de 10% en peso de HGM y d) contenido de 15% en peso de HGM.....	67

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Diferentes trabajos de espumas sintácticas y sus propiedades reportadas.	6
Tabla 2.2: Clasificación de refuerzos por familia química y algunos ejemplos, adaptada del libro “Functional fillers for plastics” [34].	10
Tabla 2.3: Propiedades reportadas para espumas sintácticas de Nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio y diferentes concentraciones de HGM [25].....	17
Tabla 6.1: Propiedades físicas de los materiales utilizados en la simulación [45].	35
Tabla 6.3: Valores experimentales de módulo para espumas sintácticas de nylon 6 reforzadas con fibra de vidrio, reportados por Orduña [25].....	43
Tabla 7.1: Desplazamientos resultantes de la simulación por elemento finito para cada modelo de RVE composición Nylon 6 con 14% en peso de fibra de vidrio y concentración de esferas mostrada en la tabla.	47
Tabla 7.2: Valores de módulo promediados para hallar el módulo general de cada modelo correspondiente a los distintos contenidos de HGM.	69
Tabla 7.3: Valores de módulo reportados experimentalmente comparados con los valores obtenidos por simulación.....	69
Tabla 7.4: Comparación entre los valores de módulo experimental, de simulación numérica y las predicciones de algunos modelos lineales.....	70

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis por elementos finitos basado en micromecánica en régimen elástico, de una espuma sintáctica reforzada. La espuma está constituida por una matriz de Nylon 6, fibras de vidrio y esferas huecas de vidrio. El trabajo tiene por objetivo elucidar una percepción física en el mecanismo de reforzamiento del material ya existente a través de elementos finitos, la cual no es posible lograr fácilmente mediante estudios experimentales, y no está ampliamente documentada en la literatura. Para tal objetivo, se estudió el efecto que tiene la presencia de hasta el 15% e.p. de esferas huecas en el módulo de Young del material, mientras se mantiene constante la fracción peso de las fibras en 14%. El modelo numérico se construyó utilizando el software COMSOL Multiphysics.

El modelo asume características geométricas constantes de las esferas y fibras, con una interfase perfecta y buena dispersión de los reforzantes. El supuesto de interfase perfecta se establece porque en el material existente, las esferas y la matriz de nylon están compatibilizadas mediante grupos funcionales para elevar la interacción en la interfase. El error máximo encontrado entre los datos numéricos y experimentales fue de 4.5%.

Los resultados mostraron que el módulo de Young tiene un aumento progresivo conforme aumenta el contenido de esferas huecas, sin embargo, al sobrepasar cierta fracción volumen, el módulo decae. Para el sistema estudiado, la fracción volumen donde se encuentra este punto de inflexión es de 12.5 % e.p., con un módulo de Young máximo de 3.08 GPa. Este efecto está relacionado a la fracción volumen y el espesor de las esferas, el cual es de 0.89 micras.

Se sugiere que el mecanismo de reforzamiento o transferencia de carga elucidado es el siguiente: *A medida que aumenta la cantidad de esferas, estas se dispersan más en la extensión de la matriz. Dicha distribución facilita que las esferas se sitúen en todas las regiones que sufren deformación durante la tensión. Esto hace que el esfuerzo soportado en la matriz y fibras decaiga, a medida que se transfiere hacia las esferas. Sin embargo, la presencia de huecos en las esferas, provoca que estas concentren esfuerzo en la pared interna de las mismas por estar sujetas a una deformación, lo que conlleva a la relajación elástica de las esferas. Con el aumento en la cantidad de esferas, se incrementa el nivel de relajación elástica en el compuesto, emulando la presencia de poros en la matriz, lo que*

finalmente produce una reducción del módulo de Young del compuesto para una cierta cantidad de esferas.

Se determinó que la fracción óptima de esferas de 12.5 % e.p. para fabricar el compuesto con un valor máximo del módulo de Young de 3.08 GPa.

Estos resultados son importantes para el diseño de espumas sintácticas reforzadas para definir propiedades específicas de acuerdo a las demandas de aplicación.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) y al CONACYT por haberme brindado el apoyo para realizar este proyecto.

A mis asesores Jorge Enrique Rivera Salinas y Ernesto Hernández Hernández por su paciencia, su apoyo, por darme ánimos y por llamarme la atención cuando fue necesario. Por estar cerca y comprenderme, por guiarme y por esforzarse tanto como yo en el desarrollo de este proyecto.

A Daniela, mi novia, mi mejor amiga, la persona que diario me inspira a superarme y crecer como persona y como profesionista. Te quiero, te admiro, te amo.

A mi mejor amigo Antonio, por hospedarme, por las risas, por llevarme hasta el CIQA y por brindarme su amistad desde hace más de 8 años. Eres el mejor y un hermano para mí.

A mis amigos Leo, Dafne, Luis y Marco, quienes me brindaron todo su apoyo en los peores momentos de mis días en la maestría, les deseo el mayor de los éxitos.

A Pao, Sergio, Gaby y Arely, amigos que no esperaba encontrar durante este proyecto y que jamás deseo perder.

A mi mamá que con esfuerzo me apoyo, que nunca me dejó, que me alentó desde lejos y nunca dejo de creer en mí.

Al resto de mi familia que siempre me apoyo en mi formación escolar, en especial a mi abuelita Rosy y a mi hermana Mary, que han estado presentes en cada momento importante de mi vida y que siguen estando para mí siempre.

Agradezco enormemente a la Sra. Bertha y al Sr. Daniel quienes no solo han apoyado a mi familia, también son grandes amigos, nunca olvidare todo lo que han hecho por mí y por mi querida madre.

Se agradece el apoyo parcial del Laboratorio Nacional en Innovación y Desarrollo de Materiales Ligeros para la Industria Automotriz (LANIAUTO) a través del proyecto CONACYT 315878.

Se agradece también el apoyo y soporte del proyecto CONACYT # 317097 denominado: Mantenimiento de los equipos de la planta piloto del CIQA para la formación de recursos humanos y el desarrollo de ciencia de frontera de materiales compuestos avanzados.

Finalmente, e igual de importante, le agradezco a todos los miembros del equipo LANIAUTO, quienes me brindaron su apoyo y me extendieron su ayuda cuando la necesité, les deseo lo mejor a todos y cada uno de sus integrantes.

1 Introducción

Desde el descubrimiento de los primeros polímeros a mediados del siglo XX, estos han encontrado cada vez más aplicaciones en prácticamente todas las áreas de la industria. Es así que estos se han estado innovando constantemente ya que para ciertas aplicaciones los polímeros puros no cuentan con las propiedades físicas y químicas de requiere la aplicación; es decir, tienen aplicaciones limitadas. Es por ello que se ha desarrollado ampliamente los materiales compuestos a base de polímeros, lo cuales están abriendo nuevos mercados y se espera que su demanda se incremente significativamente en los próximos años.

Una de las maneras más efectivas de contrarrestar estas limitantes en algunas de sus propiedades, es mediante el uso de cargas o refuerzos que adicionados al polímero se obtiene a lo que se denomina un material compuesto, el cual presenta mejores propiedades que son ideales para una amplia gama de aplicaciones como, por ejemplo: carcasas de teléfonos y electrodomésticos, mangueras y conductos e incluso piezas de ingeniería (como engranajes y autopartes). En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de Ashby donde se compara el esfuerzo que soportan distintos materiales con respecto a su densidad. Al comparar con los compuestos, aleaciones y materiales metálicos, los compuestos poliméricos reforzados presentan resistencia mecánica menor, aunque con un adecuado desempeño y menor densidad, lo que los vuelve atractivos para industrias como la automotriz o aeroespacial. Actualmente estos materiales poliméricos reforzados con fibra de carbono, poliaramidas; están incrementando cada vez más su resistencia específica.

El Nylon 6 (Ny6) es uno de los polímeros que más se ha estudiado y que también tiene diversas aplicaciones y desde 1930 donde se comenzó a utilizar como fibra textil. El Ny6 reforzado con fibras de vidrio responde muy bien a la necesidad de materiales ligeros, rígidos, resistentes al calor, a los químicos y al desgaste mecánico (características deseadas principalmente en autopartes).

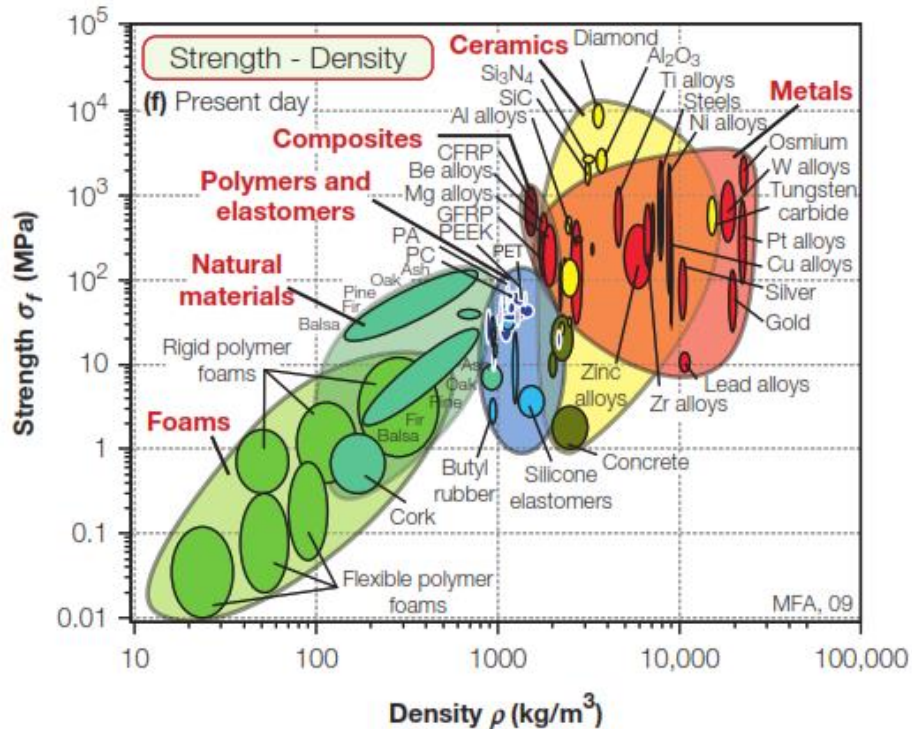


Figura 1.1: Diagrama de Ashby que relaciona la densidad y resistencia de diversos materiales [1].

En algunas ocasiones utilizar un solo refuerzo o carga no es suficiente para conseguir las propiedades o características deseadas en un compuesto, por lo que se opta por agregar un tercer componente que sea capaz de mejorar las propiedades del material hasta obtener la propiedad objetivo. En principio la mayor importancia de formar compuestos poliméricos que contengan más de un solo tipo de refuerzo (compuesto trifásico), está en proporcionar distintas propiedades. Por ejemplo, al integrar microesferas huecas de vidrio en matrices de cualquier material surgen las denominadas espumas sintácticas. En el caso específico de nylon reforzado con fibra de vidrio, las esferas huecas tienen el propósito de reducir la densidad del material. Aunque, se ha observado que las propiedades finales de un compuesto trifásico dependen de: la adhesión interfacial que exista entre las fases, la fracción volumen del refuerzo y el espesor de la pared de las esferas.

Experimentalmente una de las formas de encontrar el desempeño de un material reforzado es a través de la preparación y caracterización de muestras del compuesto que se desea; aunque se ha encontrado que la desventaja de esto es que se requiere de tiempos largos, el costo de los insumos, más los costos energéticos y de los equipos y personal que implica.

En la actualidad el método de elemento finito, el cual es un método numérico, es ampliamente utilizado en el análisis de los compuestos a través de el modelado de materiales centrándose en las propiedades de los constituyentes de una mezcla y las interacciones que tiene estos entre sí [2].

En el modelado de materiales por medio del elemento finito existen diferentes niveles de análisis que se pueden utilizar. En la Figura 1.2 se ilustran las escalas micro (orden de los micrómetros), meso (abarca desde algunos cientos de micrómetros hasta pocos milímetros) y macro (escala visible sin ayuda de equipos de aumento) que son las que permiten evaluar las propiedades de un material o compuesto mediante la simulación. Muchas aplicaciones de esta técnica se encuentran mayormente enfocadas en la mecánica de los materiales a nivel microestructural para poder generar simulaciones que después puedan ser transferidas a la escala macro, por medio de este tipo de análisis es posible relacionar los comportamientos de la microestructura de un compuesto con la respuesta macroscópica que dará [2].

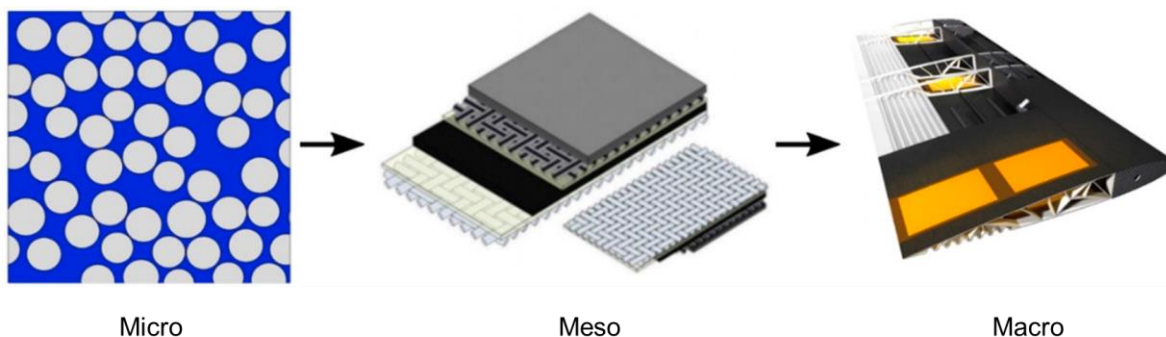


Figura 1.2: Escalas micro, meso y macro en la modelización de materiales por elemento finito (adaptada de Müzel [2]).

En el presente trabajo también consideran los diversos elementos que se encuentran presentes dentro del modelado de materiales por micromecánica; ya que para estudiar la escala micro se debe de tener elementos del tamaño adecuado que permitan un correcto desarrollo del método de manera que se puedan entender las interacciones de los constituyentes y así hallar las propiedades de los materiales y la respuesta macro que estos tendrán debido a la cantidad, distribución y dispersión de los elementos que componen una espuma sintáctica de Ny6 reforzada con fibra de vidrio.

2 Antecedentes

2.1 Materiales Compuestos

Los materiales compuestos son aquellos materiales constituidos por más de una sola fase, en los cuales se espera mejorar las propiedades del material final que los componentes individuales no tienen por sí solos. En el área de los polímeros un compuesto está formado por una matriz polimérica y una fase adicional que puede ser desde otro polímero hasta materiales rígidos que sirven como reforzante como fibras, hojuelas, esferas, etc. [3]. Materiales como los que presenta Avilés et al. [4] donde se usan nanotubos de carbono de paredes múltiples en matrices de vinil éster y polipropileno, o los que presenta Meric [5] fabricados de fibra de vidrio y polimetilmetacrilato, son algunos ejemplos de materiales compuestos poliméricos.

Los materiales compuestos son utilizados ampliamente en la industria, desde la aeroespacial hasta la industria de los alimentos, debido a la variedad de propiedades que se pueden conseguir a través de estos. En la actualidad este tipo de materiales son importantes en el área automotriz, debido a su combinación excepcional de propiedades mecánicas y sobre todo en la reducción de peso que representan con respecto al uso de metales [6].

Los polímeros reforzados con fibras y cerámicos (principalmente fibra de vidrio), así como nanocompuestos con nanoarcillas, son los más utilizados en el desarrollo de piezas automotrices, incluyendo a las fibras naturales. La popularidad de esta clase de compuestos ligeros se ha incrementado en aplicaciones de la industria del transporte [7]. Dentro de la industria automovilística Hallal et al. [6] clasifican las aplicaciones de los compuestos poliméricos de la siguiente forma:

- No estructurales: usados en sistemas de pedales y cubiertas de espejos.
- Semi estructurales: como paneles de carrocería, estructuras frontales y respaldos de asiento.
- Estructurales: como piezas de repuesto moldeadas por inyección y sistemas de parachoques.

2.1.1 Espumas sintácticas poliméricas

Las espumas sintácticas poliméricas son, por definición, un material conformado por una matriz de polímero con espacios vacíos, formados por partículas esféricas huecas que confieren al compuesto un tamaño de poro preestablecido [8] (generalmente microesferas huecas de vidrio o HGM por sus siglas en inglés) y son clasificadas en conjunto con los plásticos espumados [9]. Debido a la mezcla entre una matriz polimérica y partículas esféricas, las espumas sintácticas son también consideradas un material compuesto. La composición y las densidades de estas espumas se pueden predecir, ya que se fabrican adicionando partículas huecas en vez de usar agentes espumantes convencionales, y por lo tanto también se conocen como espumas físicas [9].

Existen distintos polímeros con los cuales se puede formar una espuma sintáctica. Las matrices poliméricas más comunes en su fabricación son: resinas epóxicas, resinas fenólicas, poliimida, poliuretanos, poliésteres, poliamidas, polipropileno y polibutadieno [10].

Entre las propiedades que se pueden aprovechar de las espumas sintácticas se incluyen la baja densidad, alta resistencia hidrostática y a la compresión, además de un buen comportamiento al impacto [11], además de poseer bajas constantes dieléctricas y mayor resistencia a la compresión [12, 13]. En general sus propiedades mecánicas dependen en gran parte de la densidad de la espuma, que a su vez depende de la naturaleza de la matriz y de las microesferas [14]. En la Tabla 2.1 se resumen algunos reportes sobre las propiedades de espumas sintácticas, incluyendo comentarios sobre el desempeño de dichos materiales.

Tabla 2.1: Diferentes trabajos de espumas sintácticas y sus propiedades reportadas.

Autores	Material	Propiedades reportadas	Observaciones respecto del material sin esferas
Huang et al. [15]	Espuma sintáctica epóxica reforzada con fibras cortas de carbono (diferentes concentraciones de HGM y de fibras)	Resistencia a la compresión (17.75-38.07 MPa), flexión (20.57-47.72 MPa) y tensión (17-31.87 MPa).	Las HGM compatibilizadas mejoran las propiedades de amortiguación y disminuyen considerablemente la densidad ($1.08-0.56 \frac{g}{cm^3}$), y las fibras tienen mayor efecto en la mejora del módulo de almacenamiento.
Santhosh et al. [16]	Espuma sintáctica de polibenzoxazina (Diferentes concentraciones de HGM)	Resistencia a la compresión (1.8-4.8 MPa), flexión (3-3.8) MPa) y tensión (1-2.7 MPa).	Las HGM causan una disminución en la densidad ($0.512-0.293 \frac{g}{cm^3}$). La resistencia a la tracción y a la compresión se optimizó y la resistencia a la flexión decreció con el aumento de HGM.
Gupta y Nagorny [17]	Espuma sintáctica de resina epóxica (Diferentes concentraciones de HGM de distintas densidades)	Módulo (1880-2752-3700 MPa) y resistencia a la tensión (57-11 MPa), módulo específico y gráfico esfuerzo deformación.	El módulo de tracción disminuye al agregar mayor cantidad de HGM de baja densidad (no hay cambio significativo en las HGM de mayor densidad). La resistencia a la tracción incrementa con la densidad de las esferas.
Guzmán et al. [18]	Espuma fenólico-epóxica reforzada con nanotubos de carbono (Diferentes tamaños de HGM)	Resistencia a la compresión (40-120 MPa) y al corte (14-22 MPa).	El material presenta aumento en la resistencia a la compresión entre el 20 y 60%, y del 38 al 100% en la resistencia al corte, previo a un tratamiento húmedo/caliente. Después del tratamiento la resistencia aumenta entre 30 y 140% en compresión y de 40 a 150% en corte.
Devi et al. [19]	Espuma sintáctica epóxica (epoxi-alil fenol-bismaleimida; diferentes concentraciones de HGM y distintos tipos de esferas)	Resistencia a la compresión (16-57 MPa), flexión (15-39 MPa) y tensión (10-25 MPa). Módulo de compresión (960-1460 MPa), flexión (2190-3890 MPa) y tracción (900-1500 MPa).	Presenta propiedades mecánicas superiores en comparación con espumas de resinas similares. Agregar las HGM dio como resultado reducción en la resistencia y los módulos de compresión, flexión y tensión.

Las espumas sintácticas son utilizadas en áreas como naval, aeronáutica, aeroespacial y automotriz, generalmente en aplicaciones estructurales livianas [16]. Estas aplicaciones

vuelven a las espumas sintácticas compuestos de interés, lo que lleva a muchas investigaciones sobre el diseño en base a la composición y desempeño del material [20] con la finalidad de que la composición tenga las propiedades más adecuadas en la aplicación que se le vaya a dar.

2.1.2 Diseño de materiales avanzados

Para la correcta y eficiente aplicación de compuestos como lo son las espumas sintácticas, se deben de tomar ciertas consideraciones durante el desarrollo de dichos materiales; para esto es importante recordar que los materiales avanzados son aquellos que están diseñados de manera que pueden responder a las necesidades físicas, químicas y mecánicas que se requieran en determinadas aplicaciones. En primera instancia se debe de diseñar correctamente el material que se desea utilizar, ya que factores como el desempeño mecánico de un compuesto están determinados por la composición de este [20]. La cantidad, el tipo y la distribución de los refuerzos, la compatibilidad entre componentes y las propiedades finales esperadas son los aspectos más importantes a revisar durante el diseño.

Los materiales compuestos avanzados, tienen ventajas claras sobre los materiales convencionales; sin embargo, se debe considerar que tienen limitaciones en sus aplicaciones [21], por lo que el diseño debe tener en cuenta cual será la aplicación final que se le dará al compuesto.

En principio se debe considerar también la forma en que los materiales serán incorporados entre sí. Las técnicas de mezclado, en especial el mezclado mecánico, que es el método por el cual un compuesto es fabricado, y también el equipo en el cual se mezclan es un factor importante, debido a que algunos tipos de refuerzos no soportan altos esfuerzos de corte o bien, está el caso contrario en donde algunos de ellos requieren de altos esfuerzos de corte para ser mezclados adecuadamente sin que se afecte su estructura morfológica [20].

Un último factor a tomar en cuenta en el diseño de un material es si existe una compatibilidad adecuada entre el refuerzo y la matriz de polímero [20]. Cuando esta compatibilidad no existe, es necesario que la carga sea modificada de tal manera que se obtenga una buena interacción matriz-refuerzo. Usualmente la carga se modifica superficialmente para lograr

una mejor adhesión interfacial. Para el caso particular de compuestos sintácticos en los que se utilizan HGM, los silanos son agentes de modificación comúnmente utilizados para compatibilizar los refuerzos internos con polímeros con grupos químicos específicos [22, 23], por ejemplo: con aminopropil trietoxisilano se puede generar compatibilidad entre HGM y Ny6 [24, 25] . Una de las desventajas es que estos son costosos y trabajan más adecuadamente sobre superficies provistas con grupos funcionales hidroxilo tal y como se muestra en la Figura 2.1.

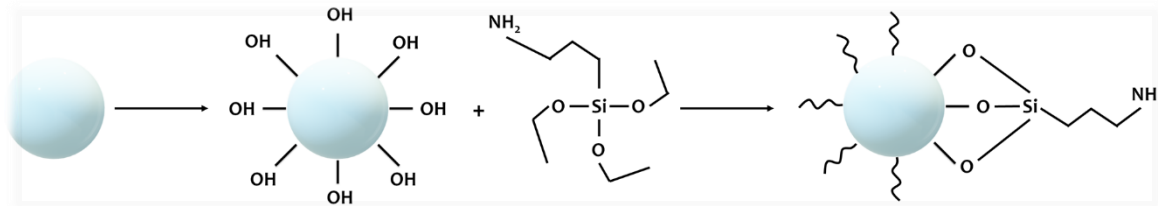


Figura 2.1: Modificación superficial de microesferas huecas de vidrio con silano (aminopropil trietoxisilano-APTES). Adaptado de [26].

Durante el diseño de materiales se debe de considerar que las propiedades deseadas en un compuesto están sujetas a la formulación y el tipo de componentes presentes en la mezcla, tal como menciona Utracki [20]. Esto no solo permite tener una idea del desempeño que tendrá dicho compuesto, también abre la posibilidad de predecir las propiedades que tendrá de acuerdo a las características de sus componentes [27].

2.1.2.1 Predicción de propiedades de materiales compuestos a través de modelos analíticos y semianalíticos

Recientemente el modelado de las propiedades y del desempeño mecánico de un compuesto, ha tomado importancia como herramienta de diseño para el desarrollo de materiales [6]. Entre los métodos para determinar las propiedades de un compuesto, se han desarrollado diversos modelos constitutivos, utilizados para predecir el comportamiento elástico obtenido por la sinergia de los materiales en un compuesto. Estos son los modelos que analizan la información de esfuerzo deformación que existe en materiales elásticos [28]. Los modelos

pueden ser analíticos o semi analíticos, los cuales analizan la información de las propiedades elásticas de polímeros y su comportamiento al mezclarlos con elementos reforzantes como fibras de vidrio o naturales [29], aunque están restringidos a una determinada cantidad de carga en el compuesto, solo consideran dos fases con distribución homogénea y características geométricas constantes, ya que de lo contrario no es posible lograr una solución matemática [30].

Los modelos analíticos y semianalíticos se encuentran sujetos a soluciones matemáticas lineales, por lo que no se adaptan a compuestos que incluyan más de una fase dispersa como el uso de esferas y fibras al mismo tiempo, ya que su geometría es diferente. Estos modelos son utilizados por Wang et al. [28] y por Ziyang et al. [31] en cuyos trabajos se consideran sistemas simples que pueden ser resueltos mediante expresiones matemáticas lineales para hallar las propiedades elásticas de polímeros termoplásticos reforzados con fibras.

En el análisis de las propiedades elásticas a partir de principios variacionales consideran principalmente las condiciones a las que se encuentra sometido el material que se analiza, así como las fases continua y dispersa y sus factores geométricos [32].

Los modelos obtenidos a partir de principios variacionales en la teoría lineal de elasticidad permiten estimar con elevada precisión los límites superiores e inferiores del módulo elástico efectivo, especialmente cuando la relación de módulos elásticos de las distintas fases es baja para cualquier cantidad de reforzante con geometría circular. Específicamente, estos modelos no determinan un valor del módulo elástico, sino que proporcionan un rango dentro del cual está dicho módulo [33].

Es necesario recordar que los modelos deben prepararse de manera que puedan acercarse lo más posible al comportamiento real de un material, por lo que cada uno de estos debe tomar en cuenta diversos factores. Lo más importante en las consideraciones es la fracción volumen de la partícula de refuerzo, así como los factores físicos y geométricos de las partículas de refuerzo, ya que estos serán los determinantes de las propiedades finales en el compuesto [34].

2.1.3 Polímeros reforzados

Dentro de los polímeros compuestos, los polímeros reforzados son una mezcla de una matriz polimérica con una fase dispersa orgánica o inorgánica de cierta geometría como fibras o láminas, que pretenden formar un compuesto de dos o más fases y que presenta propiedades mecánicas más eficientes en función de la fase dispersa [35] como mayor resistencia a la tensión, a la flexión o a la compresión.

Existen distintos tipos de refuerzos, tales como fibras sintéticas y naturales, hojuelas, nanoarcillas, nanotubos de carbono, talco, caolín, carbonato de calcio, rellenos esféricos y bioactivos [35]. En la Tabla 2.2 se clasifican los distintos tipos de refuerzos más utilizados en los polímeros de acuerdo con su naturaleza química.

Tabla 2.2: Clasificación de refuerzos por familia química y algunos ejemplos, adaptada del libro “*Functional fillers for plastics*” [35].

Familia química		Ejemplos
Inorgánicos	Óxidos	Vidrio (fibra, esferas, esferas huecas y hojuelas), MgO, SiO ₂ , Sb ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ y ZnO
	Hidróxidos	Al(OH) ₃ y Mg(OH) ₂
	Sales	CaCO ₃ , BaSO ₄ , CaSO ₄ y fosfatos
	Silicatos	Talco, mica, caolín, montmorillonita y asbestos
	Metales	Boro y acero
Orgánicos	carbón/grafito	Fibras y hojuelas de carbón/grafito, nanotubos de carbono, grafeno y negro de humo.
	Polímeros naturales	Fibras de celulosa, fibras de madera, algodón, sisal y almidón
	Polímeros sintéticos	Poliamida, poliéster, aramida y fibras de polivinil alcohol

Algunos ejemplos de aplicaciones y demandas de los compuestos poliméricos reforzados son mencionadas por Hargitai y Rác [36] como los polímeros reforzados con fibra de carbono mayormente utilizados en la industria automotriz, especialmente en partes automotrices para autos deportivos que requieran ser más ligeros; los polímeros reforzados con fibra de vidrio también suelen ser ampliamente empleados en autopartes debido a la reducción de peso y rigidez que proveen al polímero; otros ejemplos son polímeros como PEEK (polieteretercetona), HDPE (polietileno de alta densidad) o UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular) que al mezclarse con partículas finas de SiO₂ son aplicados en el área biomédica y de implantes.

Los compuestos exhiben propiedades que son isotrópicas o anisotrópicas dependiendo de la aplicación a desarrollar [37]. La economía de costos puede estar asociada con el método de procesamiento. En el caso de piezas de bajo nivel de producción a piezas de alta producción, el proceso se vuelve altamente costoso [38]. Debido a esto es necesario definir la aplicación que se le dará al material, de esta manera también se establece el reforzamiento del compuesto.

2.1.3.1 Principales aplicaciones

Las aplicaciones dadas a cada compuesto son muy específicas ya que son diseñados para cumplir con una necesidad única o un grupo de necesidades, como es el caso de los polímeros reforzados con fibra de vidrio que en general son utilizados en estructuras de ingeniería [39] como autopartes, piezas de vehículos marítimos y aeronáuticos como puertas, ventiladores, aislantes, piezas de la estructura, partes externas de los vehículos (terrestres, marítimos y aéreos), piezas de transbordadores espaciales, columnas en puentes y estructuras de edificios, refuerzos en estructuras metálicas, reparación de piezas y estructuras y muchas más aplicaciones [36].

Los polímeros reforzados con este tipo de materiales dan lugar a compuestos con propiedades muy convenientes para su aplicación, como materiales estructurales con propiedades mecánicas, térmicas y de barrera mejoradas, conductividad eléctrica y retardo a la flama, [40] que pueden ser usados en diferentes áreas como lo menciona Hargitai [36] desde industrias aeronáuticas y de transporte hasta especialidades como la biomedicina y los implantes.

2.1.3.2 Principales limitaciones

Debido a las diferentes aplicaciones que tienen y a las propiedades que se buscan, es necesario tener presente que los materiales compuestos presentan ciertas limitaciones como resultado del tipo e intensidad de interacciones entre las fases del material. Las propiedades de un compuesto dependen de la cantidad de refuerzo que se encuentre en la mezcla, así como de factores físicos (forma, dimensiones y área superficial) y químicos (composición química de la superficie). En situaciones en las que estas características son poco favorables para el desempeño mecánico del compuesto, los rellenos son considerados un aditivo en lugar de un refuerzo [40].

Los refuerzos deben de tener la propiedad de incrementar las propiedades mecánicas de un polímero. Un factor para tomar en cuenta es que el desempeño que tienen depende en gran medida de su distribución y dispersión en la matriz. En el caso de los refuerzos con morfología fibrilar, la propiedad mecánica siempre se verá reforzada en la dirección en que estén orientadas las fibras.

Al utilizar refuerzos es fundamental considerar que en un proceso real jamás se obtendrá una distribución ideal (una distribución uniforme o una orientación completamente paralela a la dirección del esfuerzo en caso de fibras) lo cual pone un límite en los valores de las propiedades modificadas [34]. Por tanto, es importante considerar la concentración adecuada de reforzante que se debe de utilizar en un compuesto, ya que al utilizar muy poco se podría obtener una mejor distribución con un cambio insignificante de las propiedades, y al utilizar una alta concentración se pierde la distribución óptima y se genera la tendencia de formar aglomerados [16].

Es por estas razones que al recurrir al uso de materiales compuestos es necesario tener presente que cada uno tendrá una respuesta mecánica en función de del tipo de materiales implicados en la mezcla y cumplan con una sinergia óptima. Para esto, como ya se mencionó previamente debe de existir compatibilidad entre el refuerzo y la matriz, una distribución óptima, una concentración adecuada del reforzante y que este tenga la geometría adecuada. En caso contrario las propiedades obtenidas pueden resultar inferiores con respecto a la matriz.

2.1.4 Compuestos polímero-fibra de vidrio

Los compuestos poliméricos reforzados con fibra de vidrio han sido de los más estudiados y se utilizan ya en diversas aplicaciones. La fibra de vidrio ha tenido éxito como un material con propiedades de reforzamiento que, incluso tiene ventajas sobre otro tipo de fibras como las fibras de carbono debido a su relativo bajo costo, alta resistencia química y aislamiento eléctrico [39].

La gran demanda que existe en los compuestos reforzados por fibras es debido a la amplia gama de aplicaciones en los diversos sectores de la industria. Estos materiales tienen propiedades que los vuelven atractivos para su implementación desde artículos de cocina y deportes hasta piezas estructurales de ingeniería automotriz y aeroespacial [41]. Hargitai [36] habla sobre la resistencia y el bajo peso que la fibra de vidrio confiere a los polímeros para ser utilizados en piezas automotrices, aunque no reporta valores específicos si no generalidades, por otra parte Yoo [42] si reporta que al añadir hasta un 30% en peso de fibras de vidrio en una matriz de Ny6 con montmorillonita pueden incrementar los valores de resistencia a la tensión desde 87 hasta 145 MPa.

En muchos casos el refuerzo mecánico no es la única característica que se busca al formar un compuesto [35] sino que también se busca modificar otras propiedades como la densidad o la conductividad [25], lo cual se puede lograr al incluir otros componentes como esferas huecas a la mezcla del compuesto.

2.1.4.1 Compuestos polímero-fibra de vidrio-HGM

En una espuma sintáctica convencional, la cual únicamente incluye la matriz principal y partículas huecas, los refuerzos adicionales les confieren propiedades más allá de las que ya poseen [43]. Por ejemplo, John [11] que reportó un incremento en la resistencia a la tensión desde 12.5 hasta 17 MPa al añadir 16% en peso de fibra de vidrio en una matriz de éster cianato. Aunque por sí solas las espumas sintácticas tienen un peso adecuado para aplicaciones estructurales en vehículos navales, automotrices y aeroespaciales [44, 45] un gran incremento en la fracción volumen de las partículas huecas conlleva una reducción considerable en la resistencia de la espuma [46, 47], por ejemplo; Devi [19] reporta cambios importantes en las propiedades mecánicas de una espuma sintáctica de resina de epoxi alil

fenol bismaleimida, pasando de 57 MPa al tener un contenido del 40% en peso de esferas huecas hasta un valor de 15 MPa al contener 70% de microesferas en resistencia a la tensión demostrando que con contenidos altos de esferas, la resistencia a la tensión disminuye.

La integración de fibras de vidrio en compuestos de matriz polimérica-partículas huecas es una forma adecuada de mejorar propiedades como la resistencia a la flexión [48] así como incrementar la rigidez del material cuando la fibra se orienta en la dirección de carga [49]. Karthikeyan [50] mostró como cambia la rigidez de una espuma sintáctica epóxica reforzada con fibra de vidrio, al pasar de un módulo de flexión de 2.1 GPa con una composición de 0.9 y 9.6 % en volumen de fibras y esferas huecas, respectivamente, hasta un valor de 2.9 GPa en el módulo de flexión cuando las concentraciones son 4.5 y 6 % en volumen de fibras y esferas respectivamente.

En los compuestos polímero-fibra de vidrio-esferas huecas es normal que las propiedades se puedan modificar principalmente en cuanto a densidad y rigidez, aunque también se ha observado una mayor resistencia a la compresión, en parte debido al gas atrapado en las esferas y a la distribución de estas en la matriz principal. Se ha encontrado en estudios anteriores [50–52] que en esta mezcla de componentes existe un adecuado desempeño y mayores valores en resistencia a la compresión cuando se utilizan fibras cortas de 6 mm de longitud.

2.1.4.2 Nylon 6 reforzado con fibra de vidrio y HGM

La mezcla de nylon con fibra de vidrio es una combinación que históricamente ha logrado excelentes propiedades desde 1972, cuando se fabricó el primer ventilador de nylon reforzado de fibra de vidrio, y que reemplazó al ventilador fabricado de metal logrando una reducción en peso del 60% con respecto al metálico [53].

A pesar de que la fibra de vidrio es considerada como un refuerzo muy eficiente, las propiedades mecánicas que adquiere el material depende también de la matriz polimérica y de la adhesión interfacial que existe entre ambas fases [54].

El Ny6 reforzado con fibra de vidrio típicamente aumenta su resistencia y rigidez, aunque su tenacidad y ductilidad disminuyen por la presencia de la fibra [55]. Por esta razón en las

distintas aplicaciones de este compuesto Ny6 - Fibra de vidrio se busca que exista un adecuado balance entre las propiedades mencionadas previamente. En las aplicaciones comerciales de estos materiales suelen contener hasta un 45% de fibra de vidrio [56].

Por otra parte, el refuerzo de Ny6 con microesferas huecas de vidrio afecta directamente en la densidad del material final. Las microesferas huecas de vidrio (HGM) son partículas formadas de dióxido de silicio (SiO_2) que generalmente se usa como relleno en una matriz de algún otro material. Éstas tienen una baja densidad ($0.16\text{-}0.5 \text{ gr/cm}^3$) y a la compresión (500-6000 psi), así como buenas propiedades de aislamiento térmico ($0.06\text{-}0.16 \text{ W/mK}$ a 20°C) [57–59].

En conjunto el refuerzo de una matriz de poliamida tanto con fibras de vidrio como con microesferas huecas propician disminución del peso del compuesto final y también un aumento en la resistencia. Sin embargo, el cambio en estas propiedades depende de la fracción volumen de microesferas de vidrio, así como el diámetro de estas [60].

En la Figura 2.2 se encuentra una imagen tomada con un microscopio electrónico de barrido (SEM), donde se muestra una matriz de Ny6 que contiene esferas huecas de vidrio y fibras de vidrio.

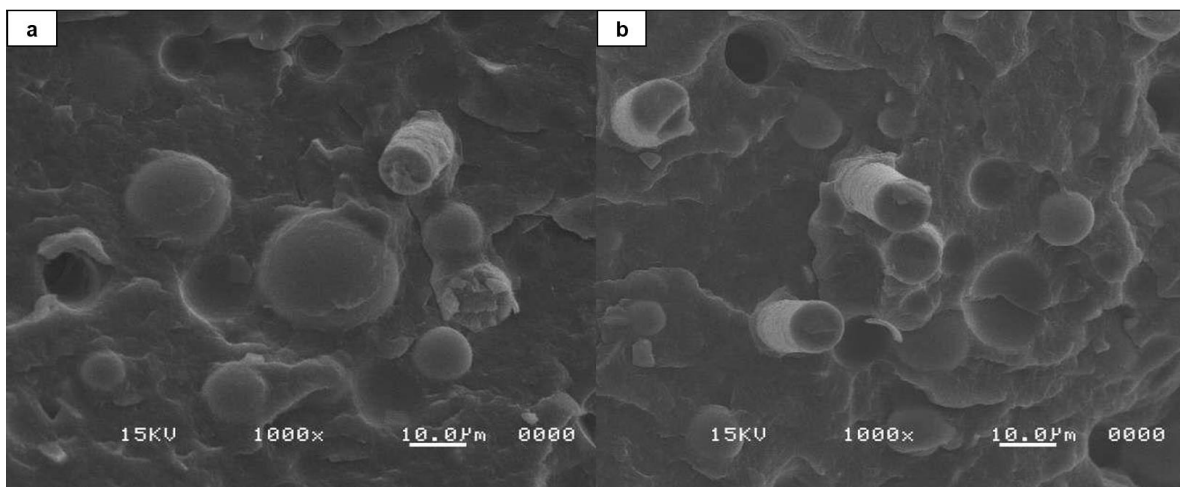


Figura 2.2: Imágenes de SEM de una espuma sintáctica compuesta de Ny6 reforzado con 14% en peso de fibra de vidrio y contenido del 10% en peso de HGM [25]: a) Buena adhesión interfacial y b) poca adhesión interfacial.

Como se menciona en la sección 2.1.2 algunos refuerzos requieren de modificaciones con la finalidad de mejorar la interacción entre matriz y refuerzo. En la imagen de la Figura 2.2a se aprecia que las esferas huecas se encuentran cubiertas de la matriz de nylon (producto de una modificación con silanos [25]) mientras que en la Figura 2.2b las esferas tienen una superficie lisa lo cual es una evidencia de la falta de adhesión interfacial con la matriz.

El otro factor que es determinante en el desempeño mecánico que tendrá un compuesto es la geometría y relación de geometría que tienen los refuerzos así como el espesor de pared de las esferas huecas, su tamaño y la fracción volumen presente [34]. En la Figura 2.3 se presentan imágenes de microscopía electrónica de barrido de espumas sintácticas a diferentes concentraciones de microesferas huecas de vidrio.

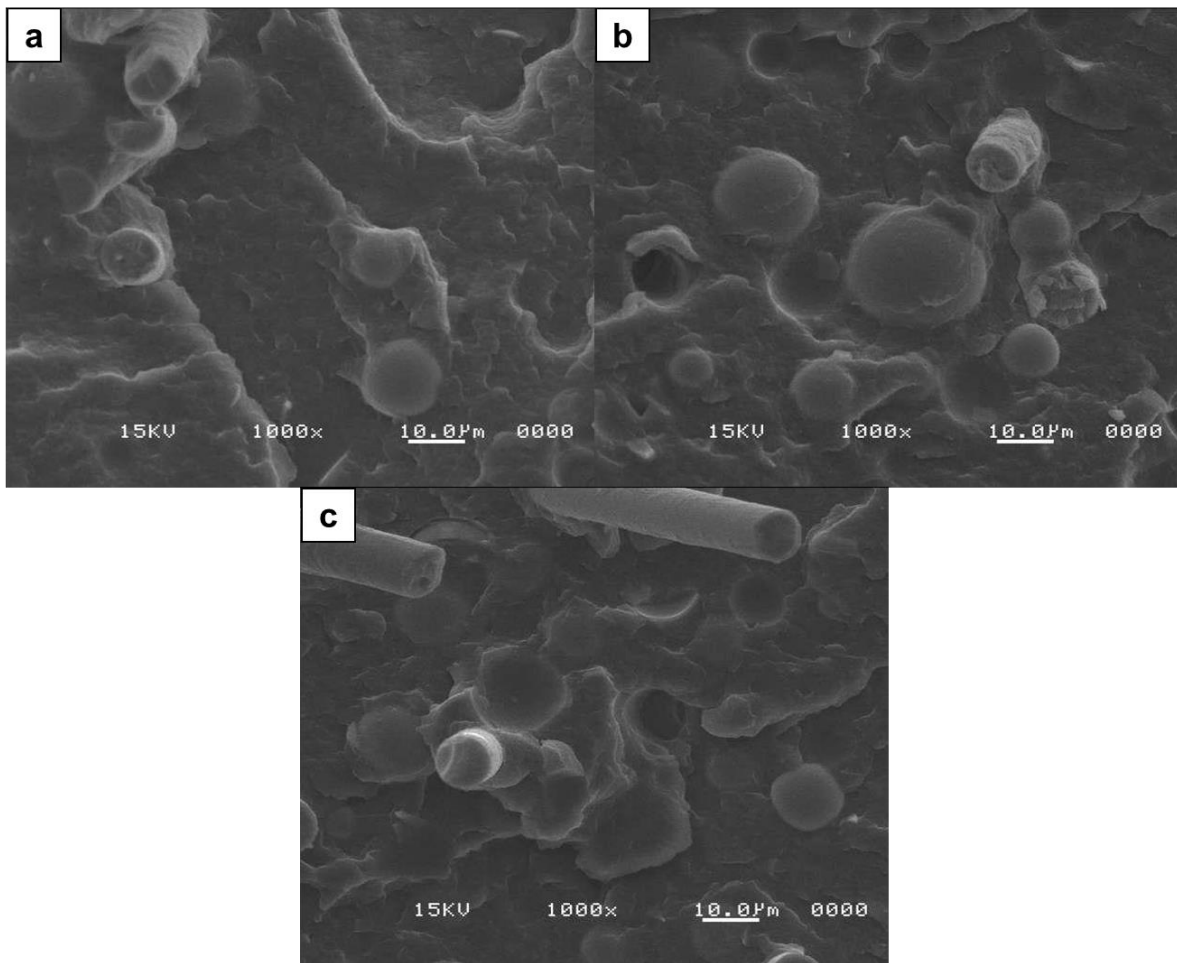


Figura 2.3: Imágenes de SEM de espumas sintácticas de Ny6 reforzadas con fibra de vidrio con diferentes concentraciones de HGM [25]: a) 5% en peso, b) 10% en peso y c) 15% en peso.

En la Figura 2.3a, b y c se aprecia con facilidad la presencia de esferas en el compuesto conforme aumenta la cantidad de éstas. En la Tabla 2.3 se pueden apreciar las propiedades de módulo y densidad que se reportaron en [25] para estas formulaciones de Ny6. El aumento de la concentración de esferas ocasionó que la densidad en el compuesto disminuyera, mientras que el módulo incrementó y luego a una concentración de 15% en peso de HGM disminuye.

Tabla 2.3: Propiedades reportadas para espumas sintácticas de Ny6 reforzadas con fibra de vidrio y diferentes concentraciones de HGM [25].

Concentración de HGM en el compuesto.	Módulo	Densidad
<i>% en peso</i>	MPa	kg/m ³
5	2992.6	1126.2
10	3081.5	1100.1
15	3075.6	1064.5

2.2 Micromecánica

Los materiales compuestos en la actualidad son objeto de estudio debido a las distintas características que poseen y que han sido mencionadas en la sección 2.1. La popularidad de estos materiales ha llevado a explotar su desarrollo en la industria, causando la necesidad de optimizar el diseño y producción de compuestos útiles.

La necesidad de predecir las propiedades de un compuesto para poder optimizar las formulaciones conduce al uso o desarrollo de nuevas herramientas. Tal es el caso de los modelos de micromecánica, que buscan también la predicción adecuada de las propiedades de compuestos [61].

Cabe mencionar que dentro del enfoque de análisis de materiales compuestos por micromecánica, para la predicción de las propiedades efectivas elásticas como el módulo de Young, coeficiente de Poisson y esfuerzo cortante, también es posible determinar propiedades térmicas como el coeficiente de expansión térmica, el cual está relacionado con el campo de tensiones mecánicas, y es importante para el diseño de materiales ya que éste

juega un papel importante en la estabilidad térmica y/o dimensional de un producto sujeto a variaciones de temperatura [33].

Este método se basa en las características de la microestructura que posee el compuesto; toma un volumen representativo (descrito en la sección 2.2.4.1) para realizar el análisis y la predicción de las propiedades mecánicas efectivas del material. Los modelos de micromecánica se pueden desarrollar bajo distintos supuestos como: que la matriz es continua e isotrópica con respecto al módulo elástico, en lugar de una red anisotrópica de cadenas poliméricas discretas y orientadas. También se supone que las partículas de relleno son idénticas en tamaño y forma, y que cada partícula de relleno individual tiene un módulo isotrópico. La última suposición es probablemente correcta, pero las partículas de relleno muestran una amplia gama de formas y tamaños, así como el potencial de fuertes interacciones entre relleno y relleno. También se supone que el relleno está perfectamente unido a la matriz, lo que debería ser aproximadamente cierto para muestras de tamaño muy pequeño [61].

Por otro lado, en los modelos de micromecánica numéricos también es posible considerar aspectos más complejos asociados a defectos en la microestructura, inherentes al procesamiento del material, como son refuerzos fracturados con variaciones geométricas, interfases defectuosas, esfuerzos térmicos residuales, entre otros. La descripción más completa de una microestructura de un material compuesto, puede realizarse en general, empleando microtomografía. Esta información construye los dominios de solución o geometría, la cual es un input al modelo para el estudio completamente detallado del material. Es importante mencionar que el uso de una microtomografía para la construcción del dominio computacional requiere recursos computacionales de alto rendimiento. Además, bajo este enfoque de estudio, es necesaria la fabricación del material, mientras que utilizando enfoques más sencillos como la construcción de microestructuras sintéticas es posible diseñar un material sin necesidad de experimentación física.

A continuación, se presentan algunos de los modelos que se aplican en los análisis de micromecánica.

2.2.1 Regla de las mezclas

Los modelos de micromecánica pueden representar un gran avance en cuanto a la fabricación se refiere. Uno de los modelos más comunes es el denominado como regla de las mezclas [62] que consta de una ecuación que relaciona directamente el módulo de Young con la fracción volumen de los componentes, además de suponer la misma tensión tanto en la matriz como en el refuerzo [63–65].

$$E_C = E_m\phi_m + E_f\phi_f \quad [1]$$

La ecuación 1 representa el modelo de regla de mezclas en sistemas binarios (matriz-refuerzo) aunque también existe una ecuación (ecuación 2) para sistemas de matrices con dos tipos de refuerzo:

$$E_C = E_m\phi_m + E_{f1}\phi_{f1} + E_{f2}\phi_{f2} \quad [2]$$

Ambas ecuaciones son una relación directa donde E_C es el módulo de Young del compuesto, E_m el módulo de la matriz de polímero, E_{f1} y E_{f2} son los módulos de los refuerzos, ϕ_m es la fracción volumen de la matriz, ϕ_{f1} y ϕ_{f2} la fracción volumen de los refuerzos.

En el trabajo de Yerbolat et al. [66] se realizan análisis mediante simulación utilizando la regla de las mezclas para predecir propiedades de compuestos de PEEK con Ny6 reforzado, Ny6 con retardante a la flama y de Ny12 con Ny6 reforzado, usando los métodos de análisis por elemento finito (descrito en la sección 2.2.5) y simulación de Montecarlo, presentando diferencias de hasta 24.75% entre los resultados obtenidos por ambos métodos. En este trabajo se determina que las predicciones son efectivas para compuestos con poca diferencia en las propiedades con respecto a la matriz.

2.2.2 Modelo de Hashin-Shtrikman

El modelo de Hashin-Shtrikman es uno de los que consideran la escala microestructural de los compuestos para hallar el desempeño macroscópico de estos. Este modelo se basa en la isotropía macroscópica y la cuasi-homogeneidad del compuesto, además de no estar limitado por la forma del refuerzo [67–69].

Dependiendo de los valores de rigidez en el material de referencia con respecto al refuerzo, el modelo considera la existencia de límites superiores e inferiores en las propiedades que se pueden predecir, calculadas de la siguiente manera:

$$K_C^S = K_p + \frac{1 - \phi}{\frac{1}{K_m - K_p} + \frac{3\phi}{(3K_p + 4G_p)}} \quad [3]$$

$$K_C^I = K_m + \frac{\phi}{\frac{1}{K_p - K_m} + \frac{3(1 - \phi)}{(3K_m + 4G_m)}} \quad [4]$$

$$G_C^S = G_p + \frac{1 - \phi}{\frac{1}{G_m - G_p} + \frac{6\phi(K_p + 2G_p)}{5G_p(3K_p + 4G_p)}} \quad [5]$$

$$G_C^I = G_m + \frac{\phi}{\frac{1}{G_p - G_m} + \frac{6(1 - \phi)(K_m + 2G_m)}{5G_m(3K_m + 4G_m)}} \quad [6]$$

Donde K_p es el módulo de compresión de la carga, G_p es el módulo de corte de la carga, K_m es el módulo de compresión de la matriz, G_m es el módulo de corte de la matriz, K_C es el módulo de compresión del compuesto, G_C es el módulo de corte del compuesto, y los superíndices "S" e "I" se refieren a los límites superior e inferior.

Wong y Bollampally [67] demuestran en su trabajo que para el modelo de Hashin-Shtrikman el límite inferior es el que mejor se ajusta en la predicción del módulo de compuestos epóxicos rellenos con partículas de sílica, aunque solo para bajas concentraciones de refuerzo.

2.2.3 Modelo de Gupta

Gupta [70] presenta el esquema diferencial, el cual se aplica para derivar expresiones para el módulo de Young y la relación de Poisson de espumas sintácticas que contienen una fracción

de alto volumen de microesferas. Primero, se determinan las propiedades elásticas en el caso de una dispersión infinitamente diluida de partículas huecas. Luego se utiliza un esquema diferencial para extrapolar las propiedades efectivas de las espumas sintácticas para una amplia gama de fracciones de volumen de microesferas. Este es un método adecuado para hallar las propiedades elásticas para compuestos que incluyen microesferas huecas [71, 72].

El modelo considera el módulo de Young (E) y la relación de Poison (ν) a través de las ecuaciones 7 y 8:

$$E = E_m(1 + f_E(E_b, \nu_b, E_m, \nu_m, \eta)\phi) \quad [7]$$

$$\nu = \nu_m(1 + f_\nu(E_b, \nu_b, E_m, \nu_m, \eta)\phi) \quad [8]$$

Es el mismo Gupta [70] quien investiga el efecto del espesor de pared de esferas huecas en una espuma sintáctica epóxica con concentraciones de 30, 40, 50 y 60% en peso de esferas, en este trabajo reporta que su esquema diferencial es adecuado para determinar el módulo de un compuesto que está formado únicamente por una matriz y esferas huecas.

2.2.4 Modelo de Halpín-Tsai

El modelo de Halpin-Tsai [73] consta de ecuaciones para la predicción del módulo que relacionan esta propiedad con la relación L/D en compuestos reforzados con fibras. Además, este modelo considera la disposición de las fibras orientadas (ecuaciones 9 y 10) y aleatorias (ecuaciones 11-13). Este modelo permite analizar el efecto de la relación de aspecto de fibras en una matriz, aunque se encuentra limitado a compuestos reforzados con fibras y no es capaz de evaluar el módulo para materiales rellenos de geometrías diferentes.

$$\frac{E}{E_m} = \frac{1 + \xi_f \eta \nu_f}{1 - \eta \nu_f} \quad [9]$$

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi_f} \quad [10]$$

$$\frac{E}{E_m} = \frac{3}{8} \left[\frac{1 + 2(\xi_f)\eta_L\nu_f}{1 - \eta_L\nu_f} \right] + \frac{5}{8} \left[\frac{1 + 2\eta_T\nu_f}{1 - \eta_T\nu_f} \right] \quad [11]$$

$$\eta_L = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2\xi_f} \quad [12]$$

$$\eta_T = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2} \quad [13]$$

En las ecuaciones 9-13 E es el módulo del compuesto en Pa, E_m es el módulo de la matriz y E_f el módulo de las fibras en Pa, ξ_f es el factor de forma L/D y ν_f es la fracción volumen de las fibras [74].

Halpin y Kardos [73] evalúan el efecto de la relación de aspecto de fibras de vidrio orientadas, demostrando poca variación entre los valores obtenidos por el modelo y los valores experimentales en compuestos de caucho reforzados con fibra de nylon. Mientras que Ali y Sen [74] encuentran una diferencia de hasta 54.5% de diferencia entre valores de módulo calculados y experimentales para compuestos de hidroxiapatita reforzados con nanotubos de nitruro de boro.

2.2.5 Análisis por elemento finito

Los modelos varían sustancialmente en suposiciones, aplicabilidad, precisión, complejidad e integridad, además de las consideraciones en la concentración y características físicas de los constituyentes en un compuesto. Cuando se usa un modelo apropiado para predecir el comportamiento constitutivo compuesto, el análisis por elemento finito (FEA) se convierte en una herramienta poderosa para predecir la respuesta termo-mecánica de los materiales [75].

El método de elemento finito considera ampliamente las propiedades geométricas y estructurales de los rellenos que se utilizan en el compuesto formado [76]. Tomando en cuenta estos factores (incluidos el espesor de pared y la relación de aspecto en los refuerzos)

el FEA es bastante útil cuando se trata de optimizar la preparación de un compuesto al predecir las propiedades finales del material y la combinación adecuada de polímero-refuerzo para lograr propiedades definidas o requeridas en aplicaciones específicas.

La simulación numérica por elementos finitos es una herramienta de ciencia e ingeniería con la cual es posible predecir el comportamiento de un sistema, a partir de la solución numérica a un modelo matemático, formulado con base en las leyes de conservación, relaciones constitutivas y condiciones específicas o de frontera, que definen la solución única que describe el comportamiento de un sistema o proceso particular [33].

2.2.4.1 Enfoques principales

El análisis por elemento finito (FEA) toma en cuenta dos enfoques principales, a partir de los que forma el análisis predictivo de propiedades: volumen representativo y celda unitaria.

Volumen Representativo

En los compuestos poliméricos reforzados (ya sea con fibras o con esferas) es común que la distribución de las partículas tenga tendencia a la uniformidad (en sistemas matriz-refuerzo compatibles) aunque no exista una distribución completamente homogénea, ya que entre cada refuerzo la distancia que los separa siempre será diferente [77]. Debido a esto el análisis por elemento finito considera una pequeña parte de un material como una muestra representativa a la que se le nombra “elemento de volumen representativo” (RVE por sus siglas en inglés). En la Figura 2.4 se esquematiza la forma de este volumen representativo, el cual es una pequeña parte del volumen del compuesto, que puede representar la distribución de los constituyentes en una mezcla homogénea y que se considera capaz de considerar la distribución en cualquier parte del volumen total de una mezcla.

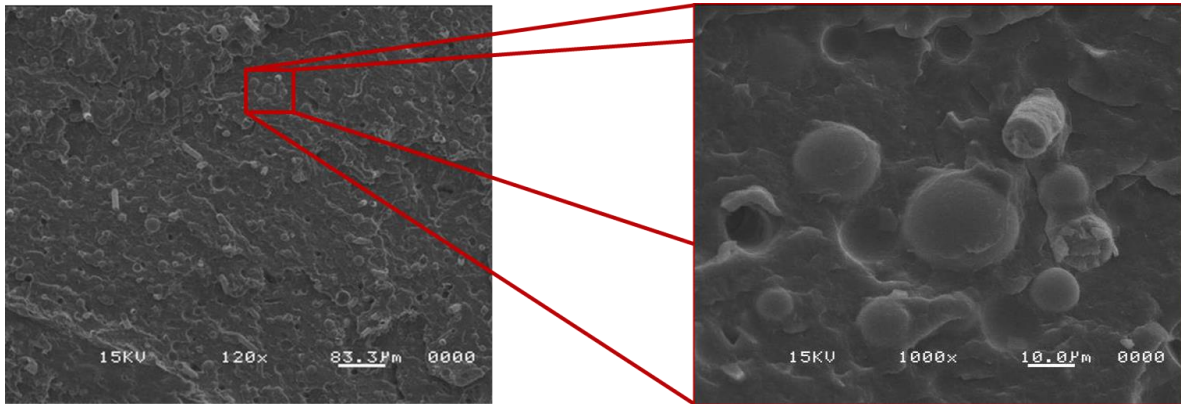


Figura 2.4: Selección del volumen representativo en una muestra de una espuma sintáctica de Ny6 reforzada con fibra de vidrio.

El volumen representativo es un enfoque que permite tener una predicción adecuada de propiedades en base a la distribución de las partículas reforzantes en el polímero, cabe mencionar que se debe considerar un tamaño adecuado para el espacio que se tomará como referencia, ya que un tamaño demasiado grande, especialmente en compuestos con una gran cantidad de refuerzos, demandara una gran capacidad de cómputo durante la simulación en software [47].

Celda Unitaria

De acuerdo a Drugan y Willis [77], el elemento de volumen representativo (RVE por sus siglas en inglés) más pequeño para el que podría aplicarse una teoría constitutiva "efectiva" macroscópica es uno que sea lo suficientemente grande como para ser estadísticamente representativo del compuesto, es decir, para incluir de manera efectiva un muestreo de todas las configuraciones microestructurales posibles que ocurren en el compuesto. La micromecánica considera que el RVE más pequeño es la celda unitaria ya que este toma en cuenta las interacciones entre partículas [78] y como se muestra en la Figura 2.5 es posible considerar distintas configuraciones entre las partículas que conforman el compuesto.

La celda unitaria además considera ciertos elementos para poder representar la composición de una mezcla, al ser el elemento más pequeño que se pueda determinar en una mezcla, debe de representar la periodicidad en el volumen total, es decir debe ser capaz de representar la

distribución adecuada del compuesto si estas celdas se colocaran una junto a la otra para formar un elemento mayor, tal como menciona Carolan [78], al ser un elemento muy pequeño puede abordar las interacciones partícula – partícula.

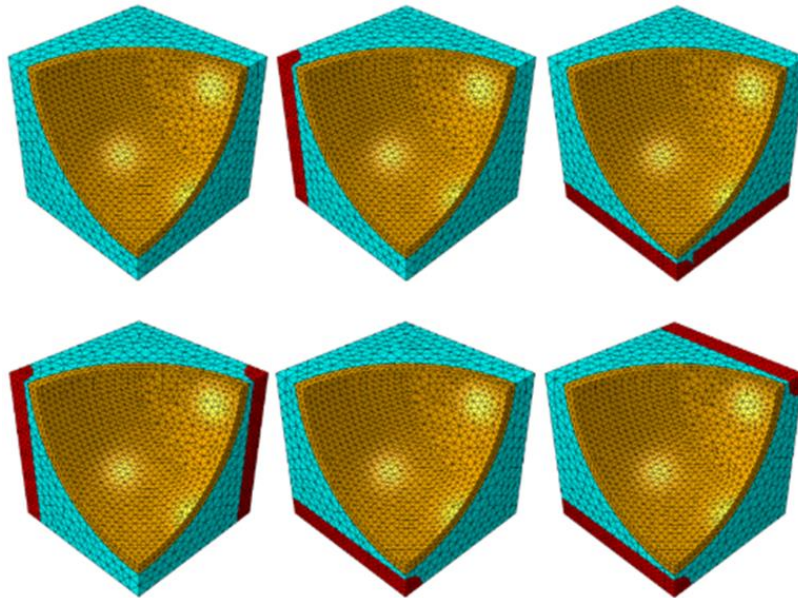


Figura 2.5: Representación de una celda unitaria de un compuesto de polímero (azul) - fibra (rojo) - esferas huecas (naranja) y las diferentes configuraciones de posición que puede tener [79].

La celda unitaria es un enfoque que permite analizar con más facilidad las propiedades que tendrá un material con respecto a la relación de aspecto y el espesor de pared (en el caso de esferas huecas) de los refuerzos en una matriz. Además, siendo el RVE más pequeño, el requerimiento computacional para resolver el modelo es mucho menor que en un volumen representativo.

2.3 Simulación

La simulación es una herramienta que ha sido muy útil y eficaz para la predicción de sucesos de acuerdo a variables previamente conocidas, además permite la optimización de procesos en industrias como la automotriz y aeroespacial [80]. El análisis por elemento finito es una herramienta de simulación que reduce significativamente el tiempo necesario para obtener

resultados y poder compararlos, resulta en la optimización de un proceso. Las etapas de un proceso básico de simulación se muestran esquemáticamente en la Figura 2.6.

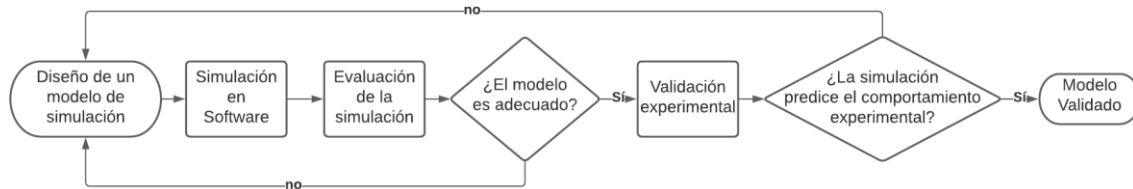


Figura 2.6: Diagrama de flujo para un proceso de simulación, adaptado de [64].

Al aplicar procesos de simulación como el elemento finito, se pueden generar ahorros en el desarrollo y producción de materiales, al permitir la predicción del comportamiento de un compuesto [80].

2.3.1 Software

Un elemento importante de la simulación de procesos es la selección de la herramienta ideal para lograr cumplir con los objetivos establecidos. Si bien el hecho de simular ya representa un ahorro de tiempo y costos, hay que considerar que aún puede haber errores o se pueden plantear consideraciones que extiendan el proceso, como se muestra en la Figura 2.6 durante las iteraciones basadas en el usuario o en los resultados. Es por ello que debe seleccionarse el software adecuado para minimizar estos errores y tener un proceso óptimo.

2.3.1.1 COMSOL Multiphysics

Uno de los softwares que más ayuda han proporcionado a distintos tipos de procesos y diferentes industrias es COMSOL multiphysics. Este software ha sido ampliamente utilizado en los análisis por elemento finito principalmente en simulaciones de propiedades físicas, térmicas y químicas, tal y como lo hacen Lu [81] y Ercolani [82], donde el principal objetivo del software es determinar reacciones químicas y deformaciones físicas, respectivamente. En estos trabajos la función que desempeño COMSOL fue satisfactoria, logrando obtener los

parámetros deseados para lograr obtener una predicción acertada sobre las fallas y las propiedades que pueden tener algunos materiales.

Por otra parte Rivera et al., [83] desarrolló un modelo de micromecánica para estudiar el efecto de la porosidad y morfología de reforzantes angulares y esféricos de SiC en aleaciones de Aluminio, el cual fue resuelto utilizando COMSOL Multiphysics. En ese trabajo se utilizaron microestructuras sintéticas desarrolladas bajo el enfoque de elemento de volumen representativo (RVE) y de celda unitaria. Se demostró que para fracciones volumen de reforzamiento menores al 11%, el comportamiento mecánico en el reforzamiento del compuesto es virtualmente el mismo indistintamente de la morfología del reforzante de SiC. También se demostró que los resultados obtenidos con el enfoque de celda unitaria pueden guiar hacia el mismo estado de esfuerzo en la microestructura que el obtenido por el RVE, por tanto, ambos enfoques son adecuados para el diseño de materiales. A través de simulación, utilizando COMSOL Multiphysics Rivera et al., también realizó un estudio de micromecánica para determinar el nivel de infiltración durante la fabricación de esponjas de poro abierto fabricadas con una aleación de Zn-Al, relacionando el módulo elástico de la esponja con el nivel de infiltración. Adicionalmente, se demostró que parámetros estructurales como tamaño de poro y longitud de los puntales gobiernan el módulo elástico de las esponjas de Zn-Al, y que los puntales gruesos y cortos aumentan la habilidad de la espuma para resistir la deformación elástica.

En el trabajo de Yañez et al. [24] se utiliza un modelo numérico en COMSOL para predecir el comportamiento de una espuma sintáctica de Ny6 reforzada con fibra de vidrio, aplicado a un modelo de celda unitaria, en este se estudiaron las cargas que soporta el compuesto y se relacionan con el comportamiento del módulo de Young, que aumenta con la concentración de HGM en la espuma sintáctica, y que al sobrepasar el 10% en peso de contenido de HGM vuelve a disminuir. Además, en este trabajo la simulación en COMSOL permitió identificar los esfuerzos de von Mises que soportan los componentes de la espuma sintáctica en la celda unitaria, los cuales son una propiedad de tensión que es proporcional a la energía de deformación en un compuesto elástico, este se presenta como una tensión uniaxial y permite identificar las relaciones entre los esfuerzos soportados y las propiedades elásticas del material analizado [84].

Además, una gran ventaja de este software es que permite realizar análisis y modelados estructurales en 1D, 2D y 3D, en conjunto con la posibilidad de programar las propiedades individuales de los materiales que se requieren para después analizarlos como una mezcla por medio de las diferentes herramientas que el programa presenta, entre las cuales se encuentran los análisis estructurales, químicos, térmicos, físico-mecánicos, eléctricos y magnéticos [85].

La mayor desventaja que llega a presentar el software COMSOL multiphysics se encuentra en la capacidad de cómputo requerida, ya que al ser uno de los sistemas de mayor fiabilidad y certeza (si este se programa de manera correcta) requiere de características computacionales que tengan un excelente rendimiento. Se ha demostrado que el programa tiene un buen rendimiento en equipos de cómputo con un procesador 4 núcleos de hasta 3GHz y una memoria RAM de 16 Gb [85]. Estas características se pueden lograr con un procesador AMD Ryzen™ 5 o un Intel® core™ i5 y un equipo que pueda soportar los 16 Gb de RAM.

2.3.1.2 Otros softwares de simulación

En el área de la simulación existen también otros softwares que permiten los estudios de materiales y la predicción de sus propiedades a través de estudios de micromecánica por elemento finito. Un ejemplo es el del software ANSYS, en el trabajo de Kassa y Arumugam [86] describen el uso de ANSYS para predecir las propiedades elásticas como el módulo de Young y el módulo de corte de compuestos epóxicos reforzados con nanotubos de carbono, en este una de las características principales es que se utiliza el software Matlab para diseñar el arreglo geométrico (RVE) con el que luego se trabajará en ANSYS. Este desarrollo los llevo a predecir propiedades como el módulo de Young en dirección de la cara más extensa de su RVE con un error menor al 20% con respecto a valores documentados [87].

La diferencia entre ANSYS y COMSOL radica en el tipo de productos que cada uno ofrece, mientras que COMSOL únicamente presenta productos con licencias completas para la simulación numérica, aplicaciones de simulación y opciones de desarrollador, ANSYS presenta tanto sus licencias completas como licencias menos equipadas para estudiantes.

En su trabajo Salvi et al. [88] compara la simulación numérica de ambos softwares determinando perfiles de temperatura en fluidos no newtonianos, con la finalidad de generar un cuadro comparativo entre las características y aplicación de los distintos softwares. Entre sus resultados presenta la comparación al usar elementos de mallado tetraédrico en ambos softwares con tamaños de 0.03 y 0.005 m en la geometría tubular estudiada, lo que les permitió conocer las siguientes características: mientras que el estudio en ANSYS tomo 2.5 horas para completarse, en COMSOL tomo 15 minutos, además las características computacionales fueron las mismas en ambos casos, usando un procesador de 3 GHz y 3 Gb de memoria, los autores mencionan también la mayor facilidad de uso y de postprocesamiento en COMSOL.

2.3.1.3 El principio de Saint – Venant en simulación

El principio de Saint – Venant dice lo siguiente: si las fuerzas que actúan sobre una pequeña porción de la superficie de un cuerpo elástico son reemplazadas por otro sistema de fuerzas estáticamente equivalente que actúan sobre la misma porción de la superficie, esta redistribución de la carga produce cambios sustanciales en las tensiones localmente (la región más cercana a la redistribución de carga), pero tiene un efecto insignificante. sobre las tensiones a distancias que son grandes en comparación con las dimensiones lineales de la superficie sobre la que se modifican las fuerzas [89].

Este principio es muchas veces aplicado en la ingeniería estructural y es utilizado en las simulaciones de elemento finito al momento de interpretar los resultados de las simulaciones. Esto es debido a que el principio permite interpretar los resultados en simulaciones donde se aplican cargas para determinar las propiedades elásticas de algún compuesto o estructura. Ya que en las simulaciones se pueden obtener resultados donde las predicciones se dan de forma local, es decir en cada región del volumen o del área trabajada, en vez de resultar en un solo valor homogéneo. La Figura 2.7 muestra un ejemplo de resultados de simulación en COMSOL, donde se aprecia la diferencia entre un resultado homogéneo y otro que determina la propiedad del módulo en todo el volumen del compuesto.

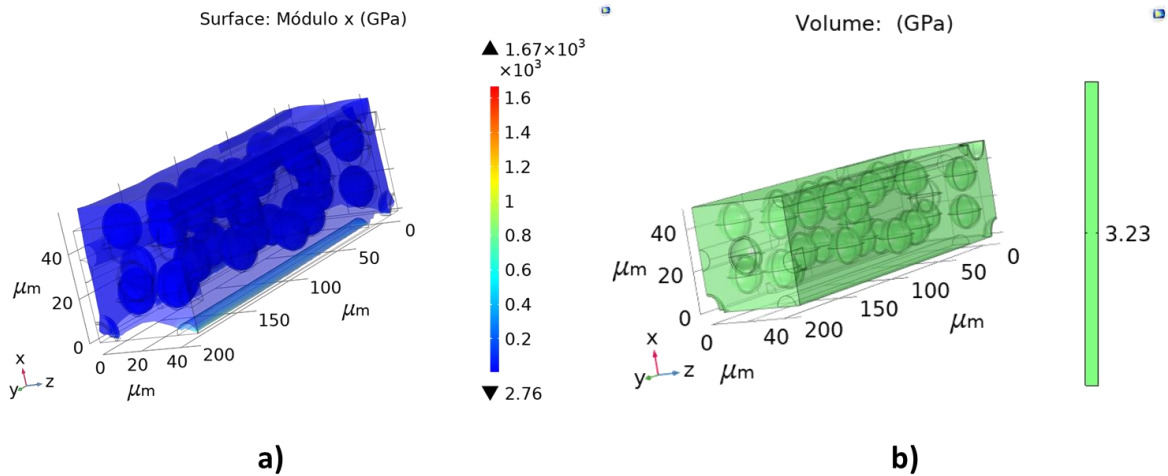


Figura 2.7: Ejemplos de simulación en la predicción de módulo en COMSOL para un RVE de una espuma sintáctica de Ny6 con un 10% en peso de HGM: a) Resultados locales en el volumen y b) Resultado homogéneo en todo el volumen.

En el ejemplo de la Figura 2b el valor del módulo es uno solo, por lo que no es necesario aplicar ninguna consideración para obtener un solo valor, por otra parte, la Figura 2a muestra diferentes valores de módulo en todo el RVE, representado en una escala de colores. Es en estos casos cuando el principio de Saint – Venant nos dice que la distribución exacta de una carga no es importante lejos de la región cargada, siempre que las resultantes de la carga sean correctas [90], por lo que se puede establecer como representativo de todo el volumen al valor que más homogéneo del RVE.

3 Justificación

La investigación teórica complementa a los estudios experimentales al proveer una percepción física de los fenómenos en cuestión, que no es fácil de lograr a través de información experimental. Sin embargo, los estudios teóricos de las espumas sintácticas reforzadas son limitados, y en la actualidad no se ha logrado establecer una solución analítica de micromecánica, que describa el comportamiento elástico para las espumas sintácticas reforzadas, lo anterior debido a la complejidad matemática de relacionar un tensor de deformación elástica con esfuerzo en sistemas heterogéneos, y de haberla, dicha solución difícilmente proveería información microestructural de forma local, necesaria para la comprensión de los fenómenos.

Aunque existen estudios de análisis por elemento finito basado en micromecánica de espumas sintácticas reforzadas, los cuales proveen información local, estos no han revelado en su totalidad el mecanismo de transferencia de carga en las espumas sintácticas, ya que la mayoría de los estudios consideran fibras continuas, o fibras demasiado cortas, de tamaño cercana al de las esferas, y la información micromecánica obtenida no permite esclarecer el comportamiento elástico del material, y se concluye principalmente que conforme se eleva la fracción volumen de las esferas, estas desplazan el esfuerzo hacia las fibras, y de esa forma se eleva el módulo de Young. Sin embargo, esta información no es totalmente compatible con el comportamiento observado experimentalmente del módulo de Young en un estudio previo de nuestro grupo de trabajo, donde el aumento progresivo en la cantidad de esferas, inicialmente refuerza a la espuma y posteriormente la debilita [25].

La revisión de la literatura demuestra que son necesarios más estudios teóricos que permitan lograr mayor comprensión del comportamiento mecánico de las espumas sintácticas reforzadas. En este trabajo se propone el análisis por elementos finitos basado en micromecánica de una espuma sintáctica reforzada para elucidar el mecanismo de distribución de esfuerzos.

4 Hipótesis

El estudio numérico del efecto de la fracción volumen de las microesferas huecas de vidrio basado en micromecánica en régimen elástico de una espuma sintáctica reforzada revelará el comportamiento mecánico a nivel microestructural del compuesto relacionado a su respuesta macro (módulo de Young) para comprender el mecanismo de transferencia de carga entre los constituyentes de la espuma sintáctica.

5 Objetivos

5.1 Objetivo general

Elucidar por elementos finitos basado en micromecánica el mecanismo de reforzamiento o transferencia de carga entre los constituyentes de una espuma sintáctica reforzada, variando la cantidad de esferas.

5.2 Objetivos específicos

1. Establecer un correcto elemento de volumen representativo (RVE) sintético tridimensional correspondiente a fracciones peso de 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 y 15% de esferas huecas, 14% fibra de vidrio y resto Ny6, bajo condiciones frontera de carga estáticas uniformes. Paralelamente, definir las características geométricas de las esferas huecas considerando diámetro interno y externo constantes y con una distribución de tamaños de esfera homogénea.
2. Validar los resultados numéricos comparando la respuesta macro de los RVEs en el módulo de Young, con el módulo de Young experimental para los casos de 0, 5, 10, y 15% en peso de esferas huecas, 14% fibra de vidrio y resto Ny6.
3. Realizar un estudio de convergencia utilizando tres niveles de mallado -fino, medio y grueso- para obtener soluciones asintóticas, es decir resultados independientes del mallado, pero con costo computacional moderado.
4. Estudiar la condición de deformación y campos de esfuerzos en la microestructura relacionados a la respuesta a nivel macro para determinar el efecto de la fracción volumen de esferas huecas sobre la rigidez de la espuma sintáctica reforzada y elucidar el mecanismo de reforzamiento o transferencia de carga entre los constituyentes.

6 Desarrollo experimental

6.1 Diagrama de proceso del proyecto

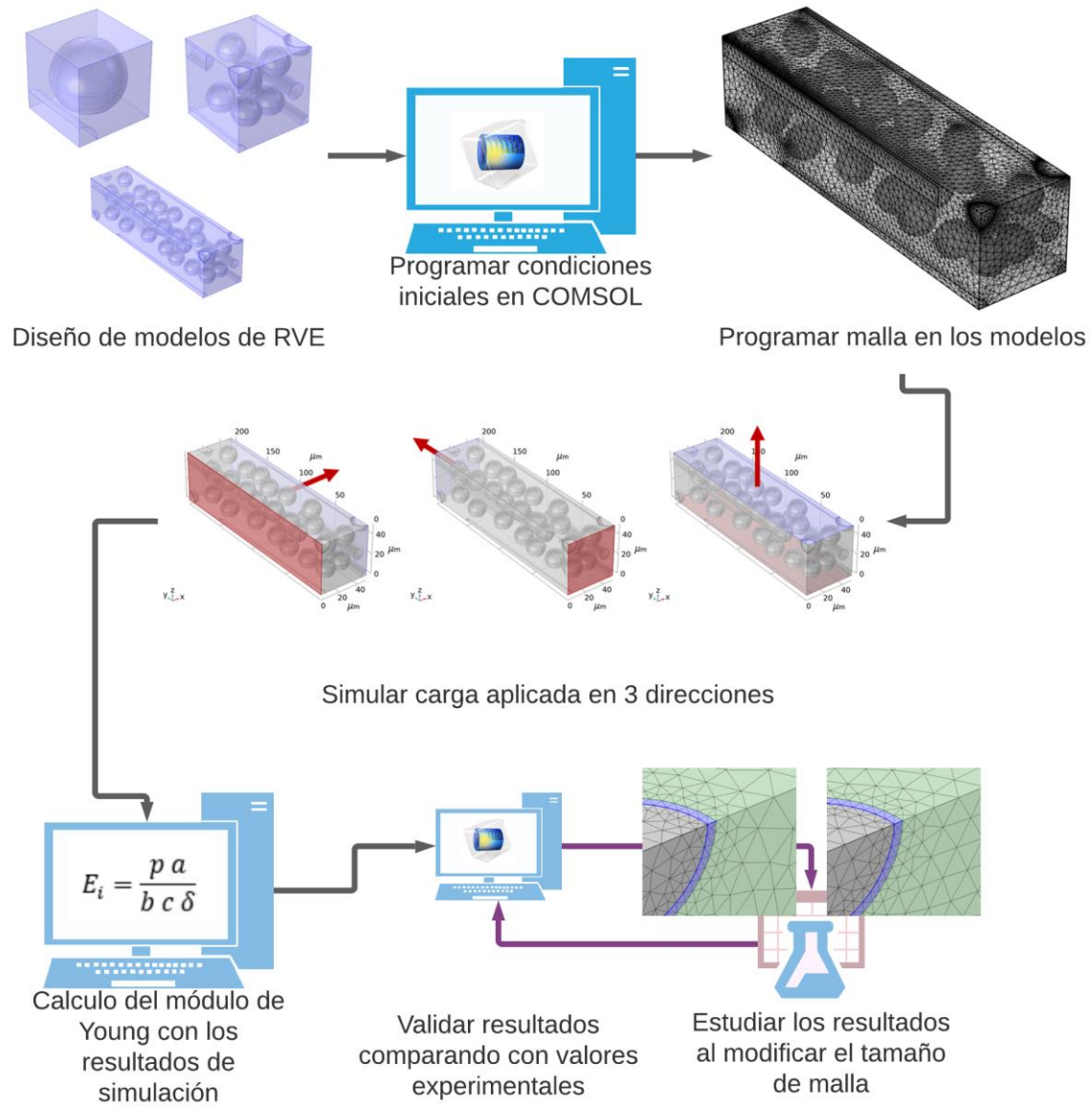


Figura 6.1: Diagrama de proceso del proyecto.

6.2 Materiales

En el presente trabajo se utilizó el software **COMSOL MULTIPHYSICS 5.5**. Las características del equipo utilizado para realizar los cálculos son las siguientes:

- Procesador AMD Ryzen™ 5 4500U
- Memoria RAM de 16 Gb

Las simulaciones se realizaron considerando los materiales listados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Propiedades físicas de los materiales utilizados en la simulación [45].

Material	ρ (kg/m ³)	ν	Módulo (Pa)	Diámetro (μm)	Espesor de pared (μm)	Longitud (μm)
Nylon 6	1160	0.35	2.75E+09	NA	NA	NA
Fibra de vidrio	2180	0.17	7.30E+10	10	NA	NA
Esferas huecas	2230	0.21	6.00E+10	18	0.89129951	400

6.3 Métodos

6.3.1 Establecer el Elemento de Volumen Representativo (RVE)

La generación de los RVEs se realizó definiendo inicialmente las características geométricas de los constituyentes, como son, longitud y diámetro de las fibras, diámetro interno y externo de las esferas. El propósito de establecer un RVE es tener una representación estadística del compuesto heterogéneo, a través de la cual es posible relacionar la condición de esfuerzo y deformación en el RVE a la respuesta macro del material en bulto. Se busca que el tamaño del RVE sea lo más pequeño posible para reducir el costo computacional, siempre que se mantenga la representación estadística del material heterogéneo. Los RVEs se construyeron adicionando secuencialmente fibras distribuidas dentro de un rectángulo, donde la posición aleatoria de cada nueva fibra no debe traslaparse con ninguna definida previamente, del mismo modo, se adicionan aleatoriamente las esferas evitando que se traslapen con otras fibras o esferas. El proceso se realiza hasta alcanzar el valor establecido en la fracción

volumen de los constituyentes, lo anterior se realizó en el software COMSOL multiphysics. Los componentes como las microesferas y las fibras de vidrio tendrán las características físicas presentadas en la Tabla 6.1.

El RVE debe estar diseñado de manera que sea una representación de la distribución estadística de los componentes de la espuma sintáctica de Ny6 reforzada, por lo tanto, para construir estos modelos es necesario probar con distintas geometrías y distintos tamaños. Se considera primero una geometría de celda unitaria como la que se muestra en la Figura 6.2 que corresponde a una composición de Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.

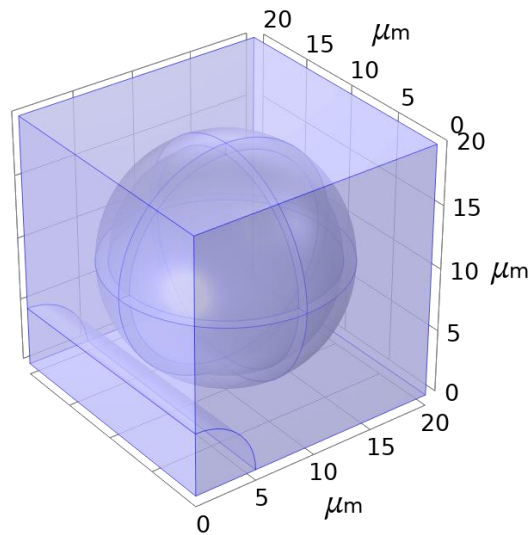


Figura 6.2: Modelo de RVE con dimensiones de $20*20*20 \mu\text{m}$, composición de Ny6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.

Se diseñaron además modelos RVEs correspondientes a la misma composición de Ny6, fibras de vidrio y microesferas, pero con distinto tamaño y geometría, con lo que se puede analizar la interacción de los componentes y determinar cuál de los modelos es el adecuado para los estudios de micromecánica. La Figura 6.3 presenta un modelo con un arreglo cubico, pero correspondiente a dimensiones mayores la diferencia con el modelo presente en la Figura 6.2 se encuentra en el tamaño del RVE que es mayor en este último caso, y por tanto permite incorporar una mayor cantidad de fibras y esferas.

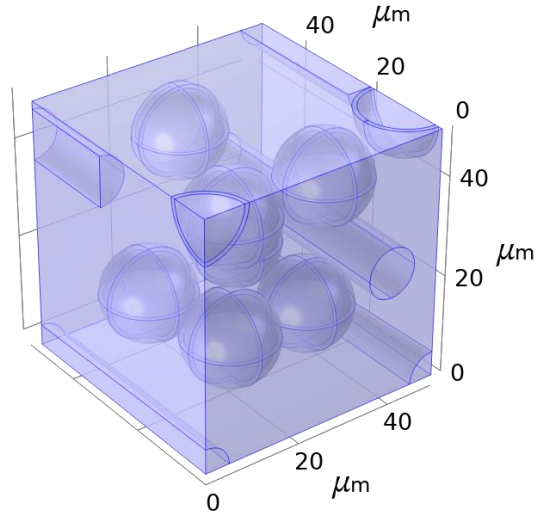


Figura 6.3: Modelo RVE con dimensiones 50*50*50 μm , composición de Ny6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.

Por último, la Figura 6.4 muestra un RVE de geometría distinta (ahora un prisma) en la que también se utiliza la composición de los modelos anteriores.

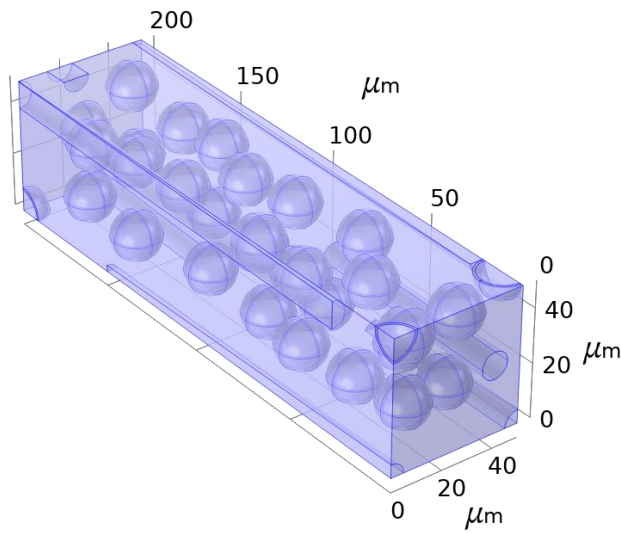


Figura 6.4: Modelo RVE con dimensiones 50*200*50 μm , composición de Ny6 con 14% en peso de fibras de vidrio y 10% en peso de microesferas huecas de vidrio.

Este último permite observar una mayor cantidad de elementos debido a su tamaño, lo que podría significar una mayor necesidad de recursos computacionales, sin embargo, el tamaño y la geometría de este modelo permitirá un análisis de distribución distinto al de los modelos presentes en las Figuras 6.3 y 6.4.

Una vez establecidas la geometría y dimensiones adecuadas se debe construir un RVE con estas especificaciones para cada una de las composiciones definidas para este proyecto: Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 y 15% en peso de HGM. Subsecuentemente cada paso se debe realizar para cada una de estas concentraciones.

6.3.2 Establecer las Condiciones Iniciales en el Software

Para que el sistema de COMSOL analizara al compuesto como un conjunto fue necesario indicar las propiedades de los componentes individuales. Las condiciones ingresadas son las presentadas en la Tabla 6.1 y son estos datos los que proporcionan la base en la cual el análisis por elemento finito calculará la respuesta que tenga el compuesto como un todo en vez de como elementos individuales.

6.3.3 Establecer un Tamaño de Malla Inicial

El mallado es la subdivisión del RVE en elementos más pequeños que serán los puntos en los cuales se realizarán los cálculos necesarios para el FEA, en la Figura 6.5 se muestra un RVE de tamaño $50*200*50 \mu\text{m}$ correspondiente a la composición de Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 10% en peso de microesferas, en el que se observa la malla generada para este modelo en específico.

La exactitud de los cálculos realizados por elemento finito incrementa al reducir el tamaño de los elementos que dividen al sistema en cuestión, sin embargo, es necesario encontrar un balance entre número de elementos y la exactitud de la solución. Lo anterior significa que, para cada sistema, se define un número mínimo de elementos necesarios que produzca la exactitud requerida en la solución.

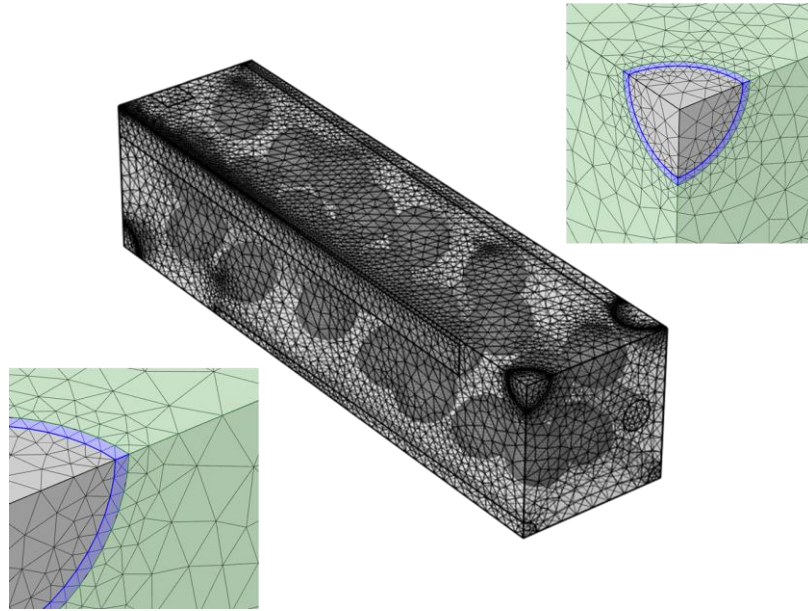


Figura 6.5: Mallado en el RVE de composición Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 10% en peso de microesferas.

En la Figura 6.6 se encuentra una imagen del mallado programado en el RVE con 15% en peso de contenido de esferas huecas, en donde se puede apreciar que el tamaño de malla inicial para este modelo es más pequeño que el presentado en la Figura 6.5, esto debido a que los espacios entre constituyentes son muy reducidos por lo que es necesario establecer un mallado de menor tamaño para que el programa pueda realizar una simulación exitosa a fin de calcular los gradientes agudos de desplazamiento y esfuerzo en regiones pequeñas.

Los tamaños de malla inicial para este proyecto se definieron en un tamaño máximo de elemento de $12\ \mu\text{m}$ y el tamaño de elemento menor para todos los modelos con menos del 10% en peso de contenido de HGM se estableció en $1\ \mu\text{m}$ ya que los espacios entre constituyentes no son muy estrechos y no fue necesario un tamaño de maya menor, únicamente se estableció un tamaño mínimo que se pudiera adecuar al espesor de la pared de las esferas. Por otra parte, los modelos que contienen más del 10% en peso de esferas tienen mayor cantidad de esferas y los espacios que hay entre esferas son muy reducidos, razón por la cual se opta por un tamaño mínimo de malla de $0.021\ \mu\text{m}$.

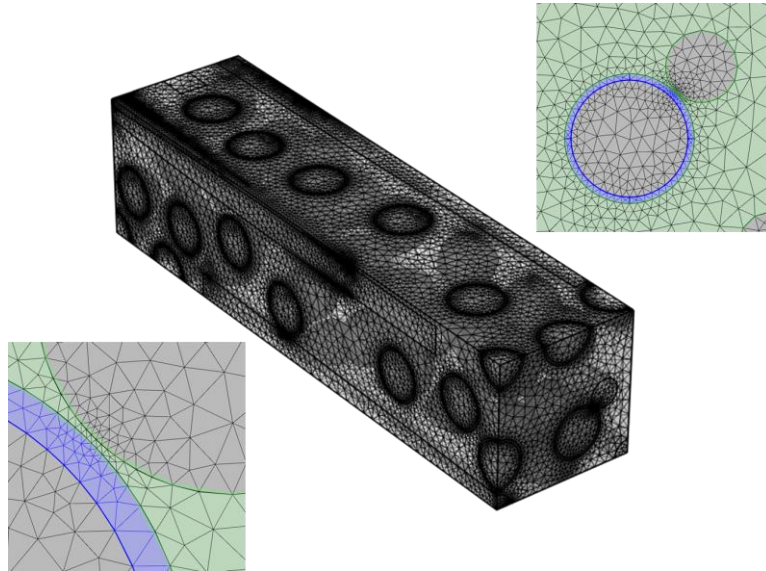


Figura 6.6: Mallado en el RVE de composición Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y 15% en peso de microesferas.

6.3.4 Simulación de Aplicación de Carga

Para calcular el módulo de Young, los RVEs diseñados se sometieron a un esfuerzo uniforme, emulando las condiciones de carga aplicada similares a una prueba de tensión uniaxial. Las condiciones fronteras que emulan de forma virtual una prueba de tensión son, restricción fija en un extremo del RVE mientras que en el lado opuesto se considera un esfuerzo uniforme estático. La Figura 6.7 muestra la prueba de tensión ASTM D638.



Figura 6.7: Prueba de tensión ASTM D638.

En la simulación estas condiciones de carga se fijaron como se especifica en la Figura 6.8 en donde se puede observar que la aplicación de la carga se programa individualmente en cada una de las direcciones (uniaxial) del material con el fin de analizar la respuesta del compuesto a la carga tanto de forma axial como de forma transversal con respecto de las fibras de vidrio, ya que al no ser un compuesto isotrópico sometido a un esfuerzo (tensor) se debe analizar en todas las direcciones.

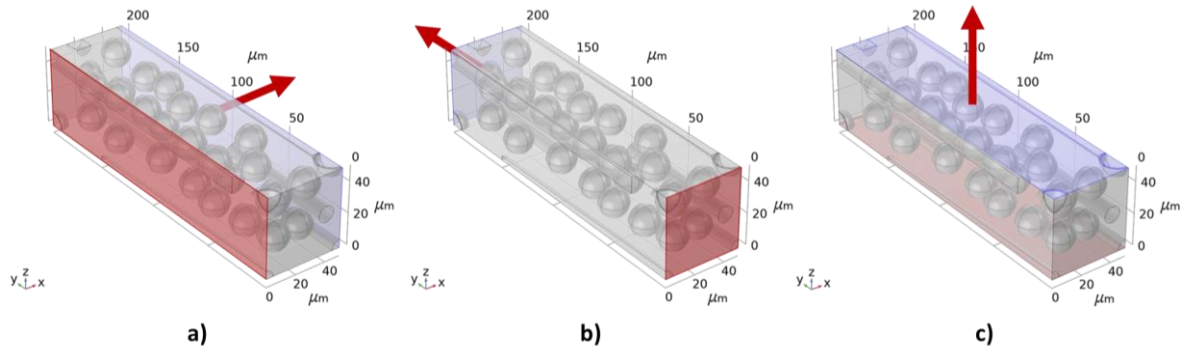


Figura 6.8: Condiciones frontera de la simulación en direcciones a) x, b) y, c) z. las flechas representan la dirección de la carga aplicada normal a la superficie. La cara opuesta a la superficie normal a la carga es una restricción fija. Se toma como referencia el compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.

Se considera una carga de 0.05 N de fuerza, ya que se busca que el esfuerzo al que se somete el modelo cause una deformación elástica.

6.3.5 Análisis de la Deformación y Cálculo del Módulo

Este paso del proceso se centra en encontrar una aproximación del módulo que debería tener la espuma sintáctica reforzada. Usando los valores de la simulación realizada, los cuales se presentan de forma general como en la Figura 6.9, se considera la deformación causada por la carga y en COMSOL se programa la ecuación 14 que se presenta a continuación:

$$E_i = \frac{p a}{b c \delta} \quad [14]$$

Donde E_i es el módulo en la dirección analizada ($i = x, y, z$), a es la dimensión axial a la dirección de carga aplicada, b y c son las dimensiones transversales a la dirección de carga y δ es el desplazamiento producido por la carga aplicada.

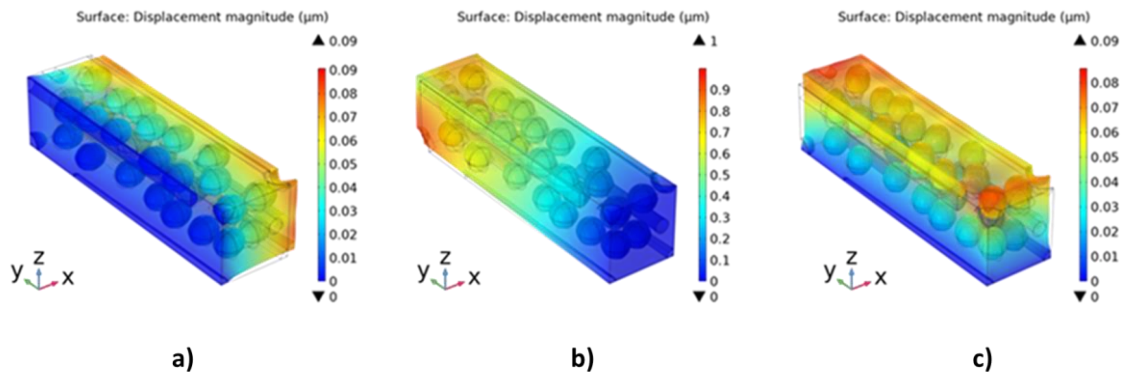


Figura 6.9: Vista general de cómo se ven los resultados al analizar la deformación por aplicación de carga en las direcciones a) x (izquierda), b) y (centro), c) z (derecha). Se toma como referencia el compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.

Se usarán los resultados en la ecuación 14 para hallar una aproximación del módulo en cada dirección de carga, posteriormente se promediarán los módulos de las 3 direcciones para obtener un valor único y aproximado de la espuma sintáctica reforzada. La Figura 6.10 demuestra cómo se obtienen los resultados de módulo al programar y ejecutar la ecuación 14 en COMSOL.

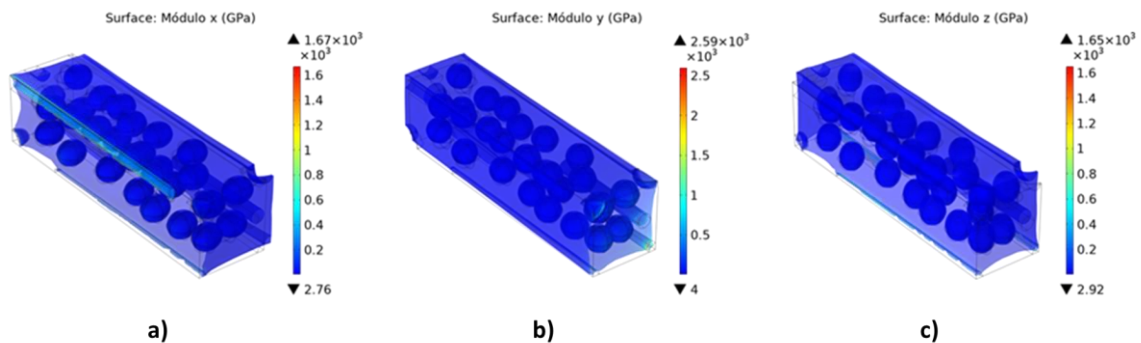


Figura 6.10: Vista general de cómo se ven los resultados al analizar el módulo en las direcciones a) x (izquierda), b) y (centro) y c) z (derecha). Se toma como referencia un compuesto con contenido del 10% en peso de HGM.

6.3.6 Validar Resultados con Valores Experimentales

Los resultados se validaron comparando los valores de los módulos calculados con los valores experimentales obtenidos en [25], los cuales se presentan en la **Tabla 6.3**. Los valores experimentales reportados en la literatura son los de los compuestos con concentraciones de 0, 5, 10 y 15% en peso de HGM, y son utilizados para la validación

Tabla 6.3: Valores experimentales de módulo para espumas sintácticas de Ny6 reforzadas con fibra de vidrio, reportados por Orduña [25].

	Esferas huecas de vidrio (% peso)	Módulo reportado (GPa)
Nylon 6 con 14% peso FV	0	2.7731
	5	2.9926
	10	3.0815
	15	3.0755

Los valores numéricos se consideran adecuados siempre que se mantengan con una diferencia máxima del 15 % respecto al valor experimental, de acuerdo al error permisible en el análisis por elemento finito [91].

6.3.7 Estudio de Convergencia: Reducción del Tamaño de Malla

Si los valores de la simulación son aceptables, en relación a los valores experimentales, entonces ahora se procede a realizar un estudio de convergencia. En la sección 6.3.3 se menciona que el tamaño de malla está relacionado tanto con la exactitud de la simulación como con la capacidad computacional necesaria, por lo que en este paso se va a desarrollar un estudio de convergencia donde se realizaran simulaciones con tamaños de malla cada vez menores, como se muestra en la Figura 6.11, hasta encontrar el punto (tamaño de malla) a partir del cual los resultados obtenidos al reducir más el tamaño de la malla tengan un cambio insignificante o muy pequeño. A este valor se le denomina como solución asintótica, el cual se va a hallar para cada uno de los modelos correspondientes a cada concentración de esferas en el compuesto.

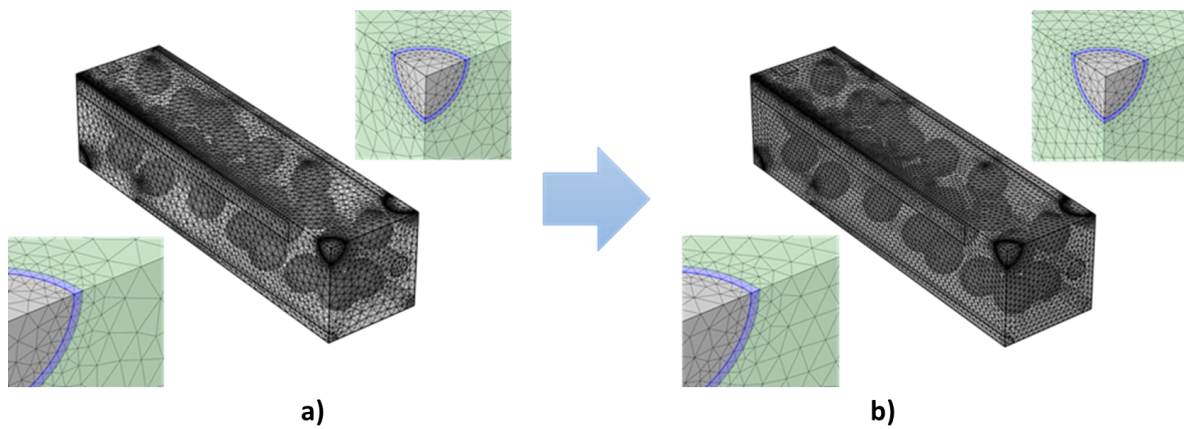


Figura 6.11: Cambio del tamaño de malla para el estudio de convergencia. Se toma como referencia un compuesto con contenido del 10% en peso de HGM: a) Tamaños de malla máximo de 12 μm y mínimo de 1 μm y b) Tamaños de malla máximo de 3 μm y mínimo de 1 μm . Ambos con un acercamiento a la zona adyacente a una esfera para comparar el tamaño del mallado.

7 Presentación y discusión de resultados

En este apartado se recopilan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el modelo de microestructura para las espumas sintácticas de Ny6 reforzadas con fibra de vidrio.

7.1 Modelos representativos RVE

En la selección del tamaño adecuado del RVE se tomaron en cuenta aspectos sobre la distribución y el tamaño de los reforzantes presentes en la espuma sintáctica de Ny6 reforzada con fibra de vidrio. Yu et al. [34] hacen mención en su trabajo sobre la necesidad de que en un modelo de volumen representativo las fibras y esferas deben de tener una distribución aleatoria, que pueda representar la distribución que tendrían en el material físico. Además, a partir de los escritos de Ferreira et al. [92] y Yu y Xue [93], se puede argumentar que en un sistema de polímero reforzado con fibras, estas no se encuentran alineadas totalmente, tienen cierto grado de inclinación. Los RVE que presentan las características mencionadas anteriormente son los obtenidos con mayor tamaño. Los RVE mostrados en la Figura 7.1 se descartaron ya que el valor del módulo de Young obtenido utilizando esos RVE sobrestiman por mucho el valor experimental.

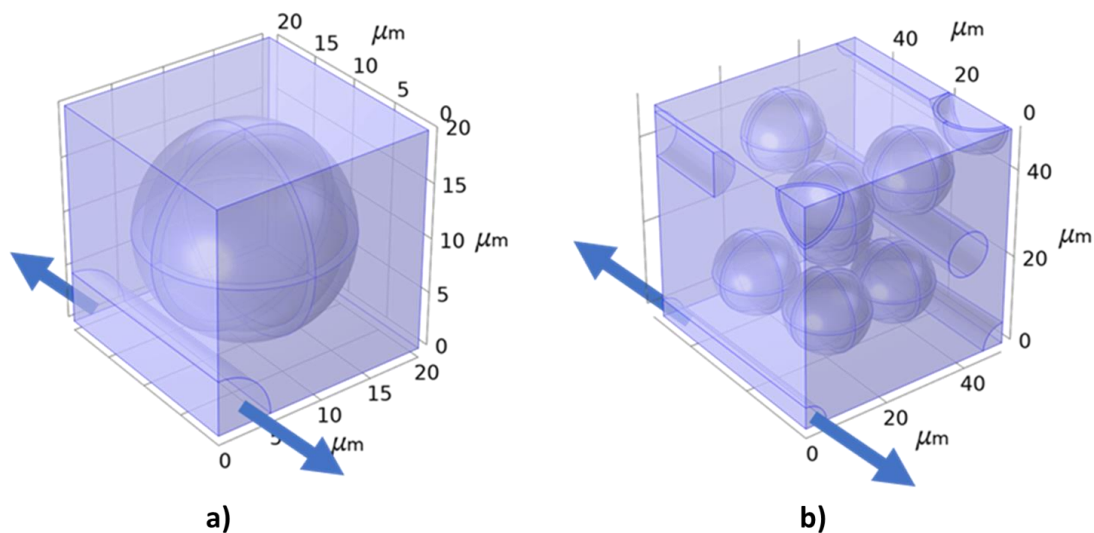


Figura 7.1: Elementos RVE de geometría cúbica. A la derecha dimensiones de 20 μm por lado, a la izquierda dimensiones de 50 μm por lado. Ambas representaciones de Ny6 reforzado con 14% en peso de fibra de vidrio y contenido del 10% en peso de HGM. Las flechas azules representan la extensión de la fibra al considerarla como continua.

Al utilizar un RVE de dimensiones $50*200*50 \mu\text{m}$ se debe de cuidar que la distribución de los componentes sea adecuada, tal como lo menciona Yu et al. [34].

Una diferencia sustancial ha sido que los modelos cúbicos al ser de dimensiones muy pequeñas en relación a la longitud de las fibras de vidrio, no tienen el espacio suficiente para distribuir las posiciones de este reforzante en su volumen, esto causa que las fibras colocadas en el RVE lo atraviesen completamente y al realizar alguna simulación, el enfoque de homogenización establece a las fibras como continuas, es decir que se extienden indefinidamente como se muestra en la Figura 7.1, lo que causa diferencias considerables al comparar con valores experimentales, ya que los valores reportados en la literatura [25] con los que se compara este trabajo fueron obtenidos de la caracterización de una espuma sintáctica de Ny6 reforzada con fibras cortas ($400 \mu\text{m}$).

La Figura 7.2 muestra una comparación del modelo de $50*200*50 \mu\text{m}$ visto frontalmente con una micrografía de SEM, ambos correspondientes a Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y contenido del 10% en peso de HGM. En esta imagen se puede apreciar que la distribución aleatoria de los constituyentes programados en el RVE es similar a la distribución real que tienen los constituyentes en un fragmento del compuesto real. La imagen permite apreciar también la ligera desorientación de las fibras en el compuesto, y que esta desorientación se replica en el modelo construido en COMSOL.

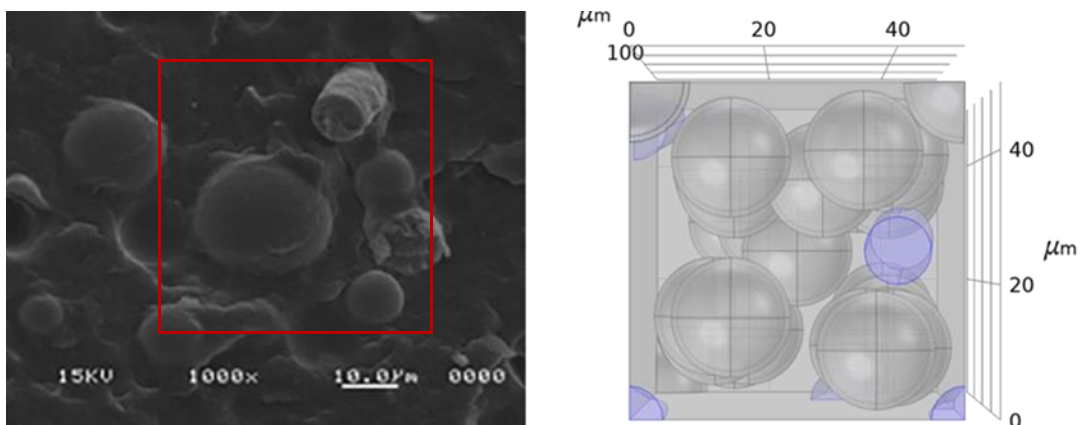


Figura 7.2: comparación entre una micrografía de SEM y la vista frontal de un modelo RVE de dimensiones $50*200*50$, el dominio mostrado en color azul corresponde a las fibras.

7.2 Simulación de una carga: desplazamiento en las direcciones de carga

Como se menciona en la sección 6.3.4 se aplicó una fuerza de 0.05 N de forma uniaxial en cada una de las direcciones de los elementos de RVE, esto causa una deformación similar a la deformación que se tiene en un análisis de tensión, es decir existe un cambio en la geometría al estirarse en la misma dirección que se aplicó esfuerzo. La carga por unidad de área en cada una de las caras del modelo es de $5 * 10^6 \frac{N}{m^2}$ axialmente a las direcciones x y z , mientras que la carga axial en dirección y es de $2 * 10^7 \frac{N}{m^2}$.

Las deformaciones causadas, mostradas en la **Tabla 7.1** se encuentran dentro del régimen elástico de acuerdo a lo reportado en [25], esto es importante debido a que permitió hallar el módulo del material.

Tabla 7.1: Desplazamientos resultantes de la simulación por elemento finito para cada modelo de RVE composición Ny6 con 14% en peso de fibra de vidrio y concentración de esferas mostrada en la tabla.

% en peso de HGM en el RVE	Desplazamiento en x (μm)	Desplazamiento en y (μm)	Desplazamiento en z (μm)
0	0.1	1.13	0.1
2.5	0.1	1.1	0.1
5	0.1	1.08	0.1
7.5	0.1	1.05	0.09
10	0.09	1	0.09
12.5	0.09	1.02	0.08
15		0.98	

Los casos de desplazamiento en las direcciones x y z son notablemente menores que en la dirección y , debido a la diferencia en la magnitud de las cargas aplicadas, aunque se aplicó la misma fuerza (0.05 N), el área superficial sobre la que fue aplicado es diferente. En la Figura 7.3 se puede apreciar esta diferencia entre las caras de uno de los modelos de RVE utilizados.

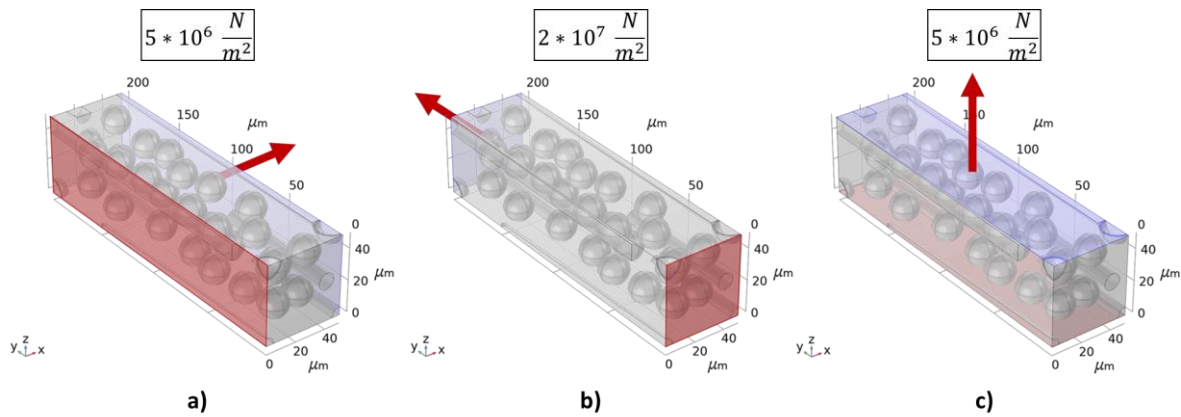


Figura 7.3: Factores que intervienen en el desplazamiento uniaxial del RVE, las flechas rojas indican la dirección del desplazamiento, el dominio en azul muestra la superficie que se desplaza, el dominio en rojo muestra la superficie sobre la que actúa una restricción fija y sobre cada figura la fuerza aplicada por unidad de área: a) en dirección x, b) en dirección y y c) en dirección z.

7.3 Predicción del módulo de Young: post procesado en COMSOL

La predicción del módulo parte de la simulación de la aplicación de una carga, como bien se dijo esta es análoga al proceso de un estudio de tensión y por lo tanto da como resultado la deformación del material. El desplazamiento causado en cada dirección (Tabla 7.1) fue un factor importante en la predicción del módulo, este dato se utilizó junto con los datos de fuerza aplicada y los factores geométricos del RVE en la ecuación 14 de la sección 6.3.5.

La Figura 7.4 muestra cómo se relacionaron los datos a través de la ecuación 14, la predicción del módulo se dio después de calcular el desplazamiento en el material usando el método de elemento finito. Al procesar los datos mediante el enfoque de homogenización geométrica [94] (Ecuación 14) se observó el campo de esfuerzos mecánicos en el total de la geometría, por lo tanto, la predicción del módulo ocurrió en cada región del RVE, es decir en todo el volumen y se encuentra graficado con una escala de datos que asciende hasta valores muy altos que corresponden a puntos donde se concentra mayormente el esfuerzo como fibras y esferas.

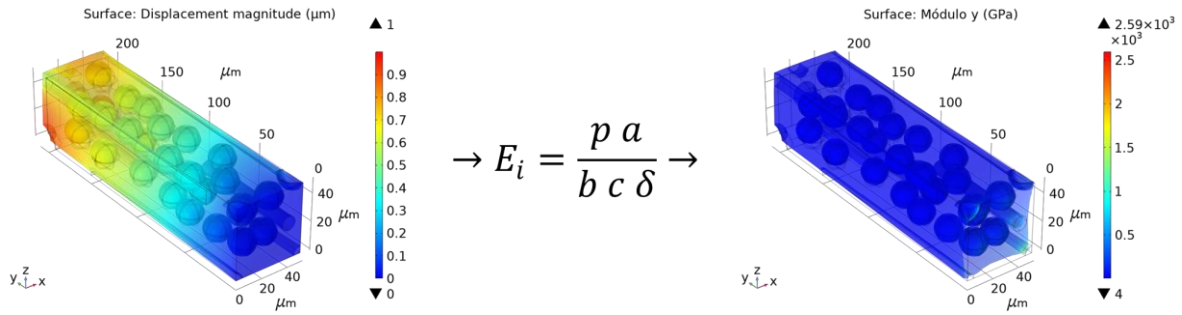


Figura 7.4: Cálculo del módulo a través de la homogenización geométrica [94], se pueden apreciar zonas con mayores valores en el módulo debido a los cálculos realizados en todo el volumen en un modelo RVE correspondiente al compuesto con 10% en peso de contenido de HGM.

El plano opuesto a la cara normal a la carga tiene una restricción fija, por lo que la deformación del RVE es menor en la zona más cercana a esta cara, es por esto que las fibras presentan mayor valor de módulo en esta zona, ya que hay menor desplazamiento con respecto a la carga aplicada. En el trabajo de Wang et al. [28] ocurre de forma similar, los puntos restringidos presentan menor movimiento al realizar un estudio uniaxial, como consecuencia de un valor más grande de módulo, este comportamiento permitió evaluar el módulo en todo el volumen representativo al utilizar FEA. La Figura 7.5 muestra los resultados de módulo, visualizando únicamente los refuerzos (a) y únicamente el polímero matriz (b), para el modelo RVE con 10% en peso de contenido de HGM, donde se puede apreciar un módulo elevado.

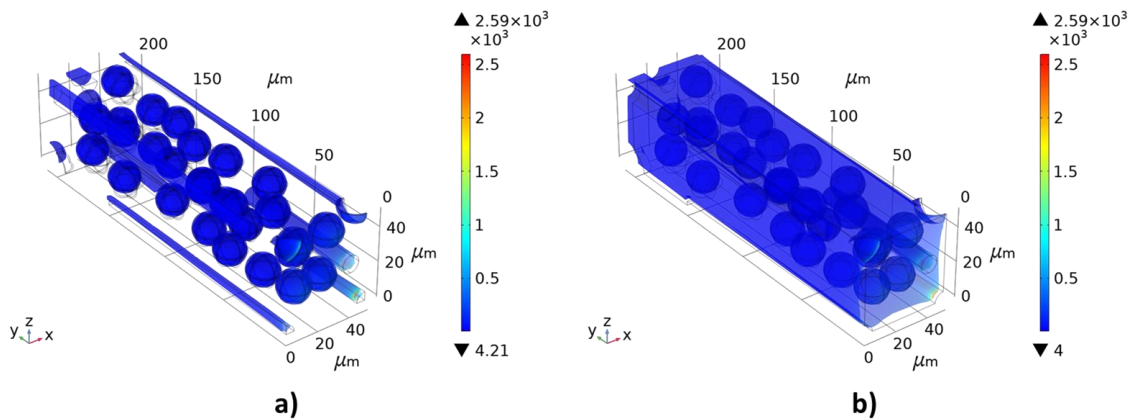


Figura 7.5: Módulo en la dirección “y” del RVE con 10% en peso de HGM. a) visualizando los refuerzos y b) visualizando la matriz de Ny6.

Es precisamente el comportamiento de las fibras y las esferas como reforzante, así como su posición con respecto al esfuerzo aplicado lo que generó este resultado, una manera fácil de demostrarlo es comparando el comportamiento con otras concentraciones de esferas y con otras direcciones de carga, otros autores como Pan et al. [95] también han reportado el incremento en la resistencia a la deformación al incrementar el contenido de esferas en el compuesto y causando cambios de hasta 45% en el módulo a bajas temperaturas al agregar una fracción volumen de 15.1% de HGM en una matriz de poliuretano. Por otra parte, Wang et al. [79] reporta los cambios en el módulo debido a la orientación de fibras de carbono en una matriz epóxica y demostrando que el módulo así como la resistencia mejoran en la dirección en que están orientadas las fibras.

En la Figura 7.6 se aprecia la comparación entre las diferentes direcciones de carga aplicadas en el modelo correspondiente al contenido de 10% en peso de HGM, en el cual también existe este módulo elevado en las zonas de la restricción donde se encuentra el reforzante. La Figura 7.7 por otra parte considera una comparación entre los modelos principales (correspondientes al 0, 5, 10 y 15% en peso de HGM) en la dirección y de manera que también se observó el mismo comportamiento en los refuerzos.

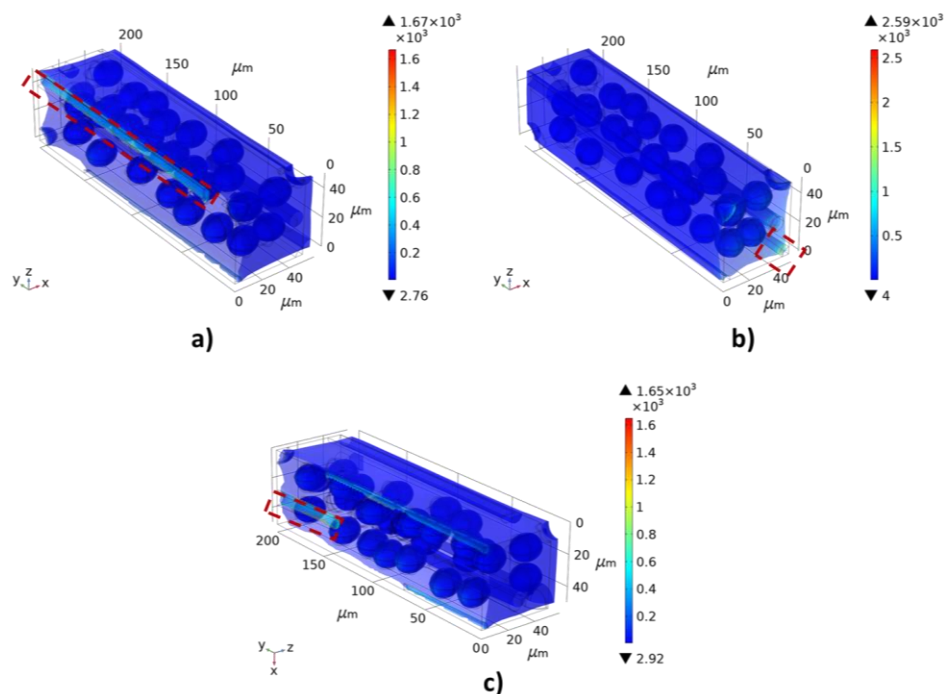


Figura 7.6: Valores altos de módulo señalados en los modelos del 10% en peso de HGM para las 3 direcciones de carga aplicada; a) en dirección x, b) en dirección y, c) en dirección z.

Adicionalmente se encuentra que el mismo comportamiento mostrado en la Figura 7.5 ocurre en otros modelos, donde las zonas del polímero que rodean al reforzante, presentan mayores valores de módulo, esto como parte de la interacción entre los constituyentes, los refuerzos al ser sólidos presentan mayor dificultad para moverse, lo que se traduce en un aumento en los valores de módulo.

Este tipo de comportamiento no es coincidencia, sino que se puede explicar tanto a través de las simulaciones como a través de la teoría, ya que el módulo se calcula haciendo uso de la ley de Hooke ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$) al dividir el esfuerzo sobre la deformación, en los modelos de RVE los refuerzos que se encuentran en la frontera fija van a tener mayor dificultad para desplazarse al ser demasiado rígidos por si solos (formados de borosilicato de sodio), al considerar que su deformación es, entonces, mucho más pequeña que en el resto del material, los valores del módulo van a crecer, análogamente Wang et al. [28] en su modelo también presenta como se ve afectado el esfuerzo que soporta el material con respecto a la deformación que sufre, debido a la relación que hay entre estas propiedades en la ecuación de la ley de Hooke.

Esto es también una interpretación del enfoque de homogenización geométrico utilizado para predecir el módulo, ya que parte de la ecuación del módulo de Hooke, relacionando las variables de esfuerzo y deformación, al ser esta una razón, mientras el desplazamiento (en μm) sea menor, los valores que se utilicen en la ecuación 14 también lo serán y por ello el módulo incrementa.

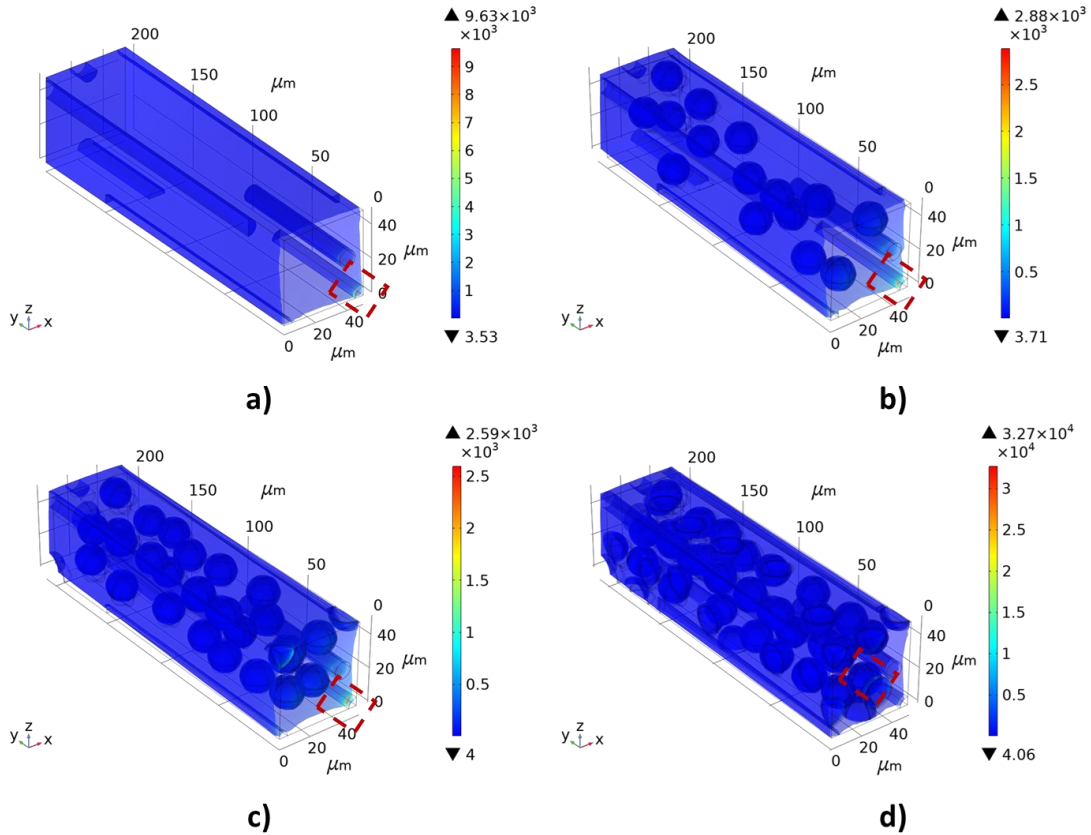


Figura 7.7: Valores altos de módulo señalados en la dirección y para los modelos con distinto contenido de HGM; a) 0% en peso, b) 5% en peso, c) 10% en peso, d) 15% en peso.

Para el caso del modelo que corresponde al 15% en peso de HGM las zonas donde se encuentra el mayor módulo se volvió muy reducida de manera que es casi imperceptible, sin embargo, al observar más de cerca se puede apreciar el ligero aumento del módulo. La Figura 7.8 hace un acercamiento a la zona de mayor módulo, que se ubicó en el borde de una esfera y que fue casi imperceptible. En este caso la cantidad de esferas comienza a ser tan grande que los esfuerzos se distribuyen más uniformemente, lo cual causa que la deformación local en las zonas de los reforzantes se vuelva también más homogénea y por tanto las zonas de módulos elevados se ven reducidas.

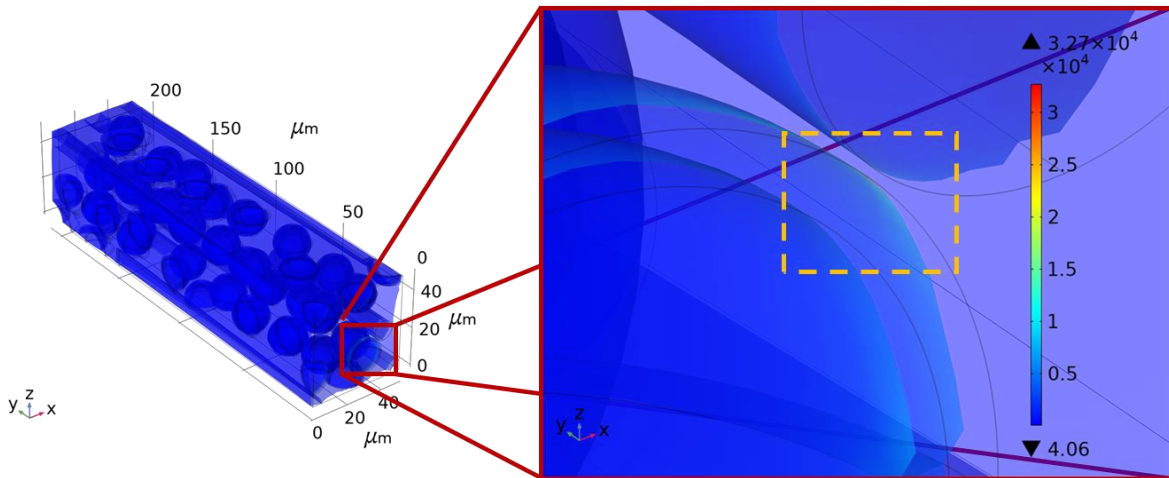


Figura 7.8: Zona de mayor módulo en un modelo con contenido del 15% en peso de HGM. La zona es casi imperceptible, aunque todavía existe.

7.3.1 Predicción del módulo de Young: módulo en las direcciones de carga

Durante el post procesamiento de la información no solo se determinaron datos de la dirección de carga en y (axial con respecto a las fibras de vidrio), sino que también se obtuvieron resultados de módulo en las direcciones x y z . La simulación en la deformación realizada de forma uniaxial en cada una de las direcciones del RVE generaron datos de módulo de Young que ayudan a comprender el comportamiento global del material.

De la Figura 7.6 se entiende que, al aplicar una carga en cualquiera de las direcciones, las zonas donde se encuentran los reforzantes y que además se encuentran en las fronteras estáticas tienen una tendencia a un módulo elevado debido a las condiciones de frontera a las que se encuentran sujetas. La distancia que separa a las fronteras móviles de las zonas donde se presenta mayor valor en el módulo son amplias, siendo esta separación casi del total de la dimensión lineal del RVE en la dirección que se analizó cada caso. La Figura 7.9 muestra las diferencias entre la deformación que sufrió el RVE en su totalidad con respecto de la deformación que sufren los reforzantes en las zonas de mayor módulo. Este comportamiento es observable en la simulación por elemento finito, en las zonas donde la deformación es menor, acorde a lo que reporta Pan et al. [95] En la Figura 7.10 también se puede detectar este comportamiento.

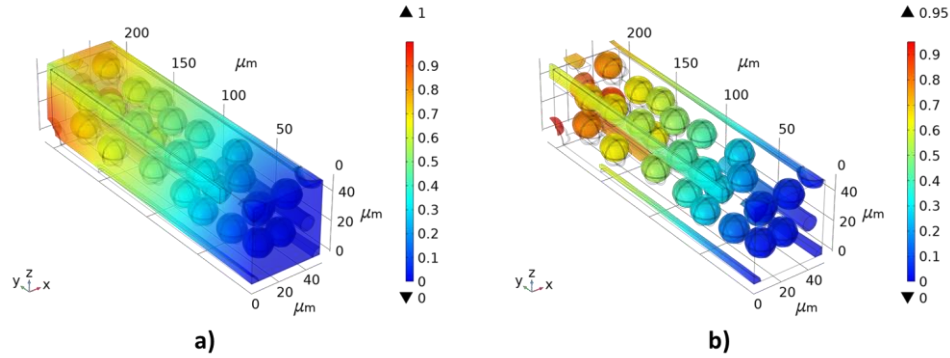


Figura 7.9: Modelo de RVE correspondiente al 10% en peso de contenido de HGM, desplazamiento en μm para a) el RVE completo y b) los reforzantes presentes.

Al observar las imágenes de la Figura 7.9 se distingue que tanto las esferas como las fibras más cercanas a la zona fija sufrieron un desplazamiento considerablemente pequeño ($\leq 0.2 \mu\text{m}$) o incluso nulo. Dichos desplazamientos son consistentes con los valores de módulo presentados en aquellas zonas cercanas a las restricciones de movilidad, la Figura 7.10 resalta esta comparación entre los desplazamientos y los valores de módulo en los refuerzos.

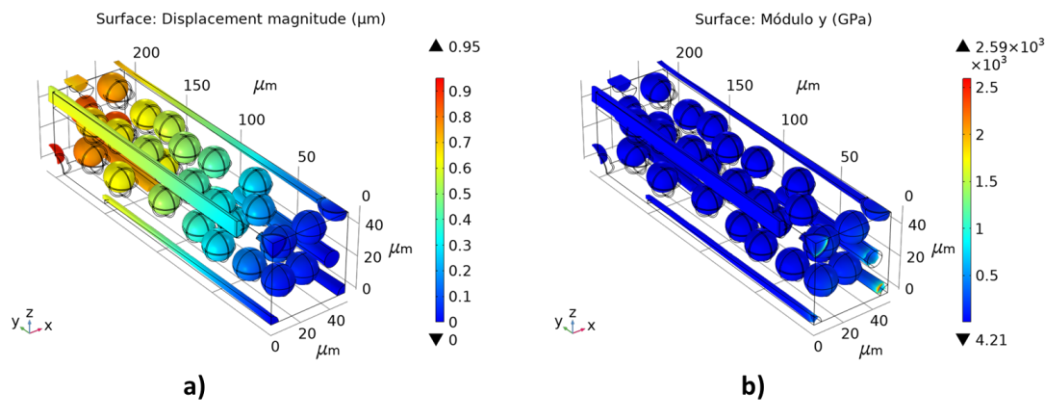


Figura 7.10: Comparación entre los desplazamientos causados en los refuerzos y los valores de módulo resultantes en el RVE del 10% en peso de contenido de HGM: a) desplazamiento en μm y b) módulo en GPa.

Es precisamente la localización de los mayores valores de módulo y los valores máximos de desplazamiento lo que permitió definir un valor de módulo general para cada dirección aplicando el principio de Saint – Venant, ya que las fuerzas que interactúan en el extremo

donde se encuentra la frontera fija, es decir los valores más altos del módulo, son muy pequeños y solamente se presentan localmente, mientras que el resto del material, incluyendo los refuerzos más cercanos a la frontera móvil y aquellos que tuvieron mayor desplazamiento, presentan un valor homogéneo en el módulo tal como lo muestra la Figura 7.11 para el módulo en la dirección y.

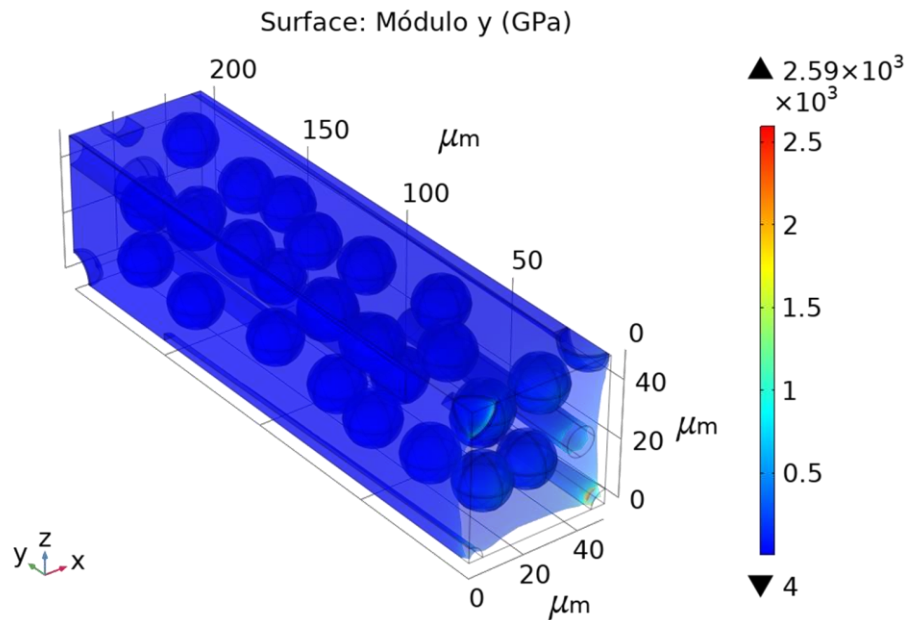


Figura 7.11: Homogeneidad del valor del módulo en el modelo RVE del 10% en peso de HGM, donde solo unas pequeñas zonas localizadas presentan valores altos.

Este comportamiento se repitió en cada uno de los modelos analizados en cada dirección de carga, la Figura 7.6 y la Figura 7.7 demuestran que la homogeneidad del módulo también existe en los demás modelos. Es por este comportamiento donde los valores más altos de módulo se encuentran lejanos de la zona donde se aplica la carga, que se puede establecer un valor representativo del módulo para todo el RVE mediante el principio establecido por Saint – Venant [89], tomando como resultado el valor de módulo que presenta mayor homogeneidad en el RVE.

7.4 Esfuerzos en los modelos y comportamiento en los refuerzos.

Al estudiar el comportamiento del módulo en los modelos de RVE es importante relacionar el comportamiento en las tensiones de los compuestos que se analizaron. En esta sección se realiza un análisis de los esfuerzos de von Mises en los modelos del compuesto, así como de los reforzantes.

Los esfuerzos soportados por el RVE permiten relacionar la carga aplicada en el modelo con el módulo. La Figura 7.12 ilustra la forma en la que se generan los resultados gráficos en COMSOL al encontrar los valores de tensión. En esta se pudo observar la forma en que la carga afecta a las fibras y a las esferas, incrementando el esfuerzo que soportan, siendo que la matriz no presenta valores muy altos de esfuerzo, mientras que en las fibras se presentaron los mayores esfuerzos. Además de forma similar a los resultados en el trabajo de Zhao et al. [96], los mayores esfuerzos se encuentran en las zonas donde se hayan esquinas en contacto con los límites del modelo, algo que se puede apreciar en la Figura 7.12.

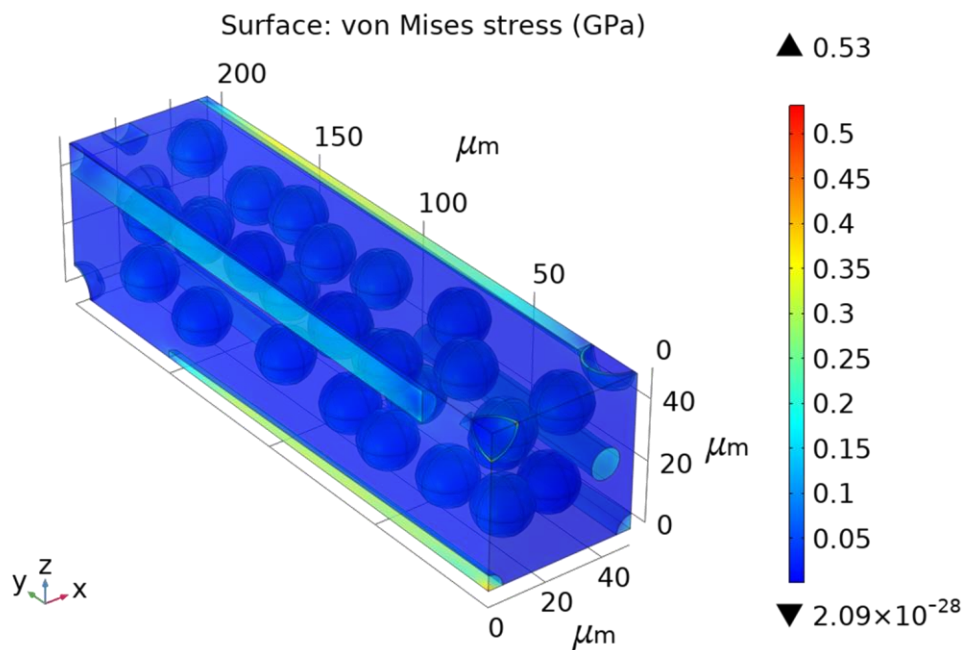


Figura 7.12: Esfuerzos de von Mises en el modelo RVE del 10% en peso de HGM.

Esto permitió entender como los reforzantes afectan a las propiedades mecánicas del material. Un primer acercamiento se encuentra en la diferencia entre las tensiones que soportan los reforzantes del RVE sin contenido de esferas y los de mayor contenido, ilustrados en la Figura 7.13 en donde se aprecia la diferencia entre la cantidad de esfuerzo soportado por los constituyentes.

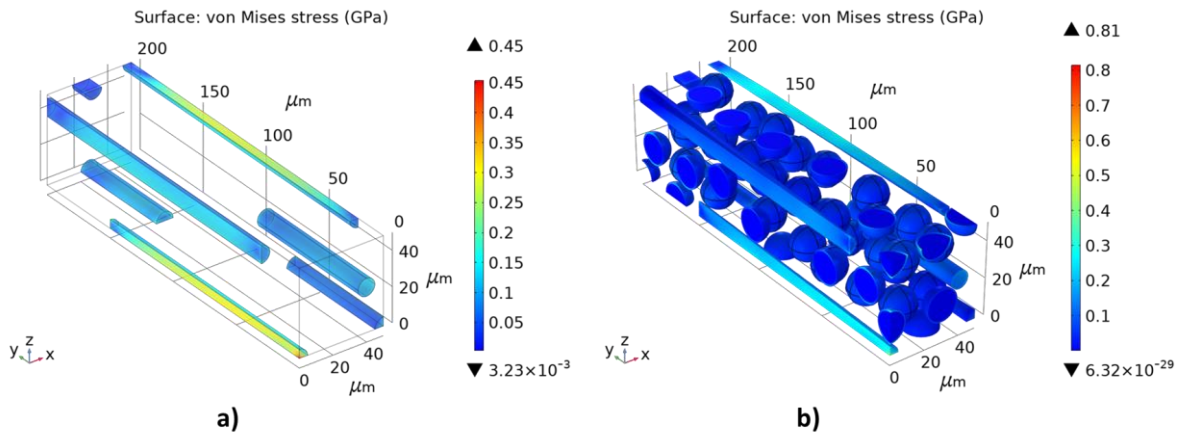


Figura 7.13: Comparación entre la tensión soportada en los reforzantes de los modelos RVE: a) sin HGM y b) contenido del 15% en peso de HGM.

En estos gráficos se observa que, con la adición de las HGM los esfuerzos se comienzan a distribuir entre fibras y esferas, en la formulación correspondiente al 15% en peso de HGM las esferas llegan a tener el mismo nivel de esfuerzo que presentan las fibras, entre 0.1 y 0.3 GPa, mientras que las zonas donde se encuentran los valores más altos de esfuerzo son en aquellas fronteras entre las esferas y la matriz o entre las fibras y la matriz.

Rivera et al. [83] menciona la importancia de la fracción volumen de los reforzantes, en donde la forma que estos tienen influye en la cantidad de esfuerzos que pueden soportar. Al analizarse esta información es consistente con los resultados obtenidos en el presente trabajo, donde a bajas concentraciones de HGM los esfuerzos que se distribuyen entre los constituyentes (esferas y fibras) son diferentes de los que se presentan en aquellos con mayores valores.

La Figura 7.14 nos presenta nuevamente los esfuerzos que soportan las fibras de vidrio en el modelo de RVE que no contiene HGM, un comportamiento que autores como Wang et al. [79] han mencionado, donde además se pueden ver los campos de desplazamiento que soporta la matriz y como estos se encuentran influenciados por las posiciones de las fibras que se encuentran dispersas en el RVE. En esta imagen se puede apreciar de igual manera como la forma de las fibras les permite soportar los esfuerzos aplicados al modelo, distribuyendo la carga a lo largo de su propia geometría mostrando valores de esfuerzo más altos en la zona central del reforzante.

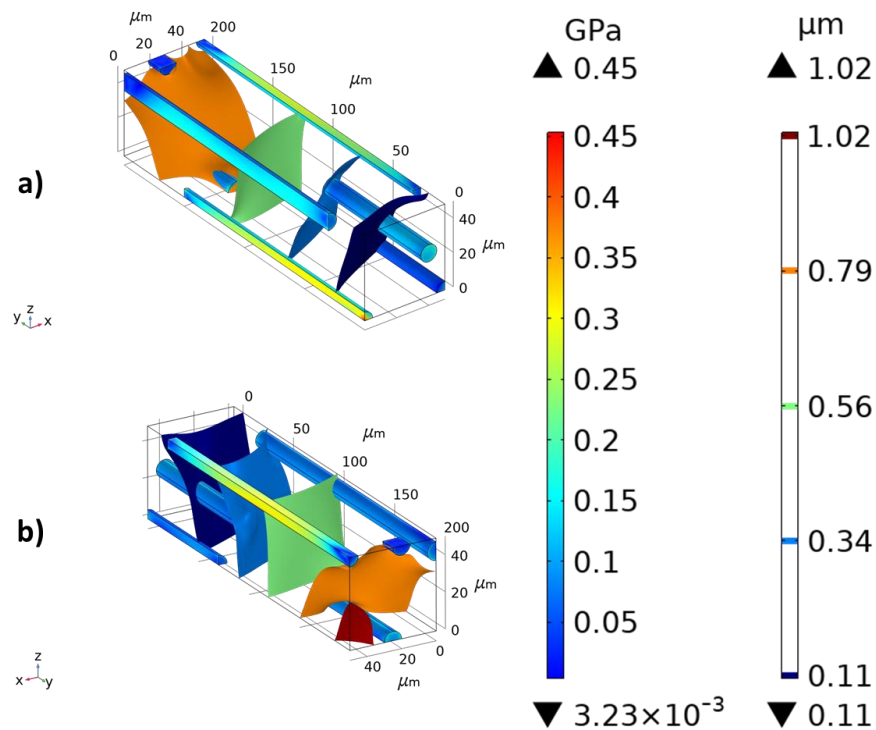


Figura 7.14: Esfuerzos de von Mises en los reforzantes del RVE sin HGM, comparado con los campos de desplazamiento: a) vista frontal y b) vista posterior.

Al comparar con la Figura 7.15 en donde ya se agregaron 5% en peso de HGM se puede apreciar que las esferas comienzan a tener cierta influencia sobre los campos de desplazamiento, donde el desplazamiento total es menor que en el RVE presentado en la Figura 7.14. Por parte de los refuerzos se aprecia que las esferas soportan esfuerzos menores que las fibras y esto es algo que cambia a medida que se agregan HGM a los modelos, consistente con lo que reportan Rivera [83] y Pan [95] con el incremento en el contenido de

reforzantes, el comportamiento de estos cambia, en el trabajo presente las esferas también mostraron cambios en su comportamiento como reforzantes a medida que su fracción volumen incrementó (incremento del contenido en % en peso).

Las esferas comenzaron a soportar mayores esfuerzos de acuerdo a los gráficos de esfuerzos von Mises en los cuales se puede apreciar el cambio en los valores mínimos, la Figura 7.16 muestra los valores de esfuerzo y los campos de deformación en el modelo que contiene 10% en peso de HGM para poder apreciar los esfuerzos que han cambiado al haber agregado mayor cantidad de esferas.

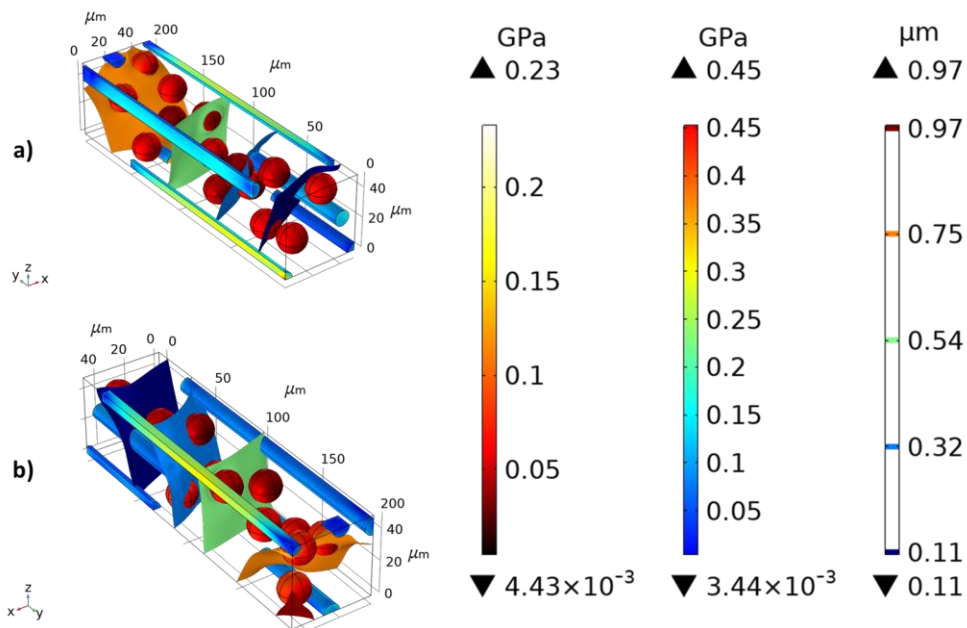


Figura 7.15: Esfuerzos de von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 5% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento: a) vista frontal y b) vista posterior.

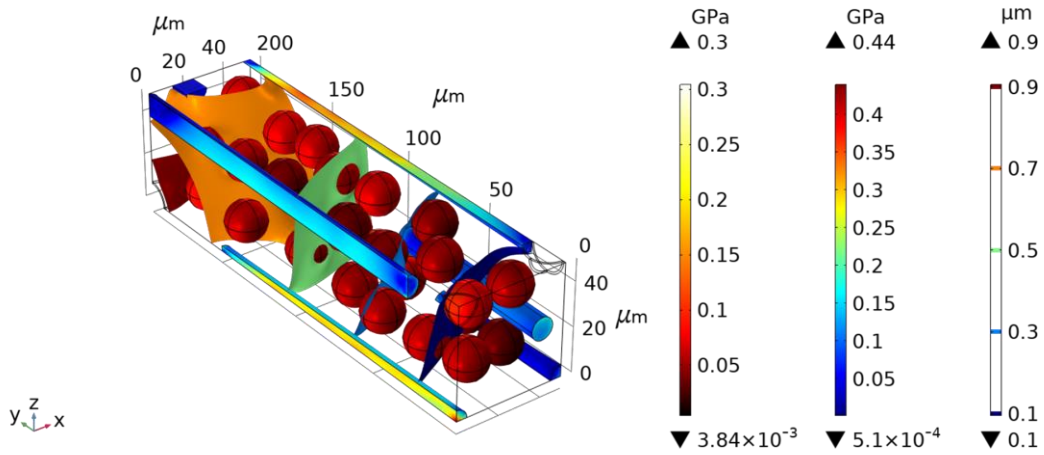


Figura 7.16: Esfuerzos de von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 10% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento.

Al comparar las imágenes en la Figura 7.15 y Figura 7.16 se aprecia la diferencia en los esfuerzos que soportan las esferas, pasando de un mínimo de $4.43 \times 10^{-3} \text{ GPa}$ hasta $3.84 \times 10^{-3} \text{ GPa}$, es decir los esfuerzos mínimos que soportaron las esferas disminuyeron, mientras que los valores máximos pasaron de 0.23 GPa a 0.3 GPa , lo que demuestra que hay zonas en las esferas donde se comienza a soportar un mayor esfuerzo. En las fibras los esfuerzos mínimos apreciados incrementaron entre el 0 y el 5% en peso de HGM presentes en el RVE y luego disminuyeron en el modelo con 10% en peso de HGM, este cambio se debe a que las esferas comienzan a recibir mayores esfuerzos y se puede continuar apreciando este cambio en la Figura 7.17 que incluye los valores de esfuerzo para el modelo que contiene el valor más alto de HGM en su composición (15% en peso).

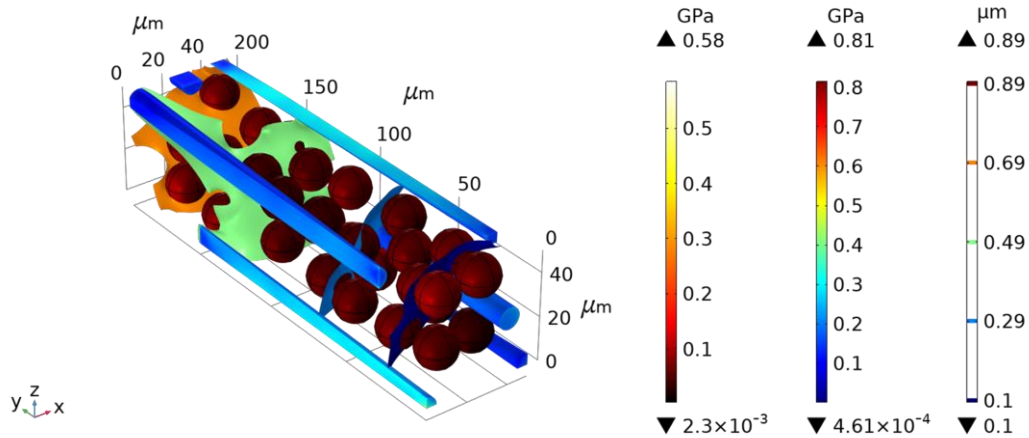


Figura 7.17: Esfuerzos de Von Mises en los reforzantes del RVE con contenido del 15% en peso de HGM, comparado con los campos de desplazamiento.

La Figura 7.17 no solo muestra como los valores máximos de esfuerzo en las esferas se incrementan, además se puede apreciar mayor homogeneidad en los valores que presentan las esferas, el valor máximo alcanzó los 0.58 *GPa*, casi el doble que en el modelo con 10% en peso de HGM.

Yáñez et al. [24] presenta en su trabajo el comportamiento de las esferas en una celda unitaria, donde éstas se comportan como esferas rígidas a bajas concentraciones y al sobrepasar el 10% en peso de HGM en el compuesto, los esfuerzos que soportan las esferas es mucho mayor, debido a que los espacios huecos presentes permiten que la carga se transfiera más fácil en las HGM que en las fibras. En este trabajo se utiliza un modelo más grande que la celda unitaria (RVE) sin embargo, se puede apreciar que, al aumentar la concentración de esferas, estas también comienzan a actuar como concentradores de esfuerzo.

A diferencia del trabajo que presenta Yáñez [24], en el presente el tamaño del RVE (50*200*50 μm) permitió el análisis de las fibras de vidrio como fibras cortas y no como fibras continuas, lo que a su vez facilita analizar las interacciones entre reforzantes, en la Figura 7.18 se comparan los esfuerzos entre los modelos con 5, 10 y 15% de HGM, así como los campos de desplazamiento, lo que permite también analizar la influencia que tienen las esferas sobre los desplazamientos de la matriz de Ny6.

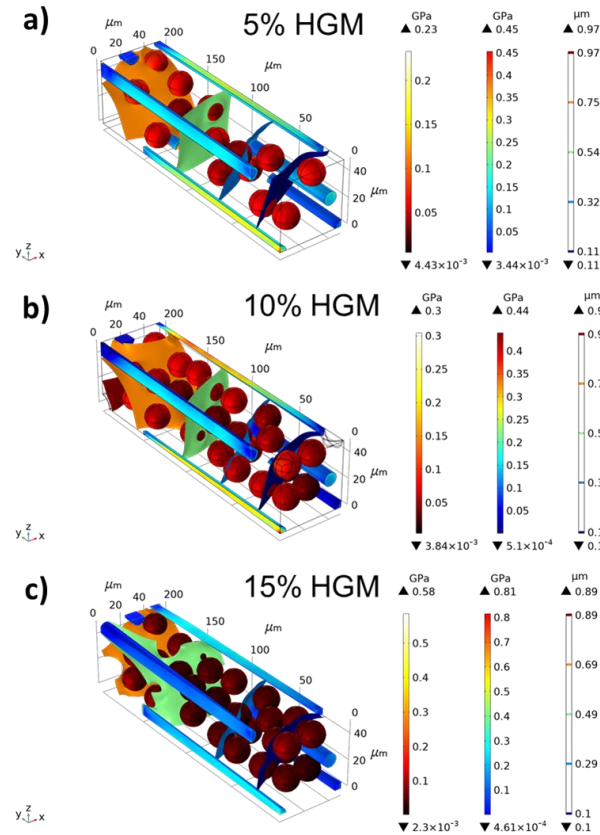


Figura 7.18: Esfuerzo y campos de desplazamiento en los reforzantes para los modelos de RVE: a) contenido de 5% en peso de HGM, b) contenido de 10% en peso de HGM y c) contenido de 15% en peso de HGM.

Al observar el cambio en los esfuerzos que soportan las esferas se puede apreciar que a medida que aumenta el contenido de estas los valores de esfuerzo en las esferas se vuelven más homogéneos, a pesar de que existen zonas donde los valores se incrementan considerablemente (pasando de un valor máximo de 0.23 GPa hasta 0.58 GPa) estas se encuentran muy localizadas mientras que la mayoría de esferas comparten valores muy similares en el modelo del 15%, mientras que en los modelos de 5 y 10% los valores de esfuerzo pueden variar bastante.

En la Figura 7.18 se puede apreciar de igual forma como los esfuerzos en las fibras de vidrio alcanzan valores similares a los de las esferas en el modelo correspondiente al 15%, es decir los esfuerzos soportados entre esferas y fibras en la mayor parte del volumen comienzan a compartir valores idénticos, corroborando con la Figura 7.17 donde se puede apreciar más de cerca la escala de color en los constituyentes, tanto las esferas como las fibras presentan en

su mayoría valores que van desde 0.1 hasta 0.3 GPa, aunque la diferencia en los valores máximos sea más notoria (0.58 *GPa* en esferas y 0.81 *GPa* en fibras), esta distribución de los esfuerzos ha demostrado que las esferas comienzan a actuar como reforzantes al alcanzar valores que superan el 10% en peso de contenido.

Al haber mayor cantidad de esferas el comportamiento del material se asemeja al de uno donde existe una cantidad significativa de poros, lo que causa que las esferas actúen como concentradores de esfuerzo [24]. En el proyecto presente se puede corroborar que esto sucede incluso al considerar las fibras cortas en vez de continuas, la geometría empleada es lo suficientemente grande para entender el comportamiento de las fibras cuando se encuentran rodeadas de esferas.

Los trabajos de Nairn [97] y Gibson [98] atienden a los efectos de la transferencia de carga por medio del mecanismo de shear lag, al aplicar estos conocimientos en los modelos de RVE utilizados fue posible determinar los cambios en la transferencia de carga en las fibras, este mecanismo explica que la mayor carga que soportan las fibras se encuentra en el centro de su geometría, por lo que esta zona es la que permite apreciar la transferencia que ocurre en las HGM al aumentar su concentración en el compuesto. Es debido a esto que el utilizar un RVE en vez de la celda unitaria es importante, ya que permite el análisis de las fibras como un elemento pequeño en vez de considerar que se extiende indefinidamente.

Es este análisis el que termina de comprobar la transferencia que ocurre en las HGM ya que al comparar las cargas en las fibras entre la concentración del 5% y la del 15% como se muestra en la Figura 7.19 fue posible apreciar que las zonas en las que disminuye considerablemente el esfuerzo soportado por las fibras son en el centro de su geometría. Donde a valores bajos de concentración de esferas se presentaban los máximos esfuerzos, ahora se presentan valores con magnitudes similares a los de las esferas.

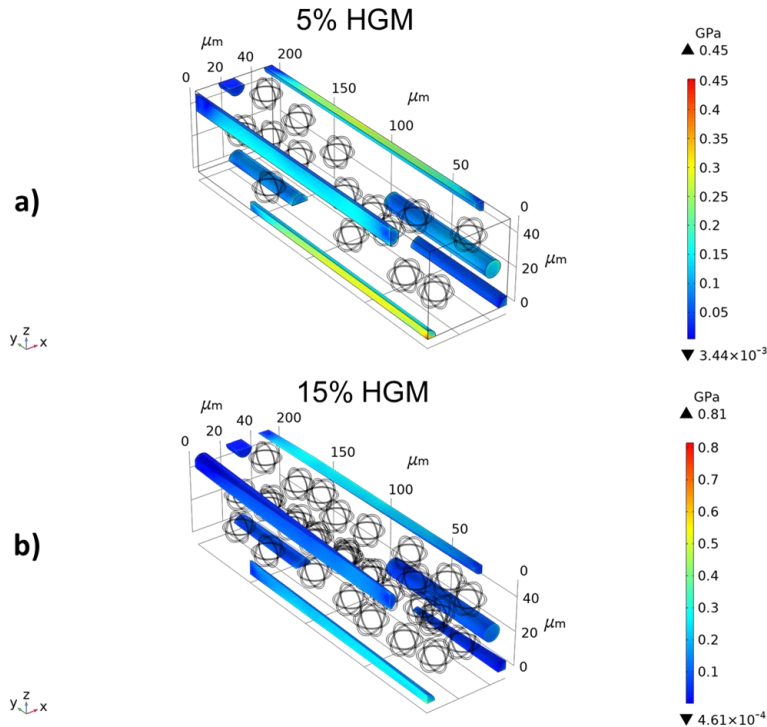


Figura 7.19: Diferencia en la magnitud de los esfuerzos soportados por las fibras en los modelos de a) 5% en peso de HGM y b) 15% en peso de HGM.

7.4.1 Elucidar el mecanismo de reforzamiento

La Figura 7.18 muestra claramente los cambios que existen entre los esfuerzos soportados en los RVEs a medida que incrementa la cantidad de esferas y como estas comienzan a distribuir la carga que soporta todo el elemento representativo. Pan [95] menciona que para elucidar el mecanismo de reforzamiento es necesario analizar las condiciones de deformación que sufren los constituyentes. En este trabajo se analizaron los campos de desplazamiento a la par de los esfuerzos de von Mises y aunque el trabajo de Yañez et al. [24] ya realiza un análisis similar, la Figura 7.20 muestra la comparación entre los esfuerzos de von Mises y el módulo para los modelos correspondientes a los contenidos del 10 y 15% en peso de HGM entre los cuales ocurre el cambio de comportamiento en las esferas, además en los modelos presentados se aprecian también los efectos que tuvo la deformación en los esfuerzos soportados, haciendo caso de las consideraciones que plantea Pan.

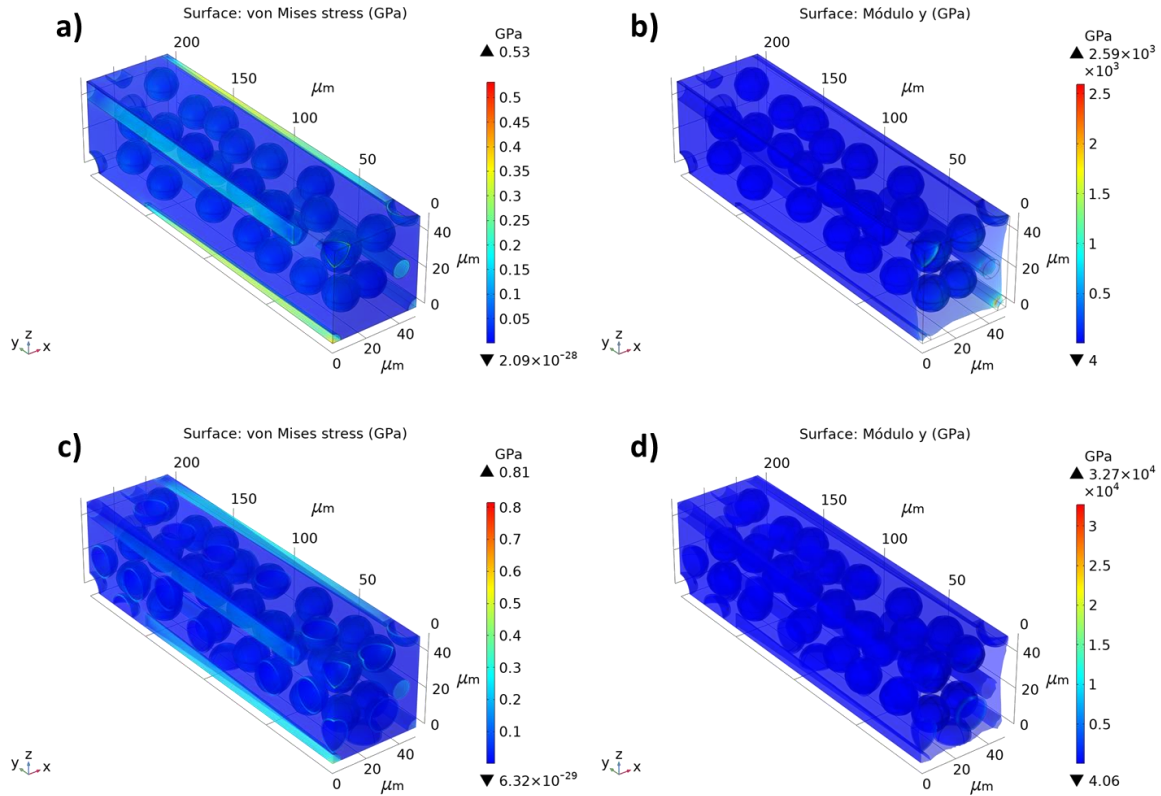


Figura 7.20: Resultados de simulación de carga en dirección y : a) esfuerzos de von Mises en el RVE con 10% e.p. HGM, b) módulo en el RVE con 10% e.p. HGM, c) esfuerzos de von Mises en el RVE con 15% e.p. HGM y d) módulo en el RVE con 15% e.p. HGM.

Considerando las diferencias presentadas en la Figura 7.20 entre los esfuerzos soportados y los valores de módulo para los RVE de 10 y 15% e.p. y además tomando en cuenta los resultados que se muestran en la Figura 7.17 se puede elucidar que el reforzamiento en el modelo con 15% de HGM se da tanto en las esferas como en las fibras, dada la homogeneidad que presentan los esfuerzos soportados entre fibras y esferas, con valores cercanos a 0.1 GPa en la Figura 7.20c y con algunas zonas que rebasan los 0.3 GPa únicamente en algunas esferas que se encuentran en las fronteras, aunque esto es normal en los límites del modelo [96].

Además, al comparar los resultados de módulo entre la Figura 7.20b y d en el caso del 15% de HGM son más reducidas las zonas con módulo elevado, incluso en los reforzantes adyacentes a la frontera inmóvil. El mecanismo de reforzamiento general establecido en este trabajo para una espuma sintáctica reforzada, asumiendo distribución homogénea de los reforzantes, interfase perfecta, cantidad de fibras de vidrio constante y de esferas huecas de

vidrio variable, es el siguiente: *conforme aumenta la cantidad de esferas, estas se dispersan más en la extensión de la matriz. Dicha distribución facilita que las esferas se sitúen en todas las regiones que sufren deformación durante la tensión. Esto hace que el esfuerzo soportado en la matriz y fibras decaiga, a medida que se transfiere hacia las esferas. Sin embargo, la presencia de huecos en las esferas, provoca que estas concentren esfuerzo en la pared interna de las mismas por estar sujetas a una deformación, lo que conlleva a la relajación elástica de las esferas. Con el aumento en la cantidad de esferas, se incrementa el nivel de relajación elástica en el compuesto, emulando la presencia de poros en la matriz, lo que finalmente produce una reducción del módulo de Young del compuesto para una cierta cantidad de esferas y un espesor de pared dado.* Esto es consistente con lo que se ha demostrado en trabajos previos, tal es el caso de Yañez et al. [24] que también ha estudiado el comportamiento de microesferas huecas de vidrio como reforzantes.

7.5 Influencia de las esferas en los desplazamientos

En la Figura 7.18 se pueden apreciar los campos de desplazamiento de la matriz para los modelos que contienen concentraciones de esferas del 5, 10 y 15% en peso, en los cuales es fácil apreciar que la distancia total desplazada es cada vez menor conforme al aumento de la cantidad de esferas presentes, esto debido a que el comportamiento de las esferas pasa a ser el de un reforzante, lo que impide en cierta medida el desplazamiento de la matriz.

Las esferas también cambian el comportamiento en el desplazamiento de la matriz por la posición en la que se encuentran, en la Figura 7.21 se comparan únicamente los campos de desplazamiento conforme a la posición de los constituyentes del compuesto. En esta imagen se pudo apreciar como las esferas afectan a la forma en la que se desplaza la matriz al aplicar la misma fuerza en una dirección.

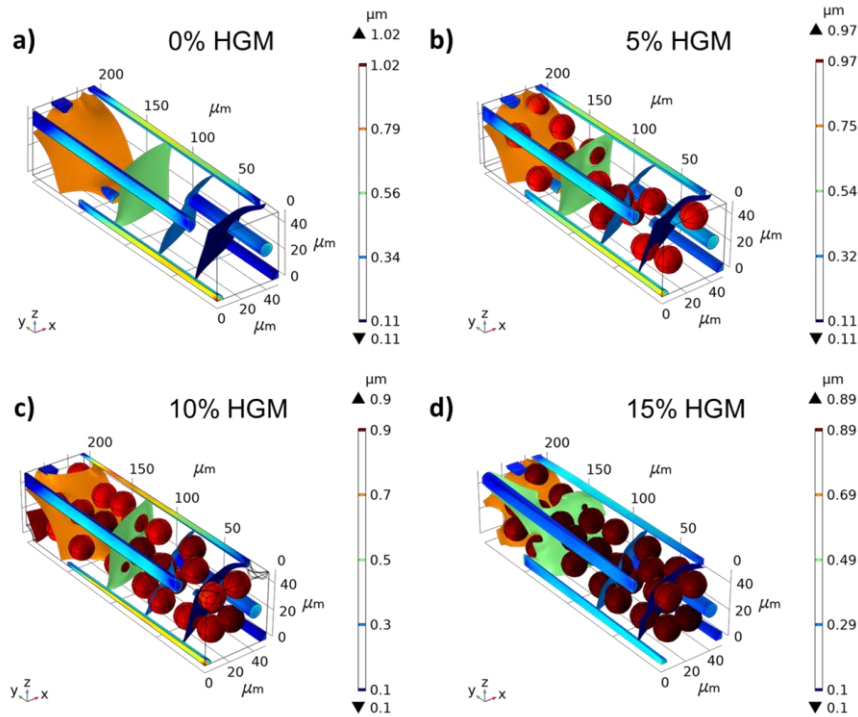


Figura 7.21: Diferentes campos de desplazamiento en los diferentes modelos de RVE y la distribución de las HGM: a) compuesto sin esferas, b) contenido de 10% en peso de HGM, c) contenido de 10% en peso de HGM y d) contenido de 15% en peso de HGM.

Las esferas comienzan a agruparse en las regiones correspondientes a los campos de desplazamiento conforme aumenta la saturación de estas en el compuesto. Al encontrarse en estas zonas, las esferas comienzan a causar relajación elástica debido a los huecos en su interior, lo que disminuye la cantidad de esfuerzo que pueden soportar. El cálculo al partir de la Ecuación 14 considera la relación entre esfuerzo y deformación; el módulo al ser constante no se modifica junto con la disminución en el esfuerzo soportado, por lo que la variable que se ve afectada es la deformación del RVE, esto es apreciable en la Figura 7.18, donde el desplazamiento pasa desde un total de $0.97 \mu\text{m}$ en la Figura 7.18a correspondiente al 5% en eso de HGM, hasta $0.89 \mu\text{m}$ en la Figura 7.19a correspondiente al 15% en eso de HGM.

En la Figura 7.21 se pudo deducir que el desplazamiento de la matriz se ve afectado por donde se encuentran posicionados los reforzantes y de la manera en la que estos interactúan con la matriz, ya que en los casos del 0 al 10% (en los que las HGM actúan como esferas rígidas) se puede apreciar que las capas de desplazamiento se ven mayormente afectadas por

las fibras de vidrio, mientras que en el modelo del 15% se puede apreciar mayormente una influencia de la cantidad de esferas sobre los desplazamientos ocasionados.

Una vez más las interacciones entre los constituyentes son acordes a lo que se esperaba, tomando como referencia los trabajos de Rivera [83] y Yáñez [24], ya que las esferas comienzan a tener efectos sobre la matriz como un refuerzo a concentraciones más altas (por encima del 10% en peso).

Es posible apreciar que la presencia de las esferas puede interferir en la deformación que sufre la matriz, sin embargo, al prestar atención a las zonas donde estas se encuentran, los campos deformados no presentan cambios notorios entre un modelo y otro si no hasta que las esferas cambian su comportamiento.

7.6 Evaluación del módulo general y comprobación del modelo

En la sección 7.3 del presente trabajo se analizaron los resultados de la simulación en consola para los módulos en las direcciones de carga a las que fueron sometidos los modelos de RVE, aunque no se había definido un valor general del módulo para el modelo.

En esta sección se definió un valor al promediar los módulos que fueron obtenidos en cada una de las direcciones usando el principio de Saint – Venant para establecer un valor fijo de los módulos en cada dirección, con lo que finalmente se lograron establecer los valores de módulo presentes en la Tabla 7.2, valores que son demasiado cercanos a los resultados experimentales ya conocidos que se presentan en el gráfico de la Figura 7.22 en donde se comparan estos valores.

Los valores obtenidos en la simulación al compararlos con los que fueron reportados anteriormente [25], muestran una diferencia muy pequeña entre ellos, en la Tabla 7.3 se muestran la comparación entre los valores y el porcentaje de error que hay entre estos valores.

Tabla 7.2: Valores de módulo promediados para hallar el módulo general de cada modelo correspondiente a los distintos contenidos de HGM.

% en peso de HGM en el RVE	Módulo en x (GPa)	Módulo en y (GPa)	Módulo en z (GPa)	Módulo (GPa)
0	2.46	3.53	2.49	2.82
2.5	2.59	3.64	2.6	2.94
5	2.59	3.71	2.63	2.97
7.5	2.61	3.83	2.77	3.07
10	2.76	4	2.92	3.22
12.5	2.74	3.9	3.07	3.23
15		4.06		

Del gráfico presente se puede deducir que el modelo de RVE utilizado fue adecuado para predecir las propiedades elásticas del material ya que los valores son muy similares y aunque en los puntos correspondientes al 10% en peso de HGM parece haber una diferencia mayor en la **Tabla 7.3** se aprecia que solo es una diferencia del 4.5%.

Tabla 7.3: Valores de módulo reportados experimentalmente comparados con los valores obtenidos por simulación.

% en peso de HGM	Módulo experimental (GPa)	Módulo en simulación (GPa)	Error (%)
0	2.77	2.82	1.87
5	2.99	2.97	0.53
10	3.08	3.22	4.49
15	3.07		

Para finalizar esta sección, así como este trabajo, se presentan en la Tabla 7.4 una comparación entre las predicciones del módulo realizadas por simulación y los modelos analíticos de regla de mezclas [20, 66] y Halpin-Tsai [73, 74] en la que se puede apreciar que tal como lo mencionan sus respectivos autores, los modelos sobrestiman el módulo del

compuesto debido a las diferentes geometrías presentes en el material, además de que los modelos de Halpin-Tsai únicamente son aplicables en compuestos que contienen fibras.

Con estos resultados se puede aseverar que el modelo de micromecánica es más adecuado para la predicción de propiedades.

Tabla 7.4: Comparación entre los valores de módulo experimental, de simulación numérica y las predicciones de algunos modelos lineales.

Contenido de HGM		Módulo			
		GPa			
		Experimental	Simulación Numérica	Regla de las mezclas	Halpin-Tsai
Fibras alineadas	Fibras aleatorias				
% peso					
0	2.77	2.82	8.37	6.32	4.78
5	2.99	2.97	13.39	---	---
10	3.08	3.22	17.27	---	---
15	3.07	---	21.72	---	---

Conclusiones

El análisis por elementos finitos basado en microestructura de una espuma sintáctica reforzada permitió elucidar su mecanismo de reforzamiento en función de la cantidad de esferas. Se encontró que *conforme aumenta la cantidad de esferas, estas se dispersan más en la extensión de la matriz. Dicha distribución facilita que las esferas se sitúen en todas las regiones que sufren deformación durante la tensión. Esto hace que el esfuerzo soportado en la matriz y fibras decaiga, a medida que se transfiere hacia las esferas. Sin embargo, la presencia de huecos en las esferas, provoca que estas concentren esfuerzo en la pared interna de las mismas por estar sujetas a una deformación, lo que conlleva a la relajación elástica de las esferas. Con el aumento en la cantidad de esferas, se incrementa el nivel de relajación elástica en el compuesto, emulando la presencia de poros en la matriz, lo que finalmente produce una reducción del módulo de Young del compuesto para una cierta cantidad de esferas y un espesor de pared dado.*

Se estableció un elemento de volumen representativo con dimensiones de $50 \times 200 \times 50 \mu\text{m}$ con esferas de $18 \mu\text{m}$ de diámetro y un espesor de pared de $0.89 \mu\text{m}$ y fibras de vidrio de $10 \mu\text{m}$ de diámetro y $400 \mu\text{m}$ de longitud, el cual se concluye que describe apropiadamente las deformaciones elásticas y nivel de esfuerzo de la espuma sintáctica reforzada, como lo demuestra la diferencia máxima de 4.5 %, entre los resultados de referencia del módulo de Young, respecto a los obtenidos numéricamente, correspondiente al modelo con 10% en peso de HGM.

Los valores de módulo de Young obtenidos aplicando el principio de Saint – Venant fueron de: 2.82 GPa para la mezcla sin contenido de esferas, 2.94 Gpa para el contenido de 2.5% de HGM, 2.97 GPa para el contenido del 5%, 3.07 GPa para el contenido del 7.5%, 3.22 GPa para el contenido de 10% de HGM y de 3.23 GPa para el contenido de 12.5% de HGM.

El estudio de convergencia no fue necesario considerando que la diferencia, entre los valores de referencia del módulo de Young respecto a los predichos numéricamente, fueron del 1.8% en el caso sin contenido de esferas, 0.53% en el caso del 5% en peso de HGM y 4.5% en el caso del 10% en peso de HGM.

Se determinó que la fracción de esferas de 12.5 % e.p. es el punto de inflexión para el módulo de Young del compuesto, y no el 10% como se determinó experimentalmente en el trabajo previo, reduciendo aún más la densidad y sin afectar el módulo de Young de la espuma con un valor máximo de 3.08 GPa.

Trabajo a futuro

Se recomienda estudiar, a través de análisis por elementos finitos, utilizando los RVEs establecidos en este trabajo, el efecto de aglomerados de esferas, modificando la posición de las mismas, para determinar la influencia de la segregación en el mecanismo de transferencia de carga de las espumas sintéticas reforzadas. Adicionalmente, se recomienda estudiar la respuesta elastoplástica para revelar si las esferas o fibras nuclean la fractura en la matriz, así como los efectos termo-mecánicos para determinar el nivel de esfuerzo residual.

Glosario

% e.p.	Por ciento en peso
APTES	Aminopropil trietoxisilano
FEA	Análisis por elemento finito
HDPE	Polietileno de alta densidad
HGM	Microesferas huecas de vidrio
Ny6	Nylon 6
Ny12	Nylon 12
PEEK	Polieteretercetona
RVE	Elemento de volumen representativo
SEM	Microscopia electrónica de barrido
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular

Referencias bibliográficas

- [1] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed. Elsevier, 2011.
- [2] S. David Müzel, E. P. Bonhin, N. M. Guimarães, and E. S. Guidi, “Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 818, Apr. 2020, doi: 10.3390/polym12040818.
- [3] D. D. L. Chung, *Composite Materials*. London: Springer London, 2003.
- [4] F. Avilés *et al.*, “Influence of carbon nanotube on the piezoresistive behavior of multiwall carbon nanotube/polymer composites,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 1, pp. 92–103, Jan. 2016, doi: 10.1177/1045389X14560367.
- [5] G. Meriç, J. E. Dahl, and I. E. Ruyter, “Physicochemical evaluation of silica-glass fiber reinforced polymers for prosthodontic applications,” *Eur. J. Oral Sci.*, vol. 113, no. 3, pp. 258–264, Jun. 2005, doi: 10.1111/j.1600-0722.2005.00209.x.
- [6] A. Hallal, A. Elmarakbi, A. Shaito, and H. El-Hage, “Overview of Composite Materials and Their Automotive Applications,” in *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*, 1st ed., Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013, pp. 3–28.
- [7] McWilliams and A, “Advanced Materials, Lightweight Materials in Transportation, report, Report Code: AVM056A,” pp. 1–6, 2007.
- [8] F. A. Shutov, “SYNTACTIC POLYMER FOAMS.,” *Adv. Polym. Sci.*, pp. 63–123, 1986, doi: 10.1007/3-540-15786-7_7.
- [9] C. S. Karthikeyan, S. Sankaran, y Kishore, “Flexural Behaviour of Fibre-Reinforced Syntactic Foams,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 290, no. 1, pp. 60–65, Ene. 2005, doi: 10.1002/mame.200400177.
- [10] J. G. Drobny, “Polymeric Materials,” *Polymers for Electricity and Electronics*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 27–133.
- [11] B. John y C. Nair, *Update on Syntactic Foams*. shropshire, UK: ISmithers, 2010.
- [12] M. Puterman, M. Narkis, y S. Kenig, “Syntactic Foams I. Preparation, Structure and

- Properties,” *J. Cell. Plast.*, vol. 16, no. 4, pp. 223–229, 1980, doi: 10.1177/0021955X8001600403.
- [13] M. Narkis, M. Puterman, y S. Kenig, “Syntactic Foams II. Preparation and Characterization Of Three-Phase Systems,” *J. Cell. Plast.*, vol. 16, no. 6, pp. 326–330, 1980, doi: 10.1177/0021955X8001600603.
- [14] E. Woldesenbet, N. Gupta, y A. Jadhav, “Effects of density and strain rate on properties of syntactic foams,” *J. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 15, pp. 4009–4017, Ago. 2005, doi: 10.1007/s10853-005-1910-2.
- [15] C. Huang, Z. Huang, Y. Qin, J. Ding, y X. Lv, “Mechanical and dynamic mechanical properties of epoxy syntactic foams reinforced by short carbon fiber,” *Polym. Compos.*, vol. 37, no. 7, pp. 1960–1970, Jul. 2016, doi: 10.1002/pc.23374.
- [16] K. S. Santhosh Kumar, C. P. Reghunadhan Nair, y K. N. Ninan, “Mechanical properties of polybenzoxazine syntactic foams,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 108, no. 2, pp. 1021–1028, Abr. 2008, doi: 10.1002/app.27030.
- [17] N. Gupta y R. Nagorny, “Tensile properties of glass microballoon-epoxy resin syntactic foams,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 102, no. 2, pp. 1254–1261, Oct. 2006, doi: 10.1002/app.23548.
- [18] M. E. Guzman, A. J. Rodriguez, B. Minaie, y M. Violette, “Processing and properties of syntactic foams reinforced with carbon nanotubes,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 124, no. 3, pp. 2383–2394, May 2012, doi: 10.1002/app.35283.
- [19] K. A. Devi, B. John, C. P. R. Nair, y K. N. Ninan, “Syntactic foam composites of epoxy-allyl phenol-bismaleimide ternary blend - Processing and properties,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 105, no. 6, pp. 3715–3722, Sep. 2007, doi: 10.1002/app.26316.
- [20] L. A. Utracki y C. A. Wilkie, “Compounding polymer blends,” *Polymer Blends Handbook*, 2^a ed., Dordrecht: Springer, 2014, pp. 919–1028.
- [21] J. Ahmad, “Introduction to Polymer Composites BT - Machining of Polymer Composites,” *Machining of Polymer Composites*, J. Ahmad, Ed. Springer US, 2009, pp. 1–35.

- [22] K. Weissenbach y H. Mack, “Silane Coupling Agents,” *Functional Fillers for Plastics*, Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, pp. 57–83.
- [23] E. P. Plueddemann, *Silane Coupling Agents*, 2ª ed. Springer US, 1991.
- [24] R. Yáñez-Macías *et al.*, “Mechanical behavior of glass fiber-reinforced Nylon-6 syntactic foams and its Young’s modulus numerical study,” *J. Appl. Polym. Sci.*, p. 50648, Mar. 2021, doi: 10.1002/app.50648.
- [25] D. Orduña, “Desarrollo de nuevas formulaciones poliméricas tenaces y ligeras a base de nylon 6 con fibra de vidrio y esferas huecas para su aplicación en autopartes,” Instituto Tecnológico de Pachuca, 2019.
- [26] F. N. Mutua, P. Lin, J. K. Koech, y Y. Wang, “Surface Modification of Hollow Glass Microspheres,” *Mater. Sci. Appl.*, vol. 03, no. 12, pp. 856–860, 2012, doi: 10.4236/msa.2012.312125.
- [27] Q. Zeng y A. Yu, “Prediction of the Mechanical Properties of Nanocomposites,” *Optimization of Polymer Nanocomposite Properties*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 301–331.
- [28] Y. Wang *et al.*, “Simplification of Hyperelastic Constitutive Model and Finite Element Analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers,” *Macromol. Theory Simulations*, vol. 29, no. 4, p. 2000009, Jul. 2020, doi: 10.1002/mats.202000009.
- [29] Y. Wang y Z. Huang, “A Review of Analytical Micromechanics Models on Composite Elastoplastic Behaviour,” *Procedia Engineering*, Ene. 2017, vol. 173, pp. 1283–1290, doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.159.
- [30] M. Loos, “Carbon nanotube reinforced composites: CNT Polymer Science and Technology,” 2014, Consultado: May 06, 2020. [Online]. Disponible: https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=qkSAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=+Marcio+Loos.+“Carbon+Nanotube+Reinforced+Composites”&ots=cEjtwNFfA&sig=_pMFAiAnRzv7C3OQjLJaWDv00wA.
- [31] Z. Tian, Y. Yan, J. Ye, Y. Hong, y X. Li, “An analytical constitutive model for progressive damage analysis of three-dimensional braided composites,” *Polym.*

Compos., vol. 39, no. 11, pp. 4188–4204, Nov. 2018, doi: 10.1002/pc.24491.

- [32] V. Komkov, “Variational Principles for Nonlinear Buckling of Elastic Columns (A Revival of Euler’s Theory),” *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 67, no. 9, pp. 419–433, Ene. 1987, doi: 10.1002/zamm.19870670905.
- [33] J. E. Rivera Salinas, “Desarrollo e innovación de materiales avanzados ligeros para el sector automotriz.”
- [34] W. Yu, M. Qian, y H. Li, “Elastic and plastic properties of epoxy resin syntactic foams filled with hollow glass microspheres and glass fibers,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 133, no. 46, Dic. 2016, doi: 10.1002/app.44188.
- [35] W. Yu, M. Qian, y H. Li, *Functional Fillers for Plastics*, vol. 133, no. 46. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- [36] H. Hargitai y I. Rácz, “Applications of Macro- and Microfiller-Reinforced Polymer Composites,” *Polymer Composites*, vol. 1, Wiley-VCH, 2012, pp. 747–790.
- [37] M. N. Subramanian, “Polymer Composites,” *Polymer Blends and Composites*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017, pp. 213–235.
- [38] M. Zampaloni *et al.*, “Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 6, pp. 1569–1580, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.01.001.
- [39] S. Heimbs y B. Van Den Broucke, “Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites,” *Polymer Composites*, vol. 1, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, pp. 185–207.
- [40] M. Xanthos, “Polymers and Polymer Composites,” *Functional Fillers for Plastics*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010, pp. 1–18.
- [41] U. K. Komal, M. K. Lila, S. Chaitanya, y I. Singh, “Fabrication of Short Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Reinforced Polymer Composites*, Weinheim,

Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2019, pp. 21–38.

- [42] Y. Yoo, M. W. Spencer, y D. R. Paul, “Morphology and mechanical properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites,” *Polymer (Guildf)*., vol. 52, no. 1, pp. 180–190, Ene. 2011, doi: 10.1016/j.polymer.2010.10.059.
- [43] N. Gupta, D. Pinisetty, y V. C. Shunmugasamy, *Reinforced Polymer Matrix Syntactic Foams*. Cham: Springer International Publishing, 2013.
- [44] M. Dimchev, R. Caeti, y N. Gupta, “Effect of carbon nanofibers on tensile and compressive characteristics of hollow particle filled composites,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 3, pp. 1332–1337, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.09.007.
- [45] L. Wang, J. Zhang, X. Yang, C. Zhang, W. Gong, y J. Yu, “Flexural properties of epoxy syntactic foams reinforced by fiberglass mesh and/or short glass fiber,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 929–936, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.065.
- [46] G. Tagliavia, M. Porfiri, y N. Gupta, “Analysis of flexural properties of hollow-particle filled composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 86–93, Ene. 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.03.004.
- [47] F. V. Antunes, J. A. M. Ferreira, y C. Capela, “Numerical modelling of the Young’s modulus of syntactic foams,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 47, no. 2, pp. 78–84, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.finel.2010.09.007.
- [48] C. S. Karthikeyan, S. Sankaran, y Kishore, “Influence of chopped strand fibres on the flexural behaviour of a syntactic foam core system,” *Polym. Int.*, vol. 49, no. 2, pp. 158–162, Feb. 2000, doi: 10.1002/(SICI)1097-0126(200002)49:2<158::AID-PI319>3.0.CO;2-8.
- [49] Y. J. Huang, L. Vaikhanski, y S. R. Nutt, “3D long fiber-reinforced syntactic foam based on hollow polymeric microspheres,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 3, pp. 488–496, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.02.014.
- [50] C. S. Karthikeyan, S. Sankaran, y Kishore, “Investigation of bending modulus of fiber-reinforced syntactic foams for sandwich and structural applications,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 254–256, Mar. 2007, doi: 10.1002/pat.828.

- [51] C. S. Karthikeyan, S. Sankaran, y Kishore, “Elastic behaviour of plain and fibre-reinforced syntactic foams under compression,” *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 6, pp. 995–999, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.matlet.2003.08.012.
- [52] C. S. Karthikeyan, S. Sankaran, M. N. Jagdish Kumar, y Kishore, “Processing and compressive strengths of syntactic foams with and without fibrous reinforcements,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 81, no. 2, pp. 405–411, Jul. 2001, doi: 10.1002/app.1452.
- [53] K. K. Chawla y N. Chawla, “Automotive Composites,” *Wiley Encyclopedia of Composites*, 2^a ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 1–6.
- [54] C. Unterweger, O. Brüggemann, y C. Fürst, “Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization,” *Polym. Compos.*, vol. 35, no. 2, pp. 227–236, Feb. 2014, doi: 10.1002/pc.22654.
- [55] J. Whan y C. D. R. Paul, “Glass fiber-reinforced polyamide composites toughened with ABS and EPR-g-MA,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 80, no. 3, pp. 484–497, Abr. 2001, doi: 10.1002/1097-4628(20010418)80:3<484::AID-APP1122>3.0.CO;2-5.
- [56] K. Han, Z. Liu, y M. Yu, “Preparation and Mechanical Properties of Long Glass Fiber Reinforced PA6 Composites Prepared by a Novel Process,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 290, no. 7, pp. 688–694, Jul. 2005, doi: 10.1002/mame.200500051.
- [57] T. Matsubara, M. Tanaka, M. Kusaka, K. Yamada, y Y. Nakao, “Hollow glass microspheres and process for their production,” May 31, 2001.
- [58] 3M, “Glass bubbles floated series.” https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/All-3M-Products/?N=5002385+8711017+3294857497&Ntt=glass+bubbles+floated+product+series&rt=rs (accessed May 29, 2020).
- [59] “3m glass bubbles floated series - Buscar con Google.” <https://www.google.com/search?q=3m+glass+bubbles+floated+series&oq=3m+glass+bubbles+floated+series&aqs=chrome..69i57j0l2.9076j0j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (accessed May 29, 2020).
- [60] N. Q. Nguyen y N. Gupta, “Analyzing the effect of fiber reinforcement on properties

- of syntactic foams,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 23, pp. 6422–6428, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.06.077.
- [61] D. J. Lowe, A. V. Chapman, S. Cook, y J. J. C. Busfield, “Micromechanical models of young’s modulus of NR/organoclay nanocomposites,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 49, no. 22, pp. 1621–1627, Nov. 2011, doi: 10.1002/polb.22355.
- [62] L. Broutman y R. Krock, “Modern Composite Materials,” 1967.
- [63] C. Chan, J. Wu, J. Li y Y. Cheung, “Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites,” *Elsevier*, Consultado: May 22, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386102001209>.
- [64] Q.-X. Zhang, Z.-Z. Yu, X.-L. Xie, y Y.-W. Mai, “Crystallization and impact energy of polypropylene/CaCO₃ nanocomposites with nonionic modifier,” *Elsevier*, 2004, doi: 10.1016/j.polymer.2004.06.044.
- [65] M. Haghghat, A. Zadhoush, y S. Nouri Khorasani, “Physicomechanical properties of α -cellulose-filled styrene-butadiene rubber composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 96, no. 6, pp. 2203–2211, Jun. 2005, doi: 10.1002/app.21691.
- [66] G. Yerbolat, S. Amangeldi, M. H. Ali, N. Badanova, A. Ashirbeok, y G. Islam, “Composite materials property determination by Rule of Mixture and Monte Carlo Simulation,” *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Adv. Manuf. ICAM 2018*, pp. 384–387, Ene. 2019, doi: 10.1109/AMCON.2018.8615034.
- [67] C. P. Wong y R. S. Bollampally, “Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 74, no. 14, pp. 3396–3403, Dic. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19991227)74:14<3396::AID-APP13>3.0.CO;2-3.
- [68] Z. Hashin y S. Shtrikman, “On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 10, no. 4, pp. 335–342, Oct. 1962, doi: 10.1016/0022-5096(62)90004-2.
- [69] Z. Hashin y S. Shtrikman, “A variational approach to the theory of the elastic

- behaviour of multiphase materials,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 11, no. 2, pp. 127–140, Mar. 1963, doi: 10.1016/0022-5096(63)90060-7.
- [70] M. Porfiri y N. Gupta, “Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 166–173, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.compositesb.2008.09.002.
- [71] P. Marur, “Effective elastic moduli of syntactic foams,” *Elsevier*, Consultado: May 22, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X05001655>.
- [72] R. Pal, “New models for effective Young’s modulus of particulate composites,” *Elsevier*, Consultado: May 22, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983680500048X>.
- [73] J. C. Halpin y J. L. Kardos, “The Halpin-Tsai equations: A review,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 5, pp. 344–352, May 1976, doi: 10.1002/pen.760160512.
- [74] D. Ali y S. Sen, “Finite element analysis of the effect of boron nitride nanotubes in beta tricalcium phosphate and hydroxyapatite elastic modulus using the RVE model,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 90, pp. 336–340, Abr. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.003.
- [75] C. F. Fan y S. L. Hsu, “A study of stress distribution in model composites by using finite-element analysis. I. End effects,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 30, no. 6, pp. 603–618, May 1992, doi: 10.1002/polb.1992.090300612.
- [76] E. Ghassemieh y V. Nassehi, “Stiffness analysis of polymeric composites using the finite element method,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 42–57, Mar. 2001, doi: 10.1002/1098-2329(200121)20:1<42::AID-ADV1003>3.0.CO;2-F.
- [77] W. J. Drugan y J. R. Willis, “A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 44, no. 4, pp. 497–524, Abr. 1996, doi: 10.1016/0022-5096(96)00007-5.
- [78] D. Carolan, A. Mayall, J. P. Dear, y A. D. Fergusson, “Micromechanical modelling of

- syntactic foam,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 183, p. 107701, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107701.
- [79] Y. Wang, B. Ya, B. Zhou, L. Meng, y X. Zhang, “Numerical simulation of the mechanical properties of a carbon-fiber-reinforced hollow glass microsphere–epoxy syntactic foam,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 8, p. 47083, Feb. 2019, doi: 10.1002/app.47083.
- [80] E. M. Dede, J. Lee, y T. Nomura, *Multiphysics Simulation*, September. London: Springer London, 2014.
- [81] Y. X. Lu, H. Y. Jing, Y. D. Han, y L. Y. Xu, “A finite element model of carbon steel welded joint corrosion under plastic strain,” *Mater. Corros.*, vol. 69, no. 2, pp. 227–238, Feb. 2018, doi: 10.1002/maco.201709620.
- [82] G. D. Ercolani, N. F. Ortega, y D. H. Felix, “Detección de daño en vigas de hormigón pretensado mediante el método de curvatura de la elástica,” *Hormigón y Acero*, vol. 69, no. 284, pp. 39–48, Ene. 2018, doi: 10.1016/j.hya.2017.09.002.
- [83] J. E. Rivera-Salinas *et al.*, “Simulation on the Effect of Porosity in the Elastic Modulus of SiC Particle Reinforced Al Matrix Composites,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 3, p. 391, Mar. 2020, doi: 10.3390/met10030391.
- [84] D. Wang, J. Lee, K. Holland, T. Bibby, S. Beaudoin, y T. Cale, “Von Mises Stress in Chemical-Mechanical Polishing Processes,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 144, no. 3, pp. 1121–1127, Mar. 1997, doi: 10.1149/1.1837542.
- [85] R. W. Pryor, *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Sudbury, USA: Jones and Bartlett Publishers, 2009.
- [86] M. K. Kassa y A. B. Arumugam, “Micromechanical modeling and characterization of elastic behavior of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites: A combined numerical approach and experimental verification,” *Polym. Compos.*, vol. 41, no. 8, pp. 3322–3339, Ago. 2020, doi: 10.1002/PC.25622.
- [87] S. K. Georgantzinis, G. I. Giannopoulos, y N. K. Anifantis, “Numerical investigation of elastic mechanical properties of graphene structures,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10,

pp. 4646–4654, Dic. 2010, doi: 10.1016/J.MATDES.2010.05.036.

- [88] D. Salvi, D. Boldor, J. Ortego, G. M. Aita, y C. M. Sabliov, “Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating: A Critical Comparison of COMSOL and ANSYS,” *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 44, no. 4, pp. 187–197, Ene. 2010, doi: 10.1080/08327823.2010.11689787.
- [89] B. Saint-Venant, *Memories des Savants Etrangers, Vol. 14*. Paris, France.: Paris Academie des Sciences, 1855.
- [90] H. Sönnnerlind, “Applying and Interpreting Saint-Venant’s Principle | COMSOL Blog.” <https://www.comsol.com/blogs/applying-and-interpreting-saint-venants-principle/> (Consultado el Ene. 25, 2021).
- [91] A. A. Santiago, J. Vargas, L. Pérez, C. Corona-García, y I. Alfonso, “Mathematical and finite element analysis estimations of the reinforcement effect on Young’s modulus of polymer membrane/montmorillonite clay nanocomposites,” *Polym. Compos.*, vol. 42, no. 4, pp. 2112–2121, Abr. 2021, doi: 10.1002/PC.25963.
- [92] J. A. M. Ferreira, C. Capela, y J. D. Costa, “A study of the mechanical behaviour on fibre reinforced hollow microspheres hybrid composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 3, pp. 345–352, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.10.018.
- [93] W. Yu y H. Xue, “Effect of soaking corrosion on flexural properties of carbon fiber reinforced epoxy syntactic foams,” *Fibers Polym.*, vol. 18, no. 5, pp. 971–978, May 2017, doi: 10.1007/s12221-017-7057-3.
- [94] C. T. Sun y R. S. Vaidya, “Prediction of composite properties from a representative volume element,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 171–179, Ene. 1996, doi: 10.1016/0266-3538(95)00141-7.
- [95] Z. Pan, R. Huang, y Z. Liu, “Prediction of the thermomechanical behavior of particle reinforced shape memory polymers,” *Polym. Compos.*, vol. 40, no. 1, pp. 353–363, Jan. 2019, doi: 10.1002/PC.24658.
- [96] W. Zhao, C. Liu, F. Wu, y C. Lenardi, “Investigation on the mechanical behavior of

poly(2-hydroxyethyl methacrylate) hydrogel membrane under compression in the assembly process of microfluidic system,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 52, no. 7, pp. 485–495, Abr. 2014, doi: 10.1002/POLB.23449.

- [97] J. A. Nairn, “On the use of shear-lag methods for analysis of stress transfer in unidirectional composites,” *Mech. Mater.*, vol. 26, no. 2, pp. 63–80, Sep. 1997, doi: 10.1016/S0167-6636(97)00023-9.
- [98] A. G. Gibson, J. S. Holt, y P. S. Hope, “FACTORS AFFECTING STRESS TRANSMISSION IN CRYSTALLINE POLYMERS.,” *J Polym Sci Polym Phys Ed*, vol. 17, no. 8, pp. 1375–1394, Ago. 1979, doi: 10.1002/pol.1979.180170809.