



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

**TESIS:**

**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPUESTOS DE PET RECICLADO CON  
SARGAZO POR IMPRESIÓN 3D**

Que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Química**

Presenta

**Ing. Roberto Domingo Mares Navarro**

**G17071399**

**No. CVU de CONACyT 1315801**

Director de Tesis

**Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz**

**No. CVU de CONACyT 269015**

Co-director de Tesis

**Dra. Cynthia Graciela Flores Hernández**

Ciudad Madero, Tamaulipas

Junio 2026



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Ciudad Madero**  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **19/Marzo/2026**

**Oficio No. U1.042/2026**

**ASUNTO:** Autorización de Impresión

**C. ROBERTO DOMINGO MARES NAVARRO**  
**No. DE CONTROL G17071399**  
**P R E S E N T E**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

|              |                                        |
|--------------|----------------------------------------|
| PRESIDENTA : | DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ      |
| SECRETARIA:  | DRA. CYNTHIA GRACIELA FLORES HERNÁNDEZ |
| VOCAL :      | DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA           |
| SUPLENTE:    | M.P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CINCO        |

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPUESTOS DE PET RECICLADO CON SARGAZO  
POR IMPRESIÓN 3 D"**

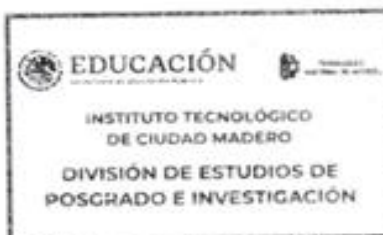
Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica.  
"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®*



**JOSÉ AARÓN MELO BANDA**  
**ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo  
JAMB/DVV/aapl



**2026**  
año de  
**Margarita**  
**Maza**



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N, Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tamaulipas.  
Tel. (833) 3574820, ext. 3110 depi\_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx www.cdmadero.tecnm.mx

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer con todo mi corazón a Dios por darme la oportunidad de alcanzar una de mis metas más importantes en mi carrera profesional. A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada decisión que he tomado; todo lo que hago es por y para ustedes.

También merece un agradecimiento especial mi directora de tesis, la Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz, por su guía invaluable, su paciencia, sus consejos y las enseñanzas que me ha brindado, no solo en la elaboración de esta tesis, sino también en aspectos fundamentales de la vida. Me siento verdaderamente honrado de haber sido parte de su equipo.

Además, expreso mi gratitud a los miembros de mi comité tutorial: la M.P. María Yolanda Chávez Cinco, el Dr. José Luis Rivera Armenta y la Dra. Cynthia Graciela Flores Hernández, por sus valiosas observaciones y contribuciones a este estudio.

A mis profesores de posgrado, el Dr. Ricardo Alamilla García y la Dra. Nancy Patricia Díaz Zavala, coordinadora del programa, les agradezco su apoyo en cada reto que enfrenté como estudiante.

No puedo olvidar a mis compañeros, especialmente a mis amigos Montes y Carlos, con quienes compartí experiencias y momentos inolvidables que siempre llevaré en mi corazón.

Por último, expreso mi más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado a través de la beca número 40031836, el cual me permitió formar parte del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Este logro es el resultado de años de esfuerzo, dedicación y aprendizaje constante, junto con el respaldo de todas las personas que confiaron en mí durante este proceso. Cada consejo, palabra de aliento y muestra de apoyo fueron clave para no rendirme ante las dificultades. A todos ustedes, gracias por ser parte de este sueño que hoy se hace realidad.

## **Nomenclatura**

| <b>Abreviatura</b> | <b>Descripción</b>                                |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| FFF                | Fabricación con Filamento Fundido.                |
| G.code             | Código de Máquina.                                |
| STL                | Lenguaje de Teselación Estándar.                  |
| PLA                | Ácido poliláctico                                 |
| ABS                | Acrilonitrilo butadieno estireno                  |
| PETG               | Tereftalato de polietileno modificado con glicol. |
| PHR                | Partes por Cien de Hule                           |
| PS                 | Partículas de Sargazo                             |
| DSC                | Calorimetría Diferencial de Barrido               |
| TGA                | Análisis Termogravimétrico                        |
| MFI                | Índice de flujo de fusión                         |
| SEM                | Microscopía electrónica de barrido                |
| PETR               | Polietilentereftalato reciclado                   |

## **Abstract**

The increasing consumption of polyethylene terephthalate (PET) has generated significant environmental concerns due to its accumulation in natural ecosystems and limited biodegradability. At the same time, the massive proliferation of sargassum along the coasts of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico has caused ecological, economic, and social impacts. In this context, this study proposes a sustainable alternative through the development of recycled PET composites reinforced with sargassum particles, processed by extrusion and 3D printing under a circular economy approach.

Post-consumer PET bottles were used as the polymer matrix, while sargassum biomass collected from Miramar Beach, Tamaulipas, Mexico, was washed, dried, milled, and sieved to obtain particles with an average size of 53  $\mu\text{m}$ . The composites were formulated with 1, 3, and 5 parts per hundred resin (phr) of sargassum, along with an unreinforced reference sample. The materials were then processed by extrusion to obtain 1.75 mm diameter filaments, which were used in fused filament fabrication (FFF) to produce test specimens.

The characterization included FTIR, TGA, DSC, DMA, MFI, optical microscopy, SEM, and tensile and impact mechanical tests. The results showed that the interaction between recycled PET and sargassum was mainly physical. The incorporation of the reinforcement caused a slight decrease in thermal stability, minor changes in crystallization and melting temperatures, as well as variations in melt viscosity and viscoelastic behavior. From a mechanical and morphological perspective, the formulation containing 1 phr showed the best balance among thermal stability, processability, reinforcement dispersion, and properties close to those of unreinforced recycled PET. In contrast, higher sargassum contents reduced mechanical strength, decreased impact energy absorption, and promoted particle agglomeration.

In conclusion, sargassum is a viable natural reinforcement for recycled PET when used at low concentrations. Its controlled incorporation represents a sustainable alternative for manufacturing biocomposites applicable in additive manufacturing and low structural-demand components, contributing to the valorization of plastic waste and marine biomass.

## Resumen

El creciente consumo de tereftalato de polietileno (PET) ha generado importantes problemas ambientales debido a su acumulación en ecosistemas naturales y a su limitada biodegradabilidad. Paralelamente, la proliferación masiva de sargazo en las costas del Caribe y del Golfo de México ha ocasionado impactos ecológicos, económicos y sociales. En este contexto, el presente estudio propone una alternativa sostenible mediante la elaboración de compuestos de PET reciclado reforzados con partículas de sargazo, procesados por extrusión e impresión 3D bajo un enfoque de economía circular.

Se utilizaron botellas de PET posconsumo como matriz polimérica y sargazo recolectado en Playa Miramar, Tamaulipas, México, el cual fue lavado, secado, molido y tamizado hasta obtener partículas con un tamaño promedio de 53  $\mu\text{m}$ . Los compuestos se formularon con 1, 3 y 5 partes por cien de resina (phr) de sargazo, además de una muestra de referencia sin refuerzo. Posteriormente, los materiales fueron procesados por extrusión para obtener filamentos de 1.75 mm de diámetro, empleados en fabricación por filamento fundido (FFF) para producir probetas de ensayo.

La caracterización incluyó FTIR, TGA, DSC, DMA, MFI, microscopía óptica, SEM y ensayos mecánicos de tracción e impacto. Los resultados mostraron que la interacción entre el PET reciclado y el sargazo fue principalmente física. La incorporación del refuerzo provocó una ligera disminución en la estabilidad térmica, cambios menores en las temperaturas de cristalización y fusión, así como variaciones en la viscosidad en fundido y en el comportamiento viscoelástico. Mecánica y morfológicamente, la formulación con 1 phr presentó el mejor equilibrio entre estabilidad térmica, procesabilidad, dispersión del refuerzo y propiedades cercanas al PET reciclado sin refuerzo. En contraste, mayores contenidos de sargazo redujeron la resistencia mecánica, disminuyeron la absorción de energía al impacto y favorecieron la formación de aglomerados. En conclusión, el sargazo constituye un refuerzo natural viable para el PET reciclado cuando se emplea en bajas concentraciones. Su incorporación controlada representa una alternativa sostenible para fabricar biocompuestos aplicables en manufactura aditiva y componentes de baja exigencia estructural, contribuyendo a la valorización de residuos plásticos y biomasa marina.

## Introducción

El consumo masivo de plásticos representa una de las principales problemáticas ambientales de la actualidad. Entre los materiales más utilizados se encuentra el tereftalato de polietileno (PET), ampliamente empleado en la fabricación de envases, fibras y películas debido a su resistencia química, transparencia, ligereza y adecuadas propiedades mecánicas. No obstante, su lenta degradación y la acumulación de grandes volúmenes de residuos han generado impactos negativos en ecosistemas terrestres y marinos. A pesar de los avances en materia de reciclaje, una proporción significativa del PET posconsumo no es reincorporada eficientemente a nuevos ciclos productivos, lo que hace necesario desarrollar estrategias de valorización sustentable que permitan su aprovechamiento en productos de ingeniería y manufactura con mayor valor agregado.

De manera paralela, la proliferación del sargazo, macroalga parda del género *Sargassum*, en las costas del Caribe y del Golfo de México se ha intensificado durante la última década, ocasionando problemas ambientales, económicos y sociales. Este residuo marino contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, alginatos, compuestos orgánicos y sales minerales, componentes que le confieren potencial para ser empleado como refuerzo natural en matrices poliméricas. En este sentido, la combinación de PET reciclado con partículas de sargazo puede constituir una alternativa viable bajo un enfoque de economía circular, al integrar dos residuos abundantes en el desarrollo de un material compuesto con menor impacto ambiental.

En el presente trabajo se desarrollaron compuestos de PET reciclado reforzados con partículas de sargazo, con el objetivo de evaluar la influencia del contenido de biomasa marina sobre las propiedades estructurales, térmicas, reológicas, morfológicas y mecánicas del material. Para ello, el sargazo recolectado en Playa Miramar, Tamaulipas, fue sometido a procesos de lavado, secado, molienda y tamizado hasta obtener partículas con un tamaño promedio de 53  $\mu\text{m}$ . Por su parte, el PET posconsumo fue triturado hasta alcanzar un tamaño aproximado de 2 mm. Posteriormente, se prepararon formulaciones con 1, 3 y 5 partes por cien de resina (phr) de sargazo, denominadas P\_1, P\_3 y P\_5, respectivamente, además de una muestra de referencia sin refuerzo identificada como P\_0.

Los compuestos fueron procesados mediante extrusión en fundido utilizando un extrusor monohusillo, con un perfil de temperatura controlado desde la zona de alimentación hasta el dado, sin exceder los 240 °C, y una velocidad de operación de 40 rpm. A partir de este proceso se obtuvieron filamentos de 1.75 mm de diámetro, los cuales fueron empleados en la fabricación de probetas mediante impresión 3D por fabricación con filamento fundido (FFF), utilizando una impresora Ender 3 a una temperatura de impresión de 260 °C y una temperatura de cama de 60 °C.

La caracterización de los materiales se realizó mediante diversas técnicas instrumentales. A través de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se identificaron los grupos funcionales característicos del PET reciclado y se evaluaron posibles modificaciones estructurales asociadas con la incorporación del sargazo. El análisis termogravimétrico (TGA) y su derivada (DTG) permitieron determinar la estabilidad térmica de los compuestos, mientras que la calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitió analizar las transiciones térmicas del polímero, principalmente las temperaturas de cristalización y fusión.

Asimismo, se evaluaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción e impacto, con el propósito de determinar el efecto del contenido de sargazo sobre la resistencia, rigidez, elongación y capacidad de absorción de energía del material. Complementariamente, el análisis dinámico-mecánico (DMA) permitió estudiar el comportamiento viscoelástico de los compuestos mediante el módulo de almacenamiento, el módulo de pérdida, el factor de amortiguamiento  $\tan \delta$  y la temperatura de transición vítrea. Además, el índice de fluidez (MFI) permitió relacionar la incorporación del refuerzo natural con la procesabilidad del PET reciclado en estado fundido.

Finalmente, la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron analizar la morfología de los compuestos, la dispersión de las partículas de sargazo y la posible presencia de aglomerados o defectos interfaciales. En conjunto, estas caracterizaciones permitieron establecer una relación entre la estructura, la estabilidad térmica, la procesabilidad, la morfología y el desempeño mecánico de los compuestos PET/sargazo.

Los resultados obtenidos permiten establecer que el PET reciclado sin refuerzo (P\_0) presentó mayor estabilidad térmica y una estructura más homogénea, mientras que la incorporación de bajas proporciones de sargazo, especialmente en la formulación P\_1, permitió conservar un desempeño térmico-mecánico adecuado y una dispersión relativamente uniforme del refuerzo. En contraste, contenidos superiores de sargazo, como en P\_3 y P\_5, favorecieron la formación de heterogeneidades y posibles aglomerados, lo que redujo la resistencia mecánica y afectó el desempeño global del material. Por lo tanto, el uso controlado de sargazo en bajas concentraciones representa una alternativa viable para el desarrollo de biocompuestos sostenibles de PET reciclado con potencial aplicación en impresión 3D y manufactura aditiva de baja exigencia estructural.

## Índice de Contenido

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| Agradecimientos .....                                            | ii  |
| Nomenclatura .....                                               | iii |
| Abstract .....                                                   | iv  |
| Resumen .....                                                    | v   |
| Introducción .....                                               | vi  |
| 1. MARCO TEÓRICO .....                                           | 1   |
| 1.1 Antecedentes .....                                           | 1   |
| 1.2 Polietilentereftalato (PET) .....                            | 3   |
| 1.3 Propiedades físicas del PET .....                            | 4   |
| 1.4 Análisis del ciclo de vida e impacto ambiental del PET ..... | 7   |
| 1.5 Sargazo .....                                                | 8   |
| 1.6 Composición química del sargazo .....                        | 9   |
| 1.7 Cristalización en polímeros .....                            | 13  |
| 1.8 Materiales compuestos .....                                  | 14  |
| 1.8.1 Funciones de la matriz .....                               | 14  |
| 1.8.2 Funciones del refuerzo .....                               | 15  |
| 1.9 Clasificación de materiales compuestos .....                 | 16  |
| 1.9.1 Según su refuerzo .....                                    | 16  |
| 1.9.2 Según su matriz .....                                      | 17  |
| 1.10 Fibras naturales .....                                      | 18  |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.11 Problemáticas en materiales compuestos con refuerzos naturales.....  | 20 |
| 1.12 Extrusión .....                                                      | 22 |
| 1.13 Parámetros de extrusión .....                                        | 24 |
| 1.14 Impresión 3D .....                                                   | 25 |
| 1.15 Parámetros de la impresión 3D .....                                  | 25 |
| 2. METODOLOGÍA .....                                                      | 28 |
| 2.1 Materiales .....                                                      | 29 |
| 2.2 Obtención de las partículas de PET .....                              | 30 |
| 2.3 Obtención de las partículas de sargazo .....                          | 31 |
| 2.4 Operación del extrusor de plástico Beutelspacher .....                | 32 |
| 2.5 Condiciones de extrusión de filamentos de compuestos PET/sargazo..... | 33 |
| 2.6 Impresión 3D .....                                                    | 34 |
| 2.7 Técnicas de caracterización de materiales .....                       | 35 |
| 2.7.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....   | 35 |
| 2.7.2 Análisis termogravimétrico (TGA) .....                              | 36 |
| 2.7.3 Resistencia a la tracción .....                                     | 38 |
| 2.7.4 Resistencia al impacto .....                                        | 39 |
| 2.7.5 Análisis Dinámico Mecánico (DMA) .....                              | 40 |
| 2.7.6 Índice de Fluidez (MFI) .....                                       | 42 |
| 2.7.7 Microscopía óptica .....                                            | 43 |
| 2.7.8 Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....                      | 45 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                           | 47 |
| 3.1 Evaluación visual de los filamentos de compuestos PET/sargazo.....    | 48 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) ..... | 49 |
| 3.3 Análisis Termogravimétrico (TGA) .....                            | 52 |
| 3.4 Resistencia a la tracción .....                                   | 54 |
| 3.5 Resistencia al impacto (IZOD) .....                               | 58 |
| 3.6 Análisis Dinámico Mecánico (DMA) .....                            | 59 |
| 3.7 Índice de Fluidéz (MFI) .....                                     | 67 |
| 3.8 Microscopía óptica .....                                          | 69 |
| 3.9 Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....                    | 72 |
| 4. CONCLUSIONES .....                                                 | 74 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA .....                                                 | 77 |

### **Índice de Figuras**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Estructura química del PET .....                                   | 4  |
| Figura 1.2. Simbología para identificar el PET .....                           | 6  |
| Figura 1.3. Diferencias morfológicas entre especies de sargazo .....           | 9  |
| Figura 1.4. Estructura de un polímero semicristalino .....                     | 14 |
| Figura 1.5. Estructura de un material compuesto .....                          | 16 |
| Figura 1.6. Representación gráfica de materiales compuestos .....              | 17 |
| Figura 1.7. Estructura de una fibra natural vegetal .....                      | 20 |
| Figura 1.8. Problemas en el desarrollo de materiales con refuerzos naturales.. | 22 |
| Figura 1.9. Partes que conforman una extrusora .....                           | 23 |
| Figura 2.1. PET reciclado en escamas y molido .....                            | 30 |
| Figura 2.2. Proceso de obtención de partículas de sargazo .....                | 31 |
| Figura 2.3. Sargazo seco y molido .....                                        | 32 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.4. Extrusora de plástico de la marca Beutelspacher .....            | 32 |
| Figura 2.5. Husillo modificado para procesar PET .....                       | 33 |
| Figura 2.6. Dado utilizado para la obtención de filamentos de PET/PS .....   | 33 |
| Figura 2.7. Impresora 3D Ender 3 .....                                       | 34 |
| Figura 2.8. Espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Spectrum 100 FT-IR.....    | 36 |
| Figura 2.9. Equipo TGA/DSC TA Instruments STD Q600 .....                     | 38 |
| Figura 2.10. Máquina universal Instron para ensayo de tracción .....         | 39 |
| Figura 2.11. Equipo para ensayo de impacto Izod de la marca Tinius Olsen.... | 40 |
| Figura 2.12. Equipo para análisis dinámico mecánico modelo Q800 .....        | 41 |
| Figura 2.13. Plastógrafo para medir el índice de fluidez modelo XNR 400 C... | 43 |
| Figura 2.14. Microscopio óptico ZEISS Axio Lab A1 .....                      | 45 |
| Figura 2.15. Microscopio electrónico de barrido .....                        | 46 |
| Figura 3.11. Filamentos compuestos de PET/sargazo .....                      | 49 |
| Figura 3.12. Espectros FTIR de los compuestos PET/sargazo .....              | 52 |
| Figura 3.13. Termograma TGA de pérdida de peso .....                         | 52 |
| Figura 3.14. Derivada de la pérdida de peso .....                            | 53 |
| Figura 3.15. Curva de esfuerzo-deformación de los compuestos PET/sargazo...  | 56 |
| Figura 3.16. Probetas para tracción P_0 .....                                | 56 |
| Figura 3.17. Probetas para tracción P_1 .....                                | 57 |
| Figura 3.18. Probetas para tracción P_3 .....                                | 57 |
| Figura 3.19. Probetas para tracción P_5 .....                                | 57 |
| Figura 3.20. Resistencia al impacto para las mezclas de PET y sargazo.....   | 59 |
| Figura 3.21. Termograma del DMA del módulo de almacenamiento vs.             |    |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| temperatura.....                                                                    | 61 |
| Figura 3.22. Termograma del DMA del módulo de pérdida vs. Temperatura....           | 63 |
| Figura 3.23. Termograma del DMA de la $\tan \delta$ de los diferentes compuestos... | 64 |
| Figura 3.24. Microscopía de la muestra P_0 .....                                    | 70 |
| Figura 3.25. Microscopía de la muestra P_1 .....                                    | 71 |
| Figura 3.26. Microscopía de la muestra P_3 .....                                    | 71 |
| Figura 3.27. Microscopía de la muestra P_5 .....                                    | 72 |
| Figura 3.28. Imágenes SEM de la muestra P_0 .....                                   | 74 |
| Figura 3.29. Imágenes SEM de la muestra P_1 .....                                   | 75 |
| Figura 3.30. Imágenes SEM de la muestra P_3 .....                                   | 75 |
| Figura 3.31. Imágenes SEM de la muestra P_5 .....                                   | 75 |

### Índice de Tablas

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1. Características del PET virgen y reciclado .....                      | 7  |
| Tabla 1.2. Composición elemental de una muestra de sargazo .....                 | 10 |
| Tabla 1.3. Composición química del sargazo de Playa Miramar por CG/MS....        | 12 |
| Tabla 2.1. Matriz experimental empleada para la elaboración de los materiales.   | 29 |
| Tabla 2.2. Cantidades de PET reciclado y partículas de sargazo .....             | 29 |
| Tabla 2.3. Conditions de extrusión de los materiales compuestos .....            | 34 |
| Tabla 2.4. Dimensiones de las probetas por ensayo .....                          | 35 |
| Tabla 3.1. Temperatura promedio de degradación y tasa de pérdida .....           | 53 |
| Tabla 3.2. Parámetros viscoelásticos y coeficiente de efectividad de relleno.... | 67 |
| Tabla 3.3. Índice de fluidez de los materiales compuestos de PET con sargazo.    | 69 |

## **Índice de Ecuaciones**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Ec. 2.1. Porcentaje de alargamiento (%EI) .....          | 41 |
| Ec. 3.1. Coeficiente de efectividad de relleno (C) ..... | 69 |

## **1.1. Antecedentes**

La investigación en nuevos materiales se ha enfocado en la última década en la fabricación de compuestos poliméricos con mejores propiedades térmicas y mecánicas, impulsada por demandas de los sectores automotriz, textil, aeroespacial y biomédico. En este contexto, la fabricación aditiva y específicamente la impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM) ha permitido producir geometrías complejas a partir de polímeros y compuestos poliméricos, facilitando la integración de refuerzos y el ajuste de propiedades mediante la optimización de parámetros de proceso.

Goh y colaboradores (2021) destacaron que la impresión 3D permite ajustar críticamente las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos, facilitando la integración de fibras y partículas como refuerzos.

Elamri y colaboradores (2015) analizaron la compatibilidad de PET virgen y PET reciclado mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y ensayos reológicos, concluyendo que las mezclas PET virgen/PET reciclado mostraron buena procesabilidad y mejora de la viscosidad, lo cual evidencia la viabilidad del PET reciclado para aplicaciones industriales sin pérdida significativa de desempeño.

İpekçi y colaboradores (2018) demostraron que en PET-G impreso en 3D, un aumento en la densidad de relleno (20 % a 80 %) incrementó significativamente la resistencia a la tracción y redujo la elongación, mostrando la sensibilidad del desempeño mecánico a los parámetros de impresión.

Sharma y colaboradores (2020) exploraron la incorporación de fibras de carbono en PET-G impreso en 3D, encontrando incrementos de resistencia mecánica de 31.7 MPa a 47.3 MPa y del módulo elástico de 3.9 GPa a 6.2 GPa con una adecuada alineación de fibras y control térmico, lo que evidencia la importancia de la interacción refuerzo-matriz y de los parámetros de impresión.

Yadav y Dixit (2023) realizaron una revisión exhaustiva sobre composites de PET reciclado reforzados con fibras naturales, concluyendo que el tamaño de la fibra, contenido y tratamientos superficiales influyen directamente en las propiedades mecánicas y térmicas de

los compuestos, y que los refuerzos naturales ofrecen ventajas de sostenibilidad y costo frente a fibras sintéticas.

Gudayu y colaboradores (2022) incorporaron fibras de sisal al 40 % en PET reciclado, con pretratamiento de hidróxido de sodio 1 M y acetilación, logrando aumentos de 233 % en el módulo de tracción y 410 % en el módulo de flexión respecto al PET sin refuerzo, lo que demuestra que los tratamientos químicos mejoran la adhesión fibra-matriz y el desempeño final del compuesto.

Ror y colaboradores (2024) desarrollaron biocompuestos de PET reciclado reforzados con fibras continuas de banano mediante un sistema de impregnación en boquilla adaptado a impresión 3D, logrando un aumento de hasta 1.9 veces en el módulo de Young y mejoras significativas en resistencia a flexión, evidenciando la capacidad de refuerzos naturales de mejorar propiedades mecánicas.

Morales Robalino, Valencia Burgos y Dueñas Barberán (2019) estudiaron la aplicación de fibras vegetales con PET reciclado en láminas decorativas, demostrando que la combinación de residuos plásticos y fibras naturales puede generar materiales con propiedades mecánicas y estéticas mejoradas, lo cual es consistente con la tendencia global de desarrollo de materiales sostenibles.

Ortega Díaz y colaboradores (2022) revisaron materiales compuestos de fibras naturales y polímeros reciclados, concluyendo que una proporción de fibra de 15–40 % en peso mejora las propiedades mecánicas, y que tratamientos como el hidróxido de sodio y agentes de acople favorecen la adhesión fibra-matriz, optimizando el desempeño del material.

Luna y colaboradores (2022) diseñaron un extrusor especializado para producir filamentos homogeneizados de PET reciclado de 3 mm para impresión 3D, mientras que Fauza y colaboradores (2023) determinaron que una temperatura de extrusión de 210 °C era óptima para obtener fibras de PET reciclado con resistencia de 70.4 MPa y elongación de 83.6 %, demostrando que el control de las condiciones de procesamiento es crítico para obtener filamentos con propiedades mecánicas consistentes.

Adicionalmente, la literatura sobre composites reforzados con fibras naturales destaca que éstos ofrecen ventajas de sostenibilidad, bajo costo y menor impacto ambiental, aunque

también presentan desafíos como sensibilidad al agua y menor durabilidad comparados con fibras sintéticas; estos aspectos han sido ampliamente discutidos en revisiones generales sobre fibras naturales en matrices poliméricas.

Además, estudios recientes muestran que la incorporación de fibras u otros refuerzos (incluso si no son naturales) en matrices de PET reciclado puede mejorar propiedades mecánicas y abrasión cuando existe buena adhesión entre matriz y refuerzo, aunque la deformabilidad tiende a disminuir con el aumento de carga de fibras.

En síntesis, la revisión de literatura evidencia un continuo desarrollo de materiales PET reciclado reforzados con fibras naturales y sintéticas, con resultados positivos en mejoras de propiedades mecánicas siempre que se optimicen las condiciones de procesamiento, contenido de refuerzo y tratamientos superficiales. Sin embargo, sigue siendo un reto ampliar aún más el estudio de nuevos refuerzos naturales poco explorados (como sargazo y otros residuos marinos) para aplicaciones sostenibles de alto desempeño.

## **1.2 Polietilentereftalato (PET)**

El PET es un plástico resistente debido a su estructura, que permite una gran libertad en el diseño de los objetos fabricados con este material. Este plástico es fuerte, ligero y transparente, y se utiliza en la fabricación de envases para bebidas alcohólicas y no alcohólicas, aceite comestible, productos de limpieza, otros alimentos y aplicaciones no alimentarias.

El PET es una resina de poliéster compuesta por glicol etilénico y ácido tereftálico. Su clasificación depende de la viscosidad intrínseca, que está directamente relacionada con su peso molecular, y de una modificación en su estructura polimérica que disminuye la velocidad de cristalización y el punto de fusión. Este plástico comúnmente se produce con ácido tereftálico y etilenglicol (Martínez, 2007). La figura 1.1 muestra la estructura química del PET.

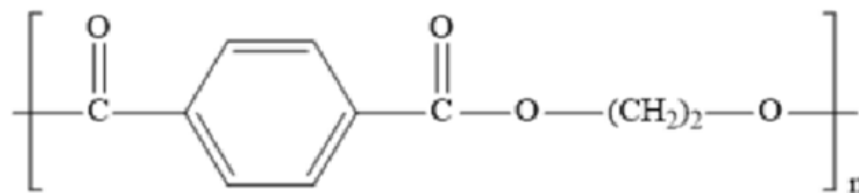


Figura 1.1 Estructura química del PET (Study,2024).

### 1.3 Propiedades físicas del PET

El tereftalato de polietileno (PET) es uno de los plásticos más utilizados a nivel mundial, conocido principalmente por su aplicación en envases y fibras. Su popularidad se debe a una combinación de propiedades físicas que lo hacen versátil y adecuado para diversas aplicaciones industriales y comerciales. El PET tiene una densidad aproximada de 1.38 g/cm<sup>3</sup>, lo que lo convierte en un material relativamente ligero en comparación con otros polímeros. Esta propiedad es especialmente valiosa en aplicaciones de envasado, donde la reducción del peso es crucial para la eficiencia del transporte y la reducción de costos (Alavi y col., 2021). Una de las características más distintivas del PET es su capacidad para ser transparente, lo que lo hace ideal para envases, ya que permite que los consumidores vean el contenido sin abrir el paquete. Esta transparencia también es importante en la industria de la cosmética y la farmacéutica, donde la apariencia del producto es un factor clave para la aceptación del consumidor (Wang y col., 2020).

La temperatura de fusión del PET está alrededor de 260 °C, lo que permite que el material sea procesado mediante técnicas como la extrusión y el moldeo por inyección, haciéndolo adecuado para la fabricación de productos con formas complejas y precisas. Además, su alta temperatura de fusión contribuye a su estabilidad en aplicaciones que requieren resistencia a altas temperaturas (Singh y col., 2021). La temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) del PET es de aproximadamente 80 °C. Por debajo de esta temperatura, el material presenta rigidez y es quebradizo, mientras que, por encima de esta temperatura, el PET se vuelve más flexible y

dúctil. Esta propiedad es fundamental para determinar el uso del PET en diferentes aplicaciones, especialmente en climas cálidos donde la temperatura puede superar la  $T_g$  (Zhou y col., 2021).

El PET muestra una resistencia a la tracción que varía entre 50-100 MPa, lo que indica su capacidad para soportar cargas sin deformarse permanentemente. Esta propiedad mecánica es esencial en aplicaciones donde se requiere que el material mantenga su forma y resistencia bajo condiciones de tensión, como en envases y componentes industriales (Kumar y col., 2019). Aunque el PET es principalmente un material rígido, puede exhibir cierta flexibilidad, especialmente en su forma amorfa. Esta flexibilidad es útil en aplicaciones de envasado donde se requiere que el material se adapte a diferentes formas y tamaños de productos. Sin embargo, la rigidez del PET también proporciona protección contra impactos (Alavi y col., 2021). Además, el PET tiene una baja conductividad térmica, lo que lo convierte en un buen aislante. Esta propiedad térmica permite que el PET sea utilizado en aplicaciones donde se requiere resistencia al calor, como en el aislamiento de componentes eléctricos. El material mantiene su integridad estructural en un rango moderado de temperaturas, lo que lo hace adecuado para su uso en condiciones climáticas variables (Wang y col., 2020).

El PET es relativamente hidrofóbico, lo que significa que tiene una baja afinidad por el agua, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que la resistencia a la humedad es crucial, como en envases de alimentos y bebidas, donde se requiere que el material proteja su contenido de la humedad externa (Kumar y col., 2019). Además de su resistencia a la tracción, el PET presenta alta rigidez y tenacidad, permitiéndole absorber impactos sin romperse, lo que es

fundamental en aplicaciones donde el producto puede estar expuesto a condiciones adversas, como el transporte y almacenamiento (Singh y col., 2021). El PET tiene buenas propiedades de barrera, especialmente contra el oxígeno, lo que ayuda a prolongar la vida útil de los productos envasados. Esta propiedad es vital en la industria alimentaria, donde la protección contra la oxidación puede prevenir la degradación del producto y mantener su frescura (Zhou y col., 2021). Además, el PET es considerado biocompatible, lo que significa que es seguro para aplicaciones que implican contacto con alimentos y productos farmacéuticos, haciéndolo adecuado para el envasado de productos que requieren altos estándares de seguridad y calidad (Alavi y col., 2021).

Una de las ventajas más significativas del PET es su reciclabilidad. Este material es uno de los plásticos más reciclados en el mundo, y su capacidad para ser reutilizado en la fabricación de nuevos productos contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de desechos plásticos en el medio ambiente (Kumar y col., 2019). La figura 1.2 muestra la simbología para identificar el PET para el proceso de reciclado, lo que es crucial para garantizar que se recicle de manera adecuada y efectiva, promoviendo así un ciclo de vida sostenible para este material.



Figura 1.2. Simbología para identificar el PET (Zajac,2024).

La tabla 1.1 presenta una comparación entre las propiedades del PET virgen y el PET reciclado (RPET), donde se observan diferencias significativas en su comportamiento mecánico y estructural. El PET virgen exhibe un módulo de Young superior (1890 MPa frente a 1630 MPa) y una mayor resistencia a la rotura (47 MPa frente a 24 MPa), lo que indica una mejor rigidez y resistencia mecánica. Sin embargo, el RPET muestra una

elongación a la rotura mucho más elevada (110% frente a 3.2%) y una mayor resistencia al impacto (20 J/m frente a 12 J/m), lo que sugiere mayor ductilidad y capacidad de absorber energía.

En cuanto a las propiedades moleculares, el PET virgen presenta valores más altos de viscosidad intrínseca (0.72–0.84 dl/g) y peso molecular (81,600 g/mol frente a 58,400 g/mol), lo que se traduce en una estructura más estable y con mejor desempeño mecánico.

No obstante, las temperaturas de fusión son similares en ambos casos (244–254 °C para PET virgen y 247–253 °C para RPET), lo que indica que el reciclaje no altera de forma significativa la estabilidad térmica del material (Joseph y col., 2024).

Tabla 1.1 Características del PET virgen y reciclado (Joseph y col.,2024).

| Propiedad                     | PET Virgen | RPET      |
|-------------------------------|------------|-----------|
| Módulo de Young [MPa]         | 1890       | 1630      |
| Resistencia a la rotura [MPa] | 47         | 24        |
| Elongación a la rotura [%]    | 3.2        | 110       |
| Resistencia al impacto [J/m]  | 12         | 20        |
| IV [dl/g]                     | 0.72-0.84  | 0.46-0.76 |
| Temperatura de fusión [°C]    | 244-254    | 247-253   |
| Peso molecular [g/mol]        | 81600      | 58400     |

#### 1.4 Análisis del ciclo de vida e impacto ambiental del PET

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero ampliamente utilizado en la fabricación de envases, especialmente botellas para bebidas, debido a su resistencia, ligereza y transparencia. Su vida útil, tanto en su forma virgen como reciclada, es un aspecto relevante en estudios de ciclo de vida y sostenibilidad, situándose generalmente en un rango de 0 a 10 años, aunque algunos estudios la estiman entre 8 y 9 años. Inicialmente considerado un material inocuo, investigaciones posteriores han demostrado que el PET puede liberar antimonio bajo ciertas condiciones(virginie,2011).

El PET virgen posee propiedades mecánicas y térmicas que le otorgan una durabilidad adecuada para diversas aplicaciones. Sin embargo, su integridad puede verse afectada por factores como la exposición a la luz ultravioleta, variaciones de temperatura y el contenido

del envase. Además, su producción implica un alto consumo de recursos y genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero (Vargas y col.,2023).

Por otro lado, el reciclaje del PET permite su reutilización en nuevos productos, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y minimizando su impacto ambiental. No obstante, la vida útil del PET reciclado puede diferir de la del PET virgen, y algunos estudios sugieren que, en ciertos casos, los productos reciclados podrían presentar menor durabilidad, lo que influye en su desempeño y resistencia (García y col.,2022).

### **1.5 Sargazo**

El sargazo, principalmente de las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, es un alga marina parda flotante que se encuentra en el Golfo de México, Caribe y Mar de los Sargazos. Estas especies son únicas porque flotan permanentemente gracias a vesículas llenas de gas que les permiten reproducirse y desplazarse sin necesidad de anclarse (Uribe y col., 2017). Desde 2011 se ha observado un crecimiento masivo en el llamado Gran Cinturón del Atlántico, una franja de aproximadamente 9,000 km que puede acumular hasta 20 millones de toneladas de biomasa (Wang y col.,2019). Este fenómeno se relaciona con el aporte de nutrientes de grandes ríos como el Amazonas y el Congo, el transporte de polvo del Sahara y los cambios en las corrientes oceánicas. Su proliferación ha provocado impactos negativos, como la liberación de ácido sulfhídrico y metales pesados durante su descomposición, afectando arrecifes coralinos, playas y acuíferos, además de generar pérdidas significativas en el turismo (Vázquez et al., 2020).

A pesar de estos efectos, el sargazo también representa una oportunidad biotecnológica e industrial. Su biomasa puede aprovecharse en la producción de biocombustibles, fertilizantes, bioplásticos y productos farmacéuticos o cosméticos, gracias a su alta riqueza en compuestos orgánicos y minerales (Aranda, 2020). Para ello, es indispensable desarrollar estrategias de recolección y transformación sustentables, acompañadas de monitoreo ambiental y procesos de descontaminación que permitan mitigar los efectos negativos y transformar esta crisis en un recurso de valor. Las diferencias morfológicas entre especies pelágicas de *Sargassum* y/o morfotipos se presenta en la figura 1.3.

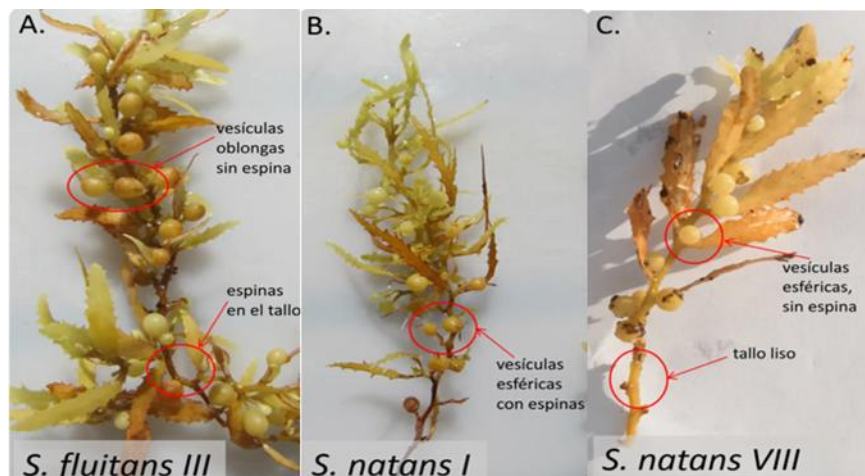


Figura 1.3. Diferencias morfológicas entre especies de Sargazo (Govindarajan y col., 2019).

## 1.6 Composición química del Sargazo

En cuanto a su composición química, el sargazo presenta una fracción elevada de carbohidratos (25–40%), entre los que se incluyen ácido algínico, fucoidanos, laminarina y manitol. El ácido algínico se utiliza como espesante en las industrias alimentaria y farmacéutica, otorgando rigidez estructural (Márquez y Quintana, 2015). Los fucoidanos poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticoagulantes, útiles en el área de la salud (Desrochers y col., 2020). La laminarina, un polisacárido de almacenamiento, es prometedora para la producción de bioetanol y otros productos de valor agregado (Rodríguez, 2021). Además, su contenido mineral es significativo, representando entre el 20% y 30% del peso seco, con elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, sodio e incluso yodo, lo que lo convierte en un recurso valioso para fertilizantes orgánicos y suplementos minerales (Desrochers y col., 2020). En menor proporción, también presenta proteínas (2.2–15.4%) con aminoácidos esenciales como ácido aspártico y glutámico, alanina y prolina (Márquez y Quintana, 2015). Por otro lado, los lípidos (0.3–3.9%) incluyen ácidos grasos poliinsaturados como linoleico, palmítico y araquidónico, con aplicaciones en nutraceuticos y cosméticos (Rodríguez, 2021).

Finalmente, el sargazo contiene fibras estructurales como celulosa (10–50%), hemicelulosa (23–32%) y lignina (1–25%), útiles para la producción de bioplásticos, bioempaques y biocombustibles como el bioetanol (Márquez & Quintana, 2015). Sin embargo, su capacidad para absorber metales pesados como arsénico, cadmio, plomo y mercurio constituye un riesgo significativo para su uso en alimentos y otras industrias, lo que hace necesario implementar procesos de monitoreo y descontaminación previos a su aprovechamiento (Morales y Suárez, 2019). En el 2021 se realizó un estudio al sargazo de playa Miramar, Ciudad Madero, Tamaulipas, utilizando la técnica espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF). Este estudio consiste en utilizar radiación gama para determinar el contenido de elementos esenciales y no esenciales en la muestra.

Los resultados demostraron que los elementos más abundantes fueron S, K, Al, P, Si y Cl. La tabla 1.2 muestra la composición elemental del sargazo obtenida mediante la técnica EDXRF.

Tabla 1.2. Composición elemental de una muestra de sargazo (Escobar et.al ,2021).

| Ánodo       | Elemento | Sargazo |
|-------------|----------|---------|
| <b>1-No</b> | Ne       | 11      |
|             | Al       | 234     |
|             | Si       | 135     |
|             | P        | 185     |
|             | S        | 4710    |
| <b>2-Ti</b> | Cl       | 109     |
|             | K        | 261     |
|             | Ca       | 29      |
|             | Fe       | 2       |
| <b>3-Fe</b> | C        | 4       |

La Tabla 1.3 muestra los resultados del análisis cromatográfico realizado mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS), en el cual se identificaron 24 compuestos presentes en la muestra. Esta técnica permitió la separación, identificación y caracterización de compuestos volátiles y semivolátiles, gracias a la combinación de una columna capilar para la separación cromatográfica y un espectrómetro de masas para la detección. La identificación de los compuestos se llevó a cabo a partir de sus patrones de fragmentación característicos, comparados con bibliotecas espectrales, lo que garantiza alta sensibilidad, selectividad y confiabilidad en el análisis cualitativo de la muestra. El estudio permitió establecer que el compuesto predominante fue el propilenglicol, con una abundancia relativa del 15.73 %, lo que evidencia su papel central dentro de la composición química. En segundo lugar, se encontró el 5-metil-2-furanocarboxaldehído (13.64 %), seguido de la 2-hidroxiopropanamida (11.24 %) y el hexanal (9.38 %), lo que indica que estos compuestos oxigenados y aldehídicos son relevantes en la mezcla.

El conjunto de compuestos identificados refleja una diversidad estructural significativa. Los aldehídos, como el 2-metilpropanal, 3-metilbutanal, heptanal, octanal y nonanal, representan una proporción importante y son conocidos por contribuir a perfiles aromáticos característicos en matrices complejas. A su vez, los furanos y derivados, como el 2-pentilfuran, 1-(2-furanil) etanona y 5-metil-2-furanocarboxaldehído, aportan estructuras cíclicas oxigenadas que pueden estar relacionadas con procesos de degradación térmica o reacciones de Maillard. Dentro de los compuestos detectados también destacan los ácidos grasos, como el ácido hexanoico (4.26 %) y el ácido nonanoico (4.86 %), que aportan características químicas de acidez y posibles efectos en el aroma y la estabilidad de la muestra. Asimismo, se identificaron componentes minoritarios como el dimetil sulfóxido, el 2,2,3,3-tetrametilpentano y el 1-clorododecano, todos con proporciones inferiores al 1 %, pero que reflejan la complejidad de la matriz química.

En conjunto, los resultados evidencian que la muestra está dominada por compuestos oxigenados y aldehídicos, siendo el propilenglicol y el 5-metil-2-furanocarboxaldehído los más representativos. La presencia de furanos, ácidos grasos y aldehídos de cadena media confirma un perfil químico complejo.

Tabla 1.3 Composición química del sargazo de playa Miramar por CG/MS.

| Componente                            | Área       | %AR (porcentaje área relativa) | Tiempo de retención |
|---------------------------------------|------------|--------------------------------|---------------------|
| N, N'-dimetilamina                    | 265,674    | 0.52                           | 3.34                |
| 2-metilpropanal                       | 2,806,561  | 5.49                           | 4.19                |
| 2,3-epoxibutano                       | 1,770,658  | 3.46                           | 4.91                |
| 2-hidroxiopropanamida                 | 5,749,090  | 11.24                          | 5.71                |
| 3-metilbutanal                        | 713,849    | 1.4                            | 5.99                |
| Propilenglicol                        | 8,043,904  | 15.73                          | 6.14                |
| Hexanal                               | 4797487    | 9.38                           | 9.24                |
| Heptanal                              | 3227770.5  | 6.31                           | 11.59               |
| Dimetil sulfóxido                     | 417538.41  | 0.82                           | 11.89               |
| 1-(2-furanil) etanona                 | 541736.19  | 1.06                           | 12.34               |
| 2-pentilfurano                        | 335329.13  | 0.66                           | 12.97               |
| 2,2,3,3,-tetrametilpentano            | 671151     | 1.31                           | 13.34               |
| Benzaldehído                          | 608290.44  | 1.19                           | 13.47               |
| 5-metil-2-furanocarboxaldehído        | 6973008    | 13.64                          | 13.69               |
| Octanal                               | 697017.75  | 1.36                           | 13.81               |
| Ácido hexanoico                       | 2176027.75 | 4.26                           | 14.02               |
| 1-clorododecano                       | 239440.66  | 0.47                           | 14.64               |
| Hexanal bencil trans-2 hexeniloAcetal | 2296895    | 4.49                           | 15.37               |
| 4-hidroxi-5-metil-3-furanona          | 655655.31  | 1.28                           | 15.69               |
| Nonanal                               | 4100728    | 8.02                           | 15.94               |
| Ácido nonaoico                        | 2485685.25 | 4.86                           | 19.62               |
| 2-ciclohexiloctano                    | 306052.09  | 0.6                            | 21.52               |
| Total                                 | 51135962.5 | 100                            |                     |

## 1.7 Cristalización en Polímeros

La cristalización en polímeros es el proceso mediante el cual las cadenas poliméricas, normalmente amorfas, se ordenan en regiones cristalinas dentro de una matriz desordenada, dando lugar a materiales semicristalinos. Este fenómeno ocurre principalmente durante el enfriamiento de un polímero fundido o al estirarlo en estado sólido, donde se forman lamelas y esferulitas que influyen directamente en las propiedades del material (Smith et al., 2021). Factores como la estructura química, la velocidad de enfriamiento y la adición de nucleantes determinan la facilidad de cristalización; por ejemplo, polímeros lineales como el polietileno y el polipropileno cristalizan más fácilmente que estructuras ramificadas como el poliestireno (Hernández y col., 2023).

El grado de cristalinidad impacta en propiedades clave como la resistencia, la dureza, el punto de fusión, la transparencia y la resistencia química (Álvarez y Ramírez, 2022). Esto explica el uso de polímeros semicristalinos como polietileno, polipropileno, PET y nailon en aplicaciones de empaques, construcción, automoción y fibras (González y col., 2020). Actualmente, la investigación se centra en optimizar la cristalización en compuestos y nanocompuestos poliméricos para mejorar el desempeño del material en aplicaciones avanzadas (López y col., 2024). La figura 1.4 es una representación de la estructura de un material semicristalino, conformada por una región amorfa con cadenas desordenadas y una región cristalina con cadenas ordenadas. En esta figura se aprecia cómo la fase amorfa, caracterizada por la disposición irregular de las cadenas poliméricas, aporta flexibilidad y cierta capacidad de deformación al material. En contraste, la fase cristalina, formada por zonas altamente organizadas, confiere rigidez, resistencia mecánica y estabilidad térmica. La coexistencia de ambas regiones en un mismo material le otorga propiedades intermedias, combinando la resistencia de los sólidos cristalinos con la ductilidad de los materiales amorfos, lo que resulta fundamental para aplicaciones industriales y de ingeniería de materiales. Esta combinación permite que el material soporte cargas elevadas sin fracturarse, al mismo tiempo que conserva cierta flexibilidad para deformarse sin sufrir daños permanentes.

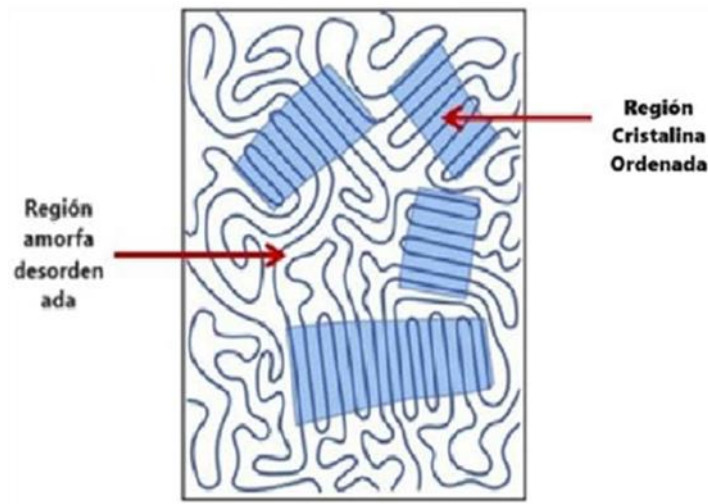


Figura 1.4 Estructura de un polímero semicristalino (Diseño propio,2025).

## 1.8 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son combinaciones de dos o más materiales distintos, separados por una interfaz clara. Esto les confiere una naturaleza heterogénea, ya que sus propiedades varían a lo largo de su volumen.

Estos materiales nacen de la necesidad de lograr combinaciones de propiedades que no se encuentran fácilmente en cerámicas, plásticos o metales. Por ejemplo, en la industria del transporte se requieren materiales que sean ligeros, rígidos, resistentes al impacto, y que también ofrezcan buena resistencia a la corrosión y al desgaste, características que raramente se presentan juntas. Por lo tanto, se desarrollan materiales específicos según la aplicación deseada (Meira y Gugliotta,2019).

### 1.8.1 Funciones de la Matriz

La matriz puede ser metálica, cerámica o polimérica, y normalmente es menos rígida que el refuerzo (excepto en matrices cerámicas). Su función principal es mantener unidos los refuerzos, transmitir los esfuerzos y protegerlos del ambiente o daños externos. Asimismo,

determina muchas de las propiedades finales del material compuesto, como su resistencia mecánica, peso, conductividad y durabilidad.

### **Funciones principales**

- Define las propiedades físicas y químicas del compuesto.
- Transmite cargas al refuerzo y asegura cohesión.
- Influye en la conformabilidad y acabado superficial.
- En compresión: soporta el esfuerzo.
- En tracción: transfiere la carga al refuerzo, siempre que exista buena adherencia.
- Aporta resistencia al impacto y detiene la propagación de fisuras.

### **Propiedades clave**

- Mantiene los refuerzos en posición.
- Transfiere cargas a las fibras.
- Protege las fibras durante fabricación y uso.
- Limita la propagación de grietas.
- Regula propiedades eléctricas, químicas y térmicas del compuesto.

### **1.8.2 Funciones del Refuerzo**

El material de refuerzo se añade a la matriz de un compuesto para mejorar propiedades como resistencia, rigidez, rendimiento a altas temperaturas y resistencia a la abrasión. Puede presentarse en forma de partículas o fibras, siendo más eficaz cuando las partículas son pequeñas y homogéneas o cuando aumenta la relación longitud/diámetro de las fibras.

Entre los refuerzos, las fibras son las más comunes, destacando por ser ligeras, rígidas y resistentes; además, si el compuesto debe trabajar a altas temperaturas, es esencial que la fibra tenga un alto punto de fusión. Entre los refuerzos, las fibras son las más comunes, destacando por ser ligeras, rígidas y resistentes; además, si el compuesto debe trabajar a altas temperaturas, es esencial que la fibra tenga un alto punto de fusión. Por ello, la resistencia y el módulo específicos de la fibra resultan determinantes (Stupenengo, 2011), ya que influyen

directamente en el comportamiento mecánico del compuesto bajo carga y en condiciones extremas. La figura 1.5 representa la estructura general de un material compuesto.

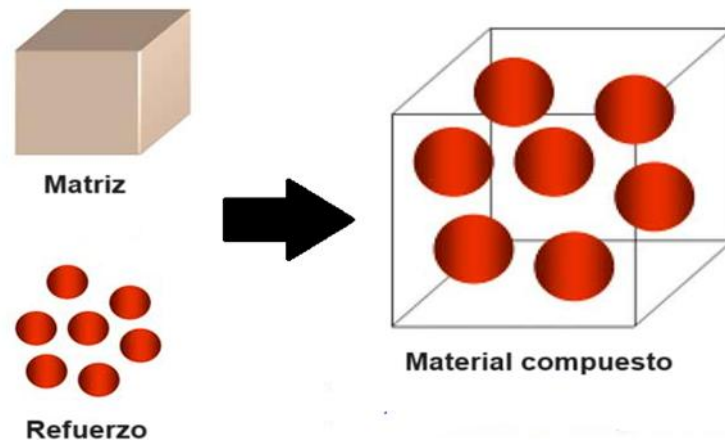


Figura 1.5 Estructura de un material compuesto (Interempresas,2019).

## 1.9 Clasificación de materiales compuestos

### 1.9.1 Según su refuerzo

**Compuestos reforzados con fibras:** combinan fibras fuertes y rígidas (carbono, vidrio, acero, polímeros, etc.) con una matriz más dúctil. Ofrecen alta resistencia, bajo peso, rigidez y resistencia a la fatiga. La matriz protege y transfiere carga.

Compuestos reforzados con partículas: más económicos y fáciles de fabricar. Usan agregados distribuidos aleatoriamente que aumentan la resistencia a compresión y el módulo, aunque reducen ductilidad. Son isotrópicos y con propiedades predecibles.

Compuestos laminares: consisten en capas bidimensionales unidas por una matriz. Ejemplos: madera contrachapada, compuestos sándwich en aeroespacial, parabrisas, esquís y neumáticos. Proporcionan rigidez y resistencia adicional.

Compuestos híbridos: Estos materiales compuestos híbridos permiten aprovechar las ventajas de cada componente para mejorar el rendimiento general del producto. Al integrar fibras, partículas y laminados en una sola matriz, es posible obtener propiedades como mayor resistencia mecánica, durabilidad y estabilidad dimensional, adaptadas a aplicaciones específicas en industrias como la automotriz y la aeroespacial (Newell,2011). Como se muestra en la Figura 1.6, los materiales compuestos pueden clasificarse según el tipo y la disposición del refuerzo en la matriz. La figura ilustra cuatro configuraciones principales: a) compuestos reforzados con fibras, donde las fibras se distribuyen de manera alineada dentro de la matriz; b) compuestos reforzados con partículas, caracterizados por la dispersión de partículas en el material base; c) compuestos laminares, formados por la superposición de capas con diferentes propiedades; y d) compuestos híbridos, que combinan dos o más tipos de refuerzo en una misma matriz (Newell, 2011).

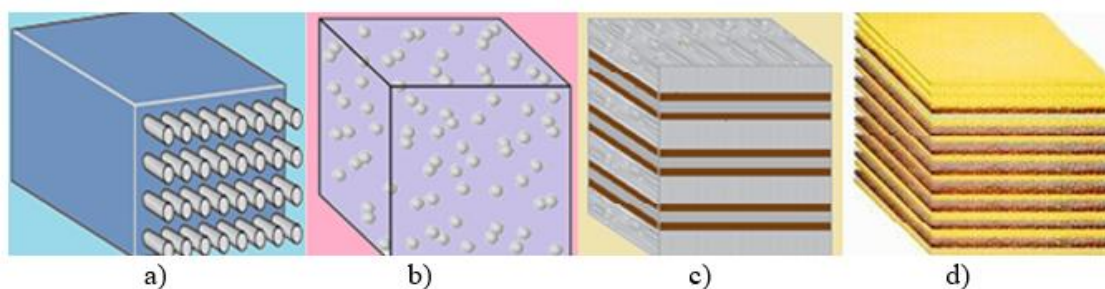


Figura 1.6 Representación gráfica de materiales compuestos: a) compuesto reforzado con fibras, b) compuesto reforzado con partículas, c) compuesto laminar y d) compuesto híbrido (Newell,2011).

### 1.9.2 Según su matriz

**Compuestos de matriz polimérica:** Conocidos también como polímeros reforzados con fibras, son los más empleados a nivel industrial. En este caso, la matriz está formada por un polímero y el refuerzo se logra con fibras de vidrio, carbono o, más recientemente, fibras naturales, lo que amplía sus posibilidades de aplicación.

**Compuestos de matriz cerámica:** Se componen de una base cerámica reforzada con fibras cortas o whiskers, generalmente de carburo de silicio o nitruro de boro. Destacan por su resistencia a altas temperaturas, lo que los hace adecuados para aplicaciones exigentes en ambientes extremos.

**Compuestos de matriz metálica:** Están formados principalmente por metales ligeros, como el aluminio, que suele reforzarse con fibras de carburo de silicio. Su uso en la industria automotriz se ha incrementado debido a sus buenas propiedades mecánicas y bajo peso. Estos materiales ofrecen una excelente relación resistencia-peso, lo que contribuye a mejorar la eficiencia energética y el rendimiento de los vehículos. Además, presentan buena resistencia al desgaste y a la corrosión, lo que los hace ideales para componentes estructurales y de motor en aplicaciones de alta exigencia.

### **1.10 Fibras naturales**

Las fibras naturales se clasifican generalmente en tres categorías principales de acuerdo con su origen: vegetal, animal y mineral. En el campo de los materiales compuestos, las fibras de origen vegetal son las más utilizadas debido a su amplia disponibilidad, bajo costo, baja densidad y propiedades mecánicas aceptables. Estas fibras vegetales pueden clasificarse, a su vez, en función de la parte de la planta de la cual se obtienen, incluyendo fibras de tallo, hoja, semilla, fruto, caña y madera (Balaji y col., 2020).

La producción mundial de fibras naturales de origen vegetal es significativa y ha mostrado un crecimiento constante. En 2013 se reportó una producción aproximada de 33.3 millones de toneladas, excluyendo las fibras provenientes de la madera. Tradicionalmente, estas fibras se han empleado en la fabricación de productos artesanales, textiles y elementos decorativos; sin embargo, en años recientes su uso se ha extendido a aplicaciones estructurales y semi-estructurales dentro de materiales compuestos (Misra y Drzal, 2005).

Las fibras naturales presentan una estructura jerárquica compleja, constituida por una matriz de lignina en la que se encuentran embebidas microfibrillas de celulosa y hemicelulosa. Cada fibra está compuesta por una pared celular primaria y varias paredes celulares secundarias, donde las microfibrillas de celulosa se disponen con un ángulo de orientación específico. El

diámetro de una fibra individual es del orden de 10  $\mu\text{m}$ , mientras que las microfibrillas presentan diámetros aproximados entre 2 y 20 nm y están formadas por entre 30 y 100 cadenas de celulosa. A medida que se avanza desde la pared primaria hacia las secundarias, el contenido de celulosa se incrementa, mientras que la proporción de lignina disminuye, manteniéndose relativamente constante el contenido de hemicelulosa (Eichhorn y col., 2001).

La celulosa es un polisacárido de naturaleza semicristalina que proporciona rigidez, resistencia mecánica y estabilidad estructural a la fibra. Su estructura química está formada por unidades repetitivas de  $\beta$ -D-glucosa, cada una con tres grupos hidroxilo ( $-\text{OH}$ ), los cuales son responsables de su carácter hidrofílico y de su elevada capacidad para formar enlaces por puente de hidrógeno tanto intra como intermoleculares (Moon y col., 2011).

La hemicelulosa es un polímero amorfo y ramificado que se encuentra íntimamente asociado a la celulosa, principalmente mediante enlaces por puente de hidrógeno. Su estructura contiene grupos hidroxilo ( $-\text{OH}$ ) y aceto ( $-\text{COCH}_3$ ), lo que le confiere una elevada afinidad por el agua y un comportamiento altamente higroscópico. Esta característica influye de manera significativa en la absorción de humedad y en la estabilidad dimensional de las fibras naturales (Ornaghi y Zattera, 2014).

La lignina es un polímero amorfo de naturaleza predominantemente aromática que actúa como agente cementante dentro de la pared celular. Su función principal es proporcionar rigidez adicional, resistencia a la compresión y cohesión estructural, además de favorecer la interacción con la hemicelulosa, contribuyendo a la integridad mecánica de la fibra vegetal (Laurichesse y Avérous, 2014).

Además de los componentes principales, las fibras naturales contienen pequeñas cantidades de pectina, grasas, ceras y sustancias solubles en agua. Estos componentes secundarios influyen en las propiedades superficiales de la fibra y en su interacción con matrices poliméricas, por lo que su presencia resulta relevante en el diseño y procesamiento de materiales compuestos reforzados con fibras naturales (Pickering, 2008). La figura 1.7 representa la estructura de una fibra natural vegetal.

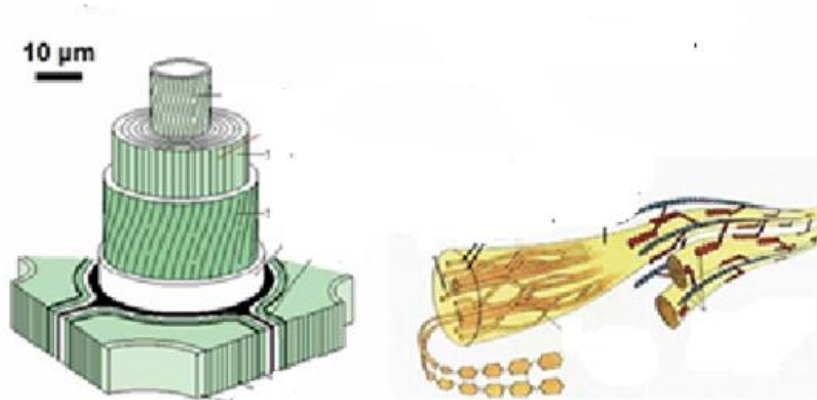


Figura 1.7. Estructura de una fibra natural vegetal (Diseño propio.2026).

### 11.11 Problemáticas en materiales compuestos con refuerzos naturales

El desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras y cargas de origen natural ha cobrado gran importancia en los últimos años como respuesta a la creciente demanda de materiales sostenibles y de bajo impacto ambiental. Estos materiales permiten reducir el consumo de recursos no renovables y aprovechar residuos agroindustriales, además de ofrecer ventajas económicas; sin embargo, su aplicación tecnológica aún enfrenta diversas limitaciones que deben ser abordadas para garantizar un desempeño confiable en aplicaciones estructurales y semi-estructurales (Mohanty y col. 2002).

Uno de los principales desafíos asociados a estos compuestos es la baja compatibilidad interfacial entre las fibras naturales y las matrices poliméricas. Esta problemática se debe principalmente a la naturaleza polar e hidrofílica de las fibras lignocelulósicas y al carácter apolar e hidrofóbico de la mayoría de los polímeros termoplásticos. La deficiente adhesión en la interfase limita la transferencia de esfuerzos entre la matriz y el refuerzo, lo que se traduce en una disminución de la resistencia mecánica y del módulo elástico del material compuesto (John y Thomas, 2008).

La absorción de humedad representa otra limitación significativa en los compuestos reforzados con fibras naturales. La presencia de grupos hidroxilo en la celulosa y la hemicelulosa favorece la absorción de agua, lo cual puede provocar hinchamiento de las fibras, degradación de la interfase y pérdida de estabilidad dimensional. Como consecuencia, se observa una reducción en la rigidez, la resistencia mecánica y la durabilidad del material, especialmente en ambientes húmedos o con variaciones térmicas (Tabil y Panigrahi, 2007).

Otro aspecto crítico es la variabilidad inherente a las propiedades de los refuerzos naturales. Factores como la especie vegetal, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, la edad de la planta y el método de extracción influyen directamente en la composición química, la morfología y las propiedades mecánicas de las fibras. Esta variabilidad dificulta la estandarización del material y representa un reto importante para el control de calidad y la reproducibilidad de los compuestos en procesos industriales (Pickering, 2008).

La estabilidad térmica limitada de las fibras naturales constituye otra restricción relevante para su incorporación en matrices poliméricas. Componentes como la hemicelulosa y la lignina comienzan a degradarse a temperaturas relativamente bajas, lo que restringe el rango de procesamiento de los compuestos y limita su uso con polímeros que requieren temperaturas elevadas durante procesos como extrusión o moldeo por inyección (Ray y Rout, 2005).

Finalmente, la dispersión no uniforme de los refuerzos naturales dentro de la matriz polimérica y la tendencia a la formación de aglomerados pueden generar concentradores de esfuerzo, favoreciendo la iniciación de grietas y fallas prematuras. La figura 1.8 problemas en el desarrollo de materiales con refuerzos naturales.

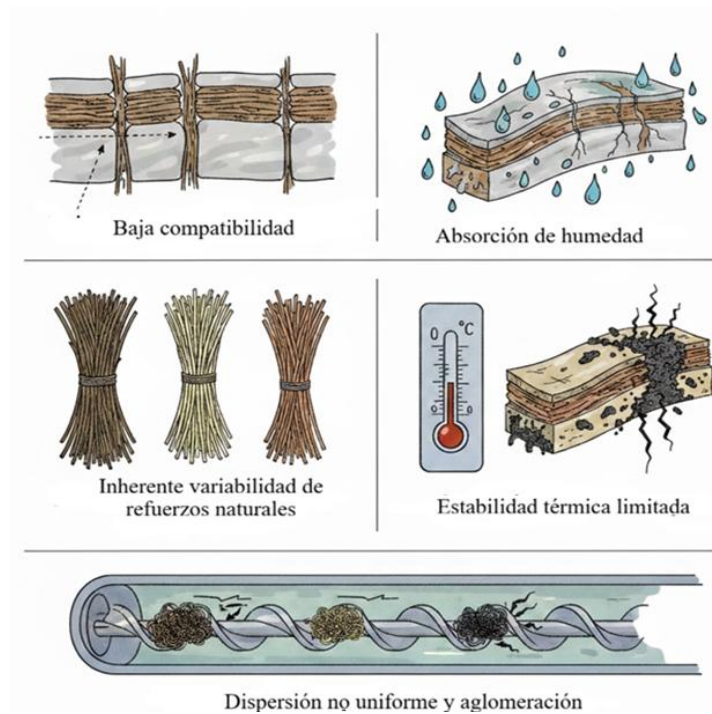


Figura 1.8. Problemas en el desarrollo de materiales compuestos con refuerzos naturales (Diseño propio, 2026).

## 1.12 Extrusión

La extrusión es un proceso mediante el cual un polímero fundido es impulsado a través de un dado para obtener una forma específica. En sus primeras aplicaciones se usaban máquinas de pistón, pero en la actualidad se emplean principalmente extrusores de tornillo, siendo el de tornillo simple el más utilizado y el de doble tornillo recomendado para mezclas más complejas o condiciones de transporte exigentes. El tornillo de Arquímedes, que gira dentro de un cilindro, reduce progresivamente la profundidad del canal desde la zona de alimentación hasta el dado, lo que permite fundir, comprimir y homogeneizar el material mientras aumenta la presión. De esta manera, el polímero sólido que entra por un extremo se transforma en fundido y sale por el otro con la forma deseada. En general, los equipos de extrusión cumplen funciones clave como recibir y almacenar el polímero, transportarlo, calentarlo, generar presión y asegurar la homogeneidad del fundido para finalmente obtener

el producto final (Hermida, 2011). La figura 1.9 habla sobre las partes que conforman una extrusora, en la cual se identifican los elementos principales que permiten llevar a cabo el proceso de extrusión.

Entre los principales componentes de un extrusor se encuentran la tolva de alimentación, donde se introduce el material en forma de pellets, polvo o escamas; el husillo, encargado de transportar, comprimir, plastificar y fundir la materia prima gracias al movimiento rotatorio y a la fricción interna; y el cilindro o barril, que recubre al husillo y está dividido en zonas de calentamiento controladas para asegurar una fusión progresiva y uniforme del polímero (Strong, 2006).

Además, se incluyen las resistencias de calentamiento y los sistemas de enfriamiento, que regulan de manera precisa el perfil térmico, garantizando que el material alcance la viscosidad adecuada para su conformado. También es fundamental el cabezal o dado, que determina la geometría final del producto extruido (láminas, filamentos, tuberías, películas, perfiles, etc.), así como los sistemas de calibración y temple, que aseguran la estabilidad dimensional del producto a la salida del dado (Oswald, 2006).

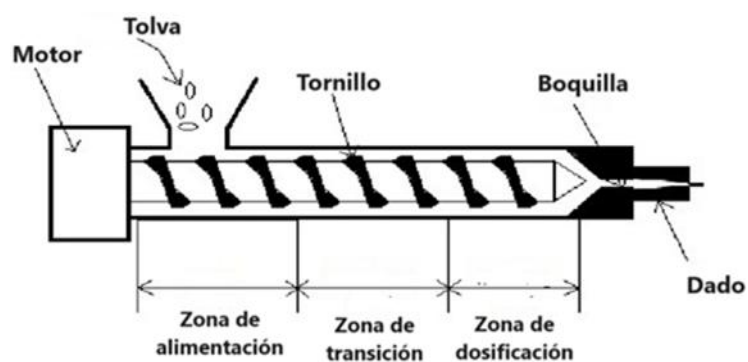


Figura 1.9 Partes que conforman una extrusora (Diseño propio, 2025).

### 1.13 Parámetros de extrusión

Los parámetros más importantes en la extrusión de plástico son los siguientes:

- **Temperatura:** La temperatura a lo largo del extrusor es uno de los factores más importantes, ya que debe ser controlada cuidadosamente para asegurar la correcta fusión y fluidez del material. El extrusor se divide en zonas de calentamiento, donde la temperatura aumenta progresivamente desde la alimentación hasta la salida. En cada zona, la temperatura debe ajustarse para evitar la degradación del material, pero al mismo tiempo permitir su plastificación (Brydson, 2017).
- **Velocidad del husillo (rpm):** La velocidad del husillo afecta directamente la cantidad de material procesado por unidad de tiempo. A medida que aumenta la velocidad, también se incrementa la tasa de producción, pero esto puede afectar la calidad de la mezcla y la homogeneidad del material. La velocidad se ajusta en función del tipo de material y la necesidad de extrusión (Parveen y Yahya, 2020).
- **Presión de extrusión:** La presión aplicada sobre el material dentro del extrusor es necesaria para que el material fluya correctamente a través de la matriz. Si la presión es demasiado baja, el material no fluirá de manera eficiente. Si es demasiado alta, puede dañar el material o el equipo. La presión también depende del tipo de material y la geometría del producto final (Michaels y Garr, 2019).
- **Relación de compresión del husillo:** El diseño del husillo tiene un impacto significativo en la eficiencia del proceso. Los husillos de alta compresión son mejores para materiales más viscosos, ya que ayudan a mejorar la mezcla y la homogenización del material. La relación de compresión describe la relación entre la longitud y el diámetro del husillo, y se elige en función de la aplicación (Rauwendaal, 2014).
- **Tiempo de residencia:** El tiempo que el material pasa dentro del extrusor es crítico para garantizar que se haya procesado correctamente. Un tiempo de residencia demasiado corto puede resultar en un producto no completamente plastificado, mientras que un tiempo excesivo puede llevar a la degradación térmica del material (Brydson, 2017).
- **Humedad del material:** El contenido de humedad en el material a extruir debe ser minimizado, ya que el exceso de agua puede causar la liberación de vapor durante el

proceso, lo que puede generar burbujas y defectos en el producto final. Para controlar esto, muchos procesos de extrusión requieren un secado previo del material (Parveen y Yahya, 2020).

### **1.14 Impresión 3D**

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es una innovadora tecnología que ha revolucionado la manufactura en distintos campos. Este método permite crear objetos tridimensionales a partir de información digital, añadiendo capas de material de manera progresiva hasta obtener la forma final. A diferencia de las técnicas tradicionales, que suelen ser sustractivas y consisten en retirar material para lograr la forma deseada, la impresión 3D utiliza un enfoque aditivo, construyendo el objeto capa por capa (Casey, 2009). Así, se puede producir un objeto sólido tridimensional de casi cualquier diseño a partir de un modelo digital computarizado. Esta tecnología permite una personalización sin precedentes, posibilitando la creación de piezas complejas con geometrías que serían imposibles mediante métodos convencionales. Su aplicación se ha extendido a sectores como la medicina, la ingeniería, la arquitectura, la aeronáutica y la industria automotriz, donde se emplea para fabricar desde prótesis personalizadas hasta componentes estructurales de alta precisión. Además, contribuye a la sostenibilidad al reducir el desperdicio de material y los costos de fabricación, ya que solo utiliza la cantidad necesaria para formar el objeto.

### **1.15 Parámetros de la impresión 3D**

Los parámetros más importantes en la impresión 3D son los siguientes:

- **Temperatura del extrusor:** La temperatura del extrusor es un parámetro crítico para asegurar que el material se funde correctamente y fluye a través de la boquilla. La temperatura debe ajustarse según el tipo de material utilizado, por ejemplo, el PLA generalmente requiere entre 180°C y 220°C, mientras que el ABS puede necesitar entre 230°C y 250°C. Es importante evitar temperaturas demasiado altas que puedan degradar el material. (Brydson, 2017).

- **Velocidad de impresión:** La velocidad de impresión afecta directamente la calidad y la resolución del modelo 3D. Una velocidad alta puede aumentar la producción, pero puede resultar en capas menos detalladas y una peor adherencia entre ellas. La velocidad debe ser ajustada en función del material y la complejidad del objeto que se está imprimiendo. Para materiales como PLA, las velocidades suelen oscilar entre 40 mm/s y 100 mm/s. (Parveen y Yahya, 2020).
- **Altura de capa:** La altura de capa define la resolución de la impresión y determina el grosor de cada capa que el extrusor deposita. Una altura de capa más pequeña (0.1 mm o menos) produce una mayor resolución y detalles más finos, pero aumenta el tiempo de impresión. Las capas más gruesas (0.2 mm o más) son más rápidas, pero pueden reducir la precisión del acabado superficial. (Michaels y Garr, 2019).
- **Enfriamiento:** El control de la ventilación del enfriamiento es esencial para obtener una buena calidad de impresión, especialmente en materiales como PLA. El ventilador de enfriamiento debe estar ajustado para evitar el sobre enfriamiento que puede llevar a la deformación de las capas inferiores o una mala adhesión entre ellas. En general, se recomienda un enfriamiento moderado, especialmente para las primeras capas. (Michaels y Garr, 2019).
- **Velocidad de movimiento:** La velocidad a la que el extrusor se mueve a través del área de impresión también es importante. La velocidad de movimiento puede ajustarse para optimizar la calidad de la impresión. Si es demasiado alta, el extrusor puede moverse demasiado rápido para depositar material adecuadamente. Las velocidades típicas de movimiento van de 80 mm/s a 150 mm/s, dependiendo del material y la precisión requerida. (Rauwendal, 2014).
- **Temperatura de la cama caliente:** La cama caliente ayuda a adherir el objeto impreso a la superficie durante el proceso. Su temperatura debe ajustarse según el material; por ejemplo, para el PLA suele ser de 50°C a 60°C, mientras que para el ABS se recomienda entre 90°C y 110°C. Una cama caliente ayuda a prevenir el warping o deformación de las piezas durante el enfriamiento. (Brydson, 2017).

- Retracción del filamento: La retracción del filamento se refiere al proceso en el cual el extrusor retrocede ligeramente el filamento antes de moverse a otra área de impresión. Esto evita que el material se derrame y cause hilos indeseados o "cabelos". La configuración de la retracción incluye la distancia y la velocidad de retracción, que varían según el material y la impresora. (Parveen y Yahya, 2020).

- Diámetro de la boquilla: El diámetro de la boquilla determina la anchura de las líneas de material depositadas. Una boquilla más pequeña (0.2-0.3 mm) permite imprimir con mayor detalle y precisión, mientras que una boquilla más grande (0.4-0.8 mm) acelera la impresión, pero reduce la resolución de los detalles finos. La elección del diámetro adecuado depende del equilibrio entre velocidad, precisión y tipo de material, ya que influye directamente en la calidad superficial y la resistencia de la pieza final (Brydson, 2017).

- Adhesión a la superficie de impresión: La preparación y tipo de superficie de impresión (como cinta, pegamento, lámina de PEI o vidrio) influyen en la adherencia de la primera capa. Una mala adhesión puede provocar deformaciones o desprendimiento del objeto durante la impresión, por lo que es importante elegir la superficie adecuada según el material. Además, mantener la superficie limpia y nivelada es esencial para garantizar una adhesión uniforme y evitar defectos en las capas iniciales. La temperatura de la base también desempeña un papel crucial, ya que una cama caliente mejora la fijación del material y reduce el riesgo de deformaciones durante el proceso de impresión (Michaels y Garr, 2019).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

## 2.1 Materiales

Para la elaboración de los materiales compuestos se empleó como matriz PET reciclado, obtenido a partir de botellas posconsumo de marcas comerciales como Coca-Cola, Pepsi y Sprite. Como refuerzo se utilizaron partículas de sargazo con un tamaño promedio de 53 micras, recolectadas en la playa Miramar. La matriz experimental se presenta en la Tabla 2.1, expresada en partes por cien de hule (phr) en función de la cantidad de PET. Los compuestos fueron identificados como P\_0 para la referencia (PET puro) y como P\_1, P\_3, P\_5 para los materiales compuestos de PET/PS. Por ejemplo, el compuesto P\_0 correspondió a 200 g de PET obtenido de botellas de plástico.

Se elaboró una referencia de 200 g de PET y tres materiales con diferentes niveles de modificador. Para 1 PHR se utilizaron 198.02 g de PET y 1.98 g de sargazo; para 5 PHR, 190.48 g de PET y 9.52 g de sargazo. Asimismo, en la Tabla 2.2 se detallan las proporciones correspondientes de PET y sargazo calculadas para una base de 200 gramos de material total.

Tabla 2.1. Matriz experimental de compuestos PETr/Sargazo.

| Formulaciones |     |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-----|-----|
| Materiales    | P_0 | P_1 | P_3 | P_5 |
| PET(PHR)      | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Sargazo (PHR) | 0   | 1   | 3   | 5   |

Tabla 2.2. Cantidades de las formulaciones en gramos de compuesto PETr/sargazo.

| Materiales | Peso (gr) |        |        |        |
|------------|-----------|--------|--------|--------|
| PET        | 200       | 198.02 | 194.17 | 190.48 |
| Sargazo    | 0         | 1.98   | 5.83   | 9.52   |
| Total      | 200       | 200    | 200    | 200    |

A continuación, se describe el procedimiento seguido para la obtención de las partículas de sargazo utilizadas como refuerzo en los materiales compuestos.

## 2.2 Obtención de las partículas de PET

La primera fase del proceso consistió en la recolección de PET y sargazo. El PET fue almacenado en bolsas de plástico y posteriormente trasladado al campus 3, donde se efectuó el lavado y corte del material con el fin de eliminar residuos de refresco, tierra y etiquetas adheridas a los envases. Una vez limpio, el PET fue sometido a un proceso de molienda inicial, obteniéndose escamas, sin que fuera necesario aplicar un tamizado adicional.

Con el objetivo de optimizar su posterior procesamiento en la etapa de extrusión, se realizó una molienda adicional en la empresa MG Polímeros. Este procedimiento se llevó a cabo en dos etapas: en la primera, el material fue triturado hasta alcanzar un tamaño aproximado de 1 cm; en la segunda, se redujo hasta alcanzar una granulometría cercana a 500 micras.

Finalmente, el PET molido fue sometido a un proceso de secado en charolas de aluminio, utilizando una estufa de convección simple Redline a una temperatura de 40 °C durante 24 horas continuas, lo que permitió obtener un material libre de humedad y en condiciones adecuadas para su procesamiento posterior. La diferencia entre el PET reciclado triturado y molido se representa en la figura 2.1.



Figura 2.1 PET reciclado en escamas y molido.

### 2.3 Obtención de las partículas de sargazo

El proceso comenzó con la recolección del sargazo en la playa Miramar, ubicada en Ciudad Madero, Tamaulipas. Posteriormente, el material se lavó con agua destilada con el fin de eliminar residuos de arena, sal o basura que pudieran estar presentes. Una vez lavado, se retiró el exceso de agua mediante un colador y se procedió a secar el sargazo en una estufa de convección simple Redline a 40 °C durante 12 horas.

El alga seca fue sometida a una reducción de tamaño de partícula utilizando un molino de paletas de alto esfuerzo y, posteriormente, se tamizó empleando una malla N.º 270 ASTM hasta alcanzar un tamaño de partícula promedio de 53 micras. Para garantizar la calidad del tamizado, se utilizó una serie de mallas con diferentes aberturas: 18, 25, 35, 60, 80 y 270, con lo cual se obtuvo una separación progresiva de las fracciones de mayor a menor tamaño, finalizando con la obtención de los finos.

Antes de cada corrida, las mallas de los tamices fueron limpiadas cuidadosamente, ya sea mediante aire comprimido o con un cepillo de alambre, para asegurar su correcta operación y evitar contaminaciones cruzadas. Posteriormente, los tamices fueron ensamblados con sus tapas correspondientes y se aplicó una agitación manual durante un minuto.

Finalmente, el material retenido en cada malla se separó de forma individual y se almacenó en bolsas Ziploc previamente etiquetadas, indicando el tamaño de partícula correspondiente a cada fracción obtenida. El proceso de obtención se describe gráficamente en la figura 2.2.



Figura 2.2 Proceso de obtención de partículas de sargazo.

La figura 2.3 muestra la diferencia entre el sargazo seco y molido.



Figura 2.3 Sargazo seco y molido.

## 2.4 Operación del extrusor de plástico Beutelspacher

Antes de realizar la operación del extrusor, con características específicas: paso constante, ángulo del filete constante y profundidad constante. En las figuras 2.4, 2.5 y 2.6 se muestran el extrusor, el husillo y dado utilizado.



Figura 2.4. Extrusora de plástico de la marca Beutelspacher.

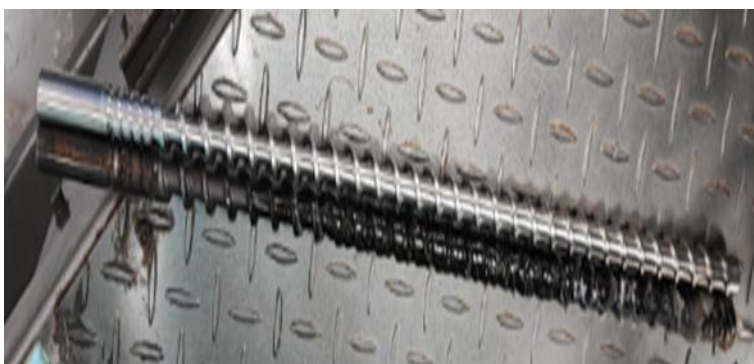


Figura 2.5. Husillo modificado para procesar PET.

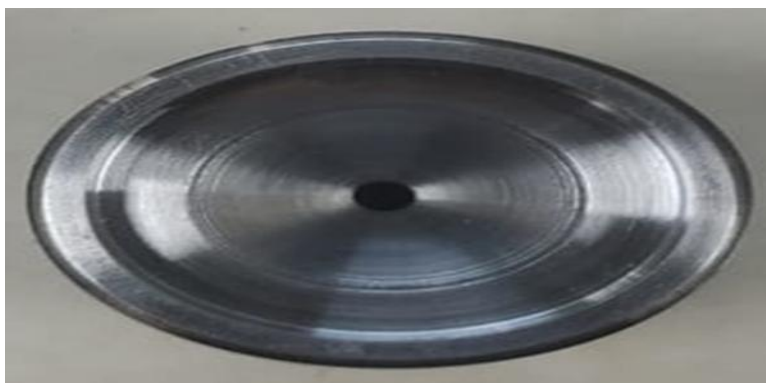


Figura 2.6. Dado utilizado para la obtención de filamentos de PET/PS.

## 2.5. Condiciones de extrusión de filamentos de compuestos PET/sargazo

Se elaboraron materiales compuestos de PET considerando las condiciones de procesamiento resumidas en la Tabla 2.3. Dichas condiciones corresponden a las temperaturas establecidas en las cuatro zonas de calentamiento del extrusor ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ ), así como a la velocidad de extrusión empleada para cada formulación. Este control de parámetros resulta fundamental para garantizar una adecuada fusión del polímero y una dispersión homogénea del refuerzo, ya que variaciones significativas en las temperaturas o en la velocidad de procesamiento pueden generar defectos en la estructura del material, como porosidades, aglomeración de partículas o degradación térmica del PET.

Tabla 2.3. Condiciones de extrusión de los materiales compuestos de PET y sargazo.

| Material | T <sub>1</sub> (°C) | T <sub>2</sub> (°C) | T <sub>3</sub> (°C) | T <sub>4</sub> (°C) | Velocidad de extrusión |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| P_0      | 209                 | 224                 | 234                 | 240                 | 38                     |
| P_1      | 212                 | 223                 | 226                 | 237                 | 31                     |
| P_3      | 196                 | 218                 | 222                 | 232                 | 33                     |
| P_5      | 210                 | 227                 | 232                 | 240                 | 35                     |

Tras descartar la formulación con 10 phr por problemas en la extrusión e impresión 3D, el perfil de temperaturas del proceso se definió a partir de análisis DSC. Este perfil se ajustó para cada formulación según la cantidad de refuerzo, considerando su influencia en el comportamiento térmico y reológico, y evitando en todo momento alcanzar temperaturas de degradación.

## 2.6 Impresión 3D

Los parámetros utilizados para la elaboración de las probetas son la temperatura de la boquilla de 260°C, la temperatura de la cama de 60°C, un patrón de relleno de cruz, una densidad de relleno de 100% y una velocidad de 50 mm/s. En la figura 2.7 se ilustra la impresora 3D utilizada de la marca Ender 3 versión 1.

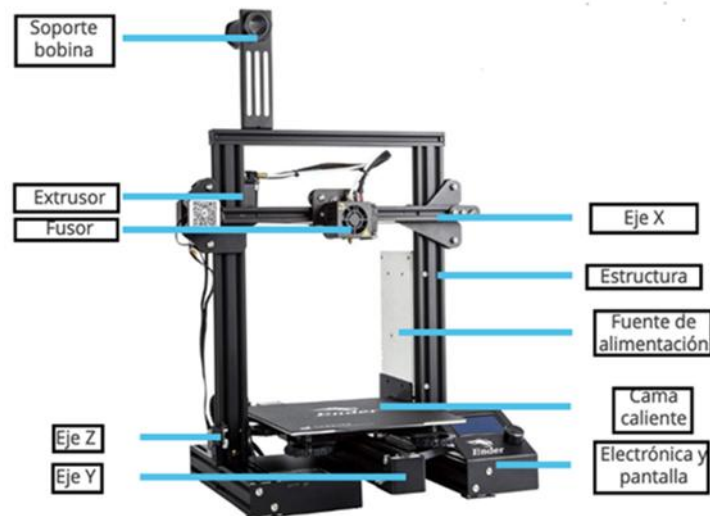


Figura 2.7. Impresora 3D Ender 3

Las dimensiones de las probetas para realizar los ensayos de resistencia a la tracción (ASTM D638), impacto izod (ASTM D256) y análisis dinámico mecánico (ASTM D4065, D4440, D5279) se ilustran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Dimensiones de las probetas por ensayo.

| Dimensiones | R. tracción | Impacto izod | DMA |
|-------------|-------------|--------------|-----|
| Ancho(mm)   | 9.53        | 12.7         | 13  |
| Largo(mm)   | 63.5        | 63.5         | 59  |
| Espesor(mm) | 3.2         | 3.2          | 3   |

## 2.7 Técnicas de Caracterización de Materiales

### 2.7.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica de espectroscopia vibracional que permite obtener información molecular a partir de la interacción entre radiación infrarroja y la materia. Su principal diferencia con respecto al método dispersivo tradicional radica en la forma de adquisición del espectro: mientras que en los espectrómetros dispersivos se analizaba cada longitud de onda de manera secuencial mediante un monocromador, en la FTIR se irradian simultáneamente todas las longitudes de onda y el interferómetro genera una señal compleja (interferograma) que posteriormente se convierte en el espectro mediante transformada de Fourier (Skoog, 2018).

Este cambio representa un avance fundamental, ya que permite reducir significativamente el tiempo de análisis, mejorar la relación señal/ruido y obtener espectros con mayor resolución y reproducibilidad. Además, la variante ATR (Reflectancia Total Atenuada) facilita el análisis directo de muestras sólidas, líquidas y geles mediante el uso de un cristal con alto índice de refracción (diamante, germanio, ZnSe o silicio), siendo el diamante uno de los materiales más versátiles por su resistencia y estabilidad.

El análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR ATR) se realizó con un equipo Perkin Elmer Spectra 100, utilizando el accesorio ATR en películas de las muestras, sobre un rango de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ , con resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$  y 16 barridos. El estudio fue llevado a cabo en el Centro de Investigación en Petroquímica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. La figura 2.8 muestra el equipo FTIR de la marca Perkin Elmer utilizado modelo Spectra 100.



Figura 2.8 El espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Spectrum 100 FT-IR.

Previo a la conformación, el material fue sometido a un proceso de secado con el fin de evitar la aparición de una banda característica atribuida al grupo  $\text{-OH}$ , la cual se asocia con la presencia de humedad. Posteriormente, las películas se elaboraron empleando una prensa hidráulica equipada con dos placas metálicas y pellets de filamentos. La presión aplicada se incrementó de manera progresiva en intervalos de 5 toneladas, hasta alcanzar un máximo de 15 toneladas. En cada incremento de presión se mantuvo un tiempo de espera de 5 minutos.

### **2.7.2 Análisis termogravimétrico (TGA)**

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica cuantitativa de análisis térmico que permite caracterizar compuestos orgánicos e inorgánicos mediante la medición de cambios de masa bajo un programa de calentamiento controlado. Además, puede acoplarse con

espectroscopía FTIR para identificar los gases desprendidos durante la degradación térmica (Skoog, Holler, Crouch, 2018).

El TGA se aplica ampliamente en la industria petroquímica, farmacéutica y alimentaria. Entre sus usos destacan el control de calidad de materiales, la determinación de estabilidad térmica, el análisis de procesos de oxidación/combustión y la evaluación de polímeros para cuantificar humedad, aditivos o cargas (Haines, 2002).

El fundamento del método consiste en registrar la pérdida de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo. Estos cambios reflejan procesos de volatilización, descomposición o reacciones químicas, permitiendo obtener huellas térmicas características de cada material (Rodríguez y Pérez, 2014).

Existen tres modalidades principales: TGA isotérmica, donde la temperatura se mantiene constante; TGA dinámica, donde la temperatura se incrementa linealmente; y TGA casi estática, en la que se aplican incrementos graduales. Cada una se emplea según el objetivo del análisis (Wendlandt, 1986).

El instrumento utilizado incluye una balanza de alta precisión, un crisol y un horno programable. Las atmósferas pueden ser inertes (nitrógeno, argón), oxidantes (oxígeno, aire), reductoras o de vacío. Los crisoles empleados suelen ser de alúmina, aluminio de alta pureza o aleaciones Pt/Rh, seleccionados según la naturaleza de la muestra y las condiciones del ensayo (Menczel y Prime, 2009).

Se realizó un ensayo con un rango de 25 a 700°C con aire y una rampa de 10°C/min. La figura 2.9 muestra el analizador térmico simultáneo (SDT) Q600 de TA Instruments.



Figura 2.9 Equipo TGA/DSC TA instruments STD Q600.

### 2.7.3 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción se define como la fuerza necesaria para romper una muestra, dividida entre el área de su sección transversal. Esta propiedad, medida en pascales (Pa), evalúa la capacidad de un polímero para soportar esfuerzos de estiramiento. Generalmente se determina siguiendo la norma ASTM D638, bajo condiciones de 50% de humedad relativa y 23 °C de temperatura (ASTM International, 2014).

El procedimiento experimental consiste en colocar la probeta en una máquina universal de ensayos, sujeta entre dos mordazas: una fija y otra móvil que se desplaza a velocidad controlada. A partir de este ensayo se obtiene la curva esfuerzo–deformación, que permite calcular parámetros como el módulo elástico, definido como la pendiente inicial de dicha curva (Callister y Rethwisch, 2018).

La resistencia máxima a la tracción corresponde al esfuerzo requerido para fracturar la probeta, calculado con el área mínima de la sección transversal. Materiales con elevado alargamiento máximo presentan un comportamiento más elástico, similar al caucho, mientras que aquellos con elongación menor ofrecen mayor rigidez. La tenacidad del material, por su parte, se evalúa como el área total bajo la curva esfuerzo–deformación (Sperling, 2006).

La deformación por estiramiento se define como el cambio relativo en la longitud de la probeta al aplicar una carga específica. Puede clasificarse en deformación elástica

(recuperable tras retirar la carga) y deformación plástica o por fluencia, que es permanente. Esta diferenciación permite entender el comportamiento de los polímeros frente a cargas sostenidas o repetidas (Strong, 2006).

Finalmente, la elongación máxima de un material determina su idoneidad para aplicaciones específicas: valores altos son deseables en materiales diseñados para absorber impactos, mientras que elongaciones más bajas favorecen la rigidez y estabilidad dimensional (Osswald y Menges, 2012).

Finalmente, el porcentaje de alargamiento puede calcularse mediante una ecuación específica, indicada como ecuación 1.

$$\%EI = \Delta I / I \times 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

En este caso,  $\Delta I$  es el incremento de longitud (longitud final menos longitud inicial) y  $I$  es la longitud inicial de referencia. En la figura 2.10 ilustra la máquina universal Instron para ensayo de tracción.

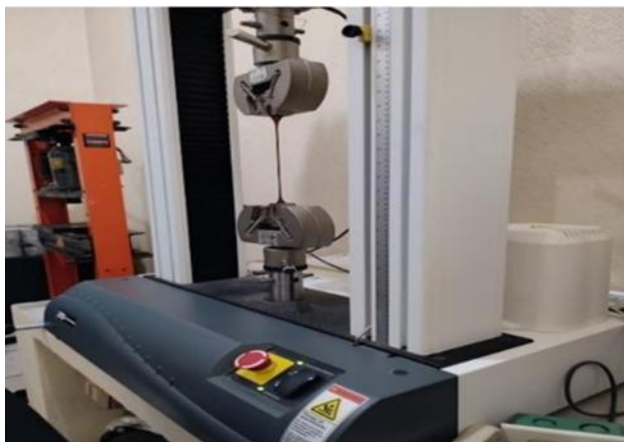


Figura 2.10 Máquina universal Instron para ensayo de tracción.

#### **2.7.4 Resistencia al impacto**

La norma ASTM D256 establece un método estándar para medir la resistencia al impacto de plásticos mediante el ensayo Izod, el cual evalúa la capacidad de un material para resistir

fracturas ante un golpe repentino (ASTM International, 2018). Para ello, se utiliza una probeta entallada en posición vertical, donde la entalla actúa como concentrador de tensión que asegura una propagación controlada de la fractura. Un péndulo liberado desde una altura fija golpea la probeta y el equipo registra la energía absorbida durante la rotura.

La resistencia al impacto se expresa en J/m o kJ/m<sup>2</sup>, normalizada en función del ancho de la probeta. Este parámetro es fundamental en la industria de plásticos porque permite comparar materiales y evaluar su calidad, además de definir su idoneidad en aplicaciones que requieren soportar impactos frecuentes, como carcasas de dispositivos electrónicos o piezas automotrices (Callister y Rethwisch, 2018).

El ensayo Izod también proporciona información útil para el diseño de productos que requieren combinar resistencia mecánica y durabilidad frente a condiciones de uso exigentes, asegurando un desempeño confiable en situaciones donde los impactos son inevitables (Osswald y Menges, 2012). El equipo utilizado para el ensayo de impacto Izod se muestra en la figura 2.11.

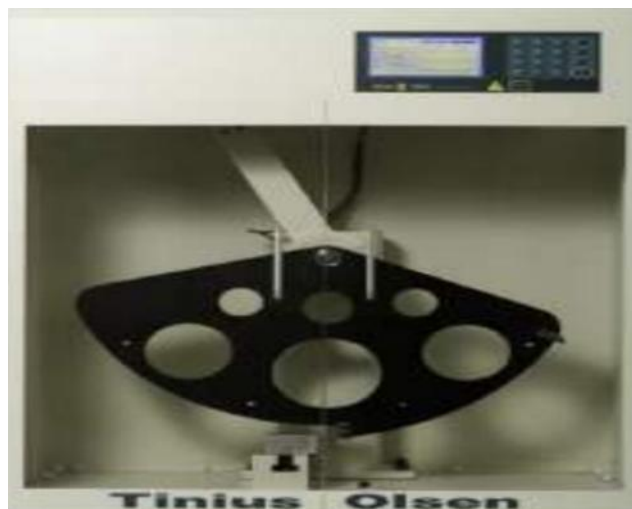


Figura 2.11. Equipo para ensayo de impacto Izod de la marca Tinius Olsen.

#### **2.7.5. Análisis Dinámico Mecánico (DMA)**

El Análisis Dinámico Mecánico (DMA) es una técnica que estudia las propiedades viscoelásticas de los materiales aplicando una fuerza oscilatoria bajo control de variables

como temperatura, frecuencia o tiempo. A partir de este ensayo se obtienen parámetros clave: el módulo de almacenamiento ( $E'$ ), que mide la energía retenida en la deformación; el módulo de pérdida ( $E''$ ), que refleja la energía disipada como calor; y el factor de amortiguamiento ( $\tan \delta$ ), que indica la relación entre ambos. Estos parámetros son esenciales para identificar transiciones térmicas, como la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), donde los polímeros cambian de rígidos a flexibles (Menard, 2020).

El DMA se aplica en sectores como la industria automotriz, aeroespacial y biomédica, donde es importante conocer la respuesta mecánica bajo condiciones dinámicas. Sirve para evaluar la durabilidad de materiales compuestos, su comportamiento frente a condiciones extremas y los efectos del envejecimiento, facilitando la selección de materiales adecuados en cuanto a rigidez o flexibilidad (Hutchinson y Liu, 2018).

No obstante, su interpretación requiere experiencia, ya que los resultados dependen de las condiciones experimentales (temperatura, frecuencia, geometría de la muestra). Por ello, se recomienda complementarlo con otras técnicas térmicas y mecánicas para obtener una caracterización integral (Menczel y Prime, 2009). Este análisis, se realizará en un rango de -50 °C a 250 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. El equipo dinámico mecánico de la marca TA Instruments, modelo Q800 (Figura 2.12).



Figura 2.12 Equipo para análisis dinámico mecánico de la Marca TA instruments, modelo Q800.

### 2.7.6. Índice de Fluidéz (MFI)

El índice de fluidéz en el fundido (Melt Flow Index, MFI) es un parámetro reológico de gran relevancia para la industria de los polímeros, ya que proporciona una medida indirecta de la viscosidad y del peso molecular promedio de las cadenas poliméricas. Se define como la masa de material, en gramos, que fluye a través de un orificio capilar estandarizado en un intervalo de 10 minutos, bajo condiciones específicas de temperatura y carga (ASTM International, 2020). Este valor resulta fundamental para establecer comparaciones entre diferentes grados de polímeros, evaluar su procesabilidad y definir aplicaciones industriales óptimas.

El ensayo se regula principalmente por las normas ASTM D1238 y ISO 1133, que estandarizan tanto la geometría del capilar como las condiciones de carga y temperatura. Durante la prueba, el polímero granulado o pulverizado se coloca en un cilindro calefaccionado, donde se funde y es sometido a la acción de un émbolo con peso normalizado. El fundido atraviesa un capilar de diámetro y longitud definidos, y la masa descargada se colecta para su cuantificación. A partir de este procedimiento, valores altos de MFI se correlacionan con polímeros de menor peso molecular y menor viscosidad, mientras que valores bajos indican cadenas más largas, con viscosidades elevadas y, por tanto, mayor resistencia al flujo (Mülhaupt, 2013).

En el ámbito industrial, el MFI constituye un criterio de selección para aplicaciones específicas: los polímeros con MFI alto suelen ser preferidos para procesos como extrusión de películas delgadas, recubrimientos y fibras, donde se requiere un flujo rápido y uniforme. Por el contrario, los polímeros con MFI bajo son idóneos para aplicaciones que exigen resistencia mecánica superior, como inyección de piezas estructurales, envases rígidos o componentes técnicos. No obstante, es necesario destacar que el MFI no es un valor absoluto ni suficiente para caracterizar por completo el desempeño del material, ya que no informa directamente sobre la distribución de pesos moleculares ni sobre propiedades mecánicas o térmicas (Ostwald y Menges, 2012).

En este estudio, la determinación del MFI se llevó a cabo empleando un plastógrafo marca Physical Test Solutions, modelo XNR 400 C, diseñado para cumplir rigurosamente con la norma ASTM D1238. Las condiciones operativas se establecieron en una temperatura de 250

°C y una carga aplicada de 2.16 kg, parámetros usualmente utilizados para polímeros como el tereftalato de polietileno (PET).

La figura 2.13 ilustra el plastógrafo modelo XNR 400 C, utilizado en este ensayo. Este equipo cuenta con un sistema de calentamiento controlado electrónicamente, un émbolo motorizado para aplicar cargas normalizadas y un mecanismo de registro digital del flujo, lo que asegura alta precisión y repetibilidad en las mediciones.

Gracias a estas características, el instrumento no solo se emplea en la investigación académica, sino también en plantas de transformación de plásticos, donde permite establecer criterios rápidos y confiables para la aceptación de materias primas y el ajuste de condiciones de operación.



Figura 2.13. Plastógrafo para medir el índice de fluidez modelo XNR 400 C.

### 2.7.7. Microscopía óptica

La microscopía óptica es una de las técnicas más utilizadas en la caracterización de materiales y en las ciencias biológicas, debido a su versatilidad, simplicidad y accesibilidad. Este método se basa en la interacción de la luz visible con la muestra, que al atravesar o reflejarse en ella es amplificada mediante un sistema de lentes, permitiendo observar estructuras que van desde el rango micrométrico hasta una resolución límite de aproximadamente 200

nanómetros. Aunque no alcanza la capacidad de resolución de técnicas más avanzadas como la microscopía electrónica, sigue siendo una herramienta esencial para el análisis preliminar de muestras, ya que proporciona información rápida y confiable acerca de la morfología, textura, coloración y distribución de fases o componentes (Murphy & Davidson, 2012). En el ámbito industrial y de materiales, esta técnica se utiliza ampliamente para examinar la superficie de polímeros, metales, cerámicos y compuestos, con el fin de detectar defectos, grietas, inclusiones o irregularidades superficiales que puedan comprometer sus propiedades mecánicas o funcionales, así como para comparar la homogeneidad de matrices poliméricas y verificar la dispersión de refuerzos o aditivos, constituyendo un paso preliminar indispensable en investigaciones de ciencia de materiales. En el presente estudio, la microscopía óptica se realizó utilizando un microscopio electrónico equipado con 8 luces LED, con un rango de aumentos desde 225x hasta 1075x, y un microscopio ZEISS Axio Lab A1, reconocido por su alta precisión y calidad de imagen, que permitió un aumento de 5X suficiente para identificar diferencias en la superficie de las muestras y visualizar la distribución general de partículas dentro de la matriz polimérica. El análisis incorporó el uso de filtros inversos y escalas en tonos de gris para optimizar la visualización y el contraste, lo que facilitó la observación de variaciones en textura, homogeneidad, zonas con mejor dispersión de partículas, posibles aglomeraciones y diferencias en la uniformidad de la matriz. Estas observaciones se realizaron en las instalaciones del Centro de Investigación en Petroquímica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, bajo condiciones controladas que garantizaron la precisión y reproducibilidad de los resultados, permitiendo obtener micrografías claras y representativas de cada muestra, que sirvieron como base para el análisis comparativo y la evaluación de la calidad del procesamiento y la eficacia del refuerzo en los materiales compuestos estudiados. La figura 2.14 muestra el equipo utilizado, destacando su diseño ergonómico y su capacidad para incorporar diferentes objetivos y sistemas de iluminación, permitiendo ajustar las condiciones de observación según las necesidades del análisis y asegurando la obtención de imágenes reproducibles y de alta calidad para la documentación científica.



Figura 2.14. Microscopio óptico ZEISS Axio Lab A1.

#### **2.7.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica utiliza electrones en lugar de luz, lo que permite alcanzar resoluciones mucho mayores, llegando al rango de nanómetros e incluso angstroms. Esto se debe a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de la luz visible, lo que incrementa notablemente la capacidad de resolución. Existen dos modalidades principales: la microscopía electrónica de barrido (SEM), que genera imágenes tridimensionales al rastrear la superficie de la muestra con un haz de electrones y detectar los electrones secundarios emitidos, y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), que posibilita estudiar la estructura interna al atravesar la muestra con electrones ultrafinos y registrar la intensidad transmitida. Mientras que el SEM proporciona información sobre topografía y morfología superficial, el TEM es ideal para el análisis de estructuras cristalinas, defectos y organización interna. Ambas técnicas son esenciales en la investigación de materiales avanzados y biología estructural, ya que proporcionan información a nivel atómico que no puede alcanzarse con otras técnicas (Williams y Carter, 2009). En conjunto, estas herramientas se complementan y permiten una caracterización integral de las muestras en múltiples áreas científicas.

En este trabajo, la microscopía óptica fue empleada como primer paso para la caracterización de los compuestos, permitiendo identificar diferencias morfológicas generales antes de aplicar técnicas de mayor resolución. Se utilizaron aumentos de 500X, 700X y 1000X, los cuales resultaron adecuados para observar la textura superficial, distribución de partículas y posibles defectos en la matriz polimérica.

Estas observaciones iniciales aportaron una visión general del grado de homogeneidad de los materiales preparados y sirvieron como base para justificar el análisis posterior mediante microscopía electrónica. La figura 2.15 ilustra un equipo de microscopía electrónico de barrido.



Figura 2.15. Microscopio Electrónico de Barrido.

# **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3.1 Evaluación Visual de los Filamentos de Compuestos PET/Sargazo

El aumento gradual del contenido de sargazo en la matriz de PET provoca cambios notables en las propiedades visuales, superficiales y mecánicas del material compuesto. En la formulación sin refuerzo (P\_0), el filamento tiene una apariencia bastante uniforme, con un tono azul verdoso y una superficie lisa, típica del PET que ha sido procesado térmicamente. Sin embargo, al añadir sargazo en concentraciones bajas (P\_1), se nota un cambio hacia colores marrón claro y un ligero incremento en la rugosidad de la superficie. Este oscurecimiento se puede atribuir a la composición química de las macroalgas pardas, que contienen pigmentos como la fucoxantina y una alta concentración de compuestos fenólicos y polifenoles, responsables de esos tonos marrones característicos de este tipo de biomasa (Holdt y Kraan, 2011). A medida que la concentración del refuerzo aumenta (P\_3 y P\_5), el color marrón se hace más pronunciado, lo que sugiere una mayor cantidad de partículas de sargazo dispersas en la matriz polimérica. Este comportamiento coincide con lo que se ha reportado para biocompuestos reforzados con biomasa marina, donde el aumento del contenido de alga altera significativamente la respuesta óptica del material debido a la absorción y dispersión de la luz por las partículas lignocelulósicas (Khalil y col., 2017). Además del cambio en el color, se observa un aumento progresivo en la rugosidad de la superficie del filamento, especialmente en P\_3 y de manera más marcada en P\_5. Este fenómeno puede explicarse por una dispersión irregular del refuerzo y la posible formación de aglomerados, que generan irregularidades en la superficie y afectan la continuidad de la fase polimérica. Desde el punto de vista mecánico, el comportamiento más quebradizo que se observa en la formulación con mayor contenido de sargazo (P\_5) puede estar relacionado con la limitada compatibilidad interfacial entre la matriz de PET y el sargazo.

En los sistemas de polímero y fibra natural, cuando la adhesión entre ellos no es la ideal, las partículas pueden actuar como concentradores de esfuerzo. Esto limita la movilidad de las cadenas poliméricas y favorece la aparición de fracturas frágiles (Pickering y col., 2016). Además, un alto contenido de refuerzo puede afectar la continuidad estructural del polímero, lo que a su vez reduce la cohesión interna y disminuye la capacidad de deformación antes de que ocurra la fractura. En resumen, los cambios que se observan en la coloración, la textura superficial y el comportamiento mecánico demuestran que un mayor contenido de sargazo

impacta directamente en la microestructura y en la respuesta macroscópica del material compuesto. Estos efectos son típicos de los biocompuestos reforzados con macroalgas pardas, donde predominan las interacciones físicas y los fenómenos de dispersión, en lugar de cambios químicos profundos en la matriz polimérica (Khalil y col., 2017). La Figura 3.11 muestra los filamentos obtenidos a partir de los compuestos de PET/Sargazo, correspondientes a las formulaciones P\_0, P\_1, P\_3 y P\_5.



Figura 3.11. Filamentos compuestos de PET/Sargazo.

### 3.2. Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

En este capítulo, vamos a explorar y discutir los resultados de la caracterización por FTIR de los compuestos de PET/sargazo con distintas concentraciones de refuerzo. El objetivo de este análisis fue identificar posibles interacciones químicas entre los grupos funcionales del PET y los componentes lignocelulósicos del sargazo. En la Figura 3.12, se presentan los espectros infrarrojos de los compuestos con 1, 3 y 5 phr de sargazo. Se pueden identificar claramente las bandas características del PET: el estiramiento del grupo carbonilo ( $C=O$ ) alrededor de  $1713\text{ cm}^{-1}$ , el estiramiento C-O-C del grupo éster en la región de  $1240$  a  $1100\text{ cm}^{-1}$ , y la vibración de balanceo del grupo  $-CH_2-$  cerca de  $723\text{ cm}^{-1}$ . Estas señales son coherentes con lo que se ha reportado para el PET en estudios estructurales mediante espectroscopía infrarroja (Socrates, 2001). Sin embargo, en la muestra P\_3, se nota un desplazamiento de la

banda del carbonilo hacia un número de onda más bajo ( $\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ ). Este corrimiento hacia frecuencias más bajas (red shift) sugiere una disminución en la energía vibracional del enlace C=O, un fenómeno que suele asociarse a la formación de interacciones intermoleculares, especialmente puentes de hidrógeno entre el carbonilo del PET y los grupos hidroxilo presentes en materiales lignocelulósicos. Cuando el carbonilo actúa como aceptor de puente de hidrógeno, la constante de fuerza del enlace disminuye, lo que reduce la frecuencia vibracional sin que necesariamente se formen nuevos enlaces covalentes (Paci y La Mantia, 1998).

Además, el ligero cambio que se observa en la banda cercana a  $720\text{ cm}^{-1}$ , que está relacionado con el balanceo del grupo  $-\text{CH}_2-$  y la organización cristalina del PET, puede deberse a alteraciones en el grado de cristalinidad o en cómo se empaquetan las cadenas poliméricas, todo esto influenciado por la presencia del refuerzo. En sistemas de polímero y fibra natural, se ha encontrado que la adición de fases lignocelulósicas puede modificar la microestructura del polímero, lo que se traduce en cambios en la intensidad o posición de bandas que son sensibles a la organización estructural (Awaja y Pavel, 2005). La inclusión de sargazo también trae consigo nuevas señales que corresponden a grupos funcionales característicos de la biomasa, como los estiramientos O-H ( $\sim 3250\text{ cm}^{-1}$ ), C-O-H ( $\sim 1340\text{ cm}^{-1}$ ) y S=O ( $\sim 1245\text{ cm}^{-1}$ ), que están asociados a polisacáridos sulfatados típicos de macroalgas pardas. Estas señales se presentan de manera aditiva en el espectro, lo que sugiere que hay coexistencia de fases en lugar de la formación de nuevas especies químicas. En resumen, aunque no se observan nuevas bandas que indiquen una reacción química entre la matriz y el refuerzo, los desplazamientos que se notan en la muestra P\_3 confirman que hay interacciones intermoleculares y efectos físicos que afectan la organización estructural del PET. Por lo tanto, se puede describir el sistema como un material compuesto donde la interacción física es predominante y la compatibilidad interfacial es moderada.

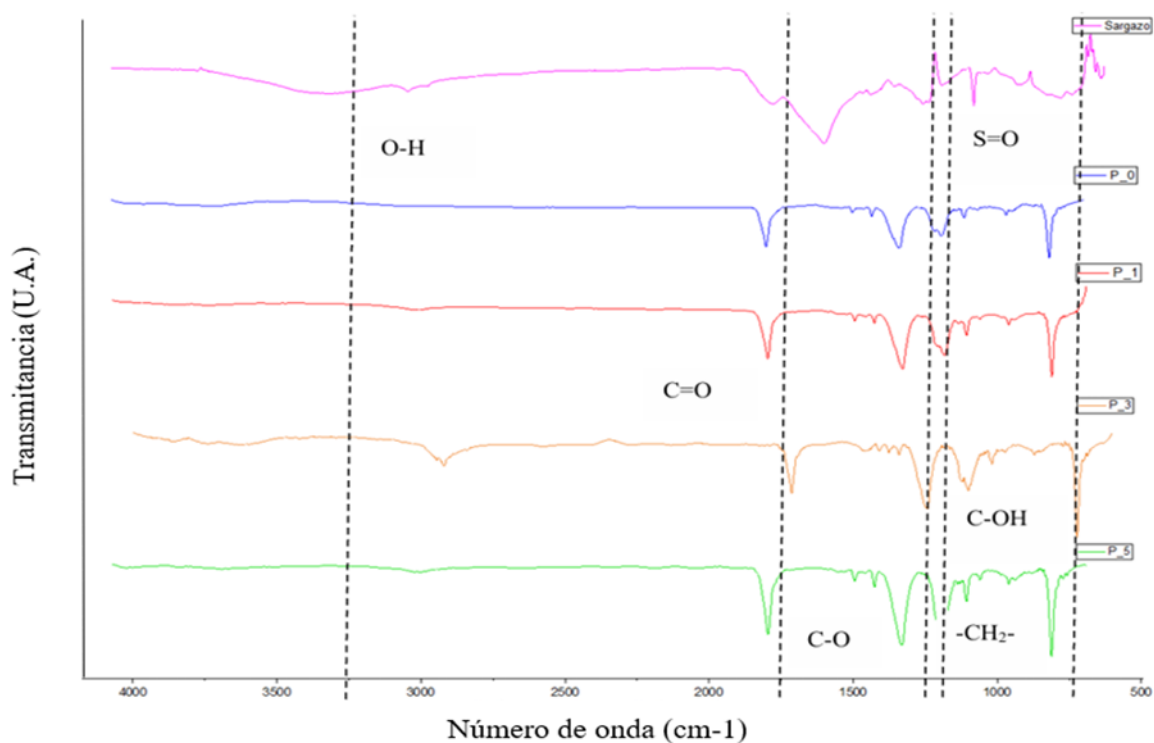


Figura 3.12. Espectros FTIR de los compuestos PET/sargazo a diferentes concentraciones de refuerzo.

### 3.3 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El diagrama de pérdida de peso obtenido mediante análisis termogravimétrico muestra el comportamiento térmico de las formulaciones P\_0, P\_1, P\_3 y P\_5 en función del incremento de temperatura. En la región inicial, hasta aproximadamente 300 °C, todas las muestras presentan una pérdida de masa prácticamente despreciable, manteniendo más del 99 % de su peso inicial, lo que indica una baja presencia de humedad y compuestos volátiles en los materiales. Este comportamiento confirma que el sargazo fue adecuadamente secado antes de su incorporación a la matriz polimérica.

Asimismo, la estabilidad observada en este intervalo térmico sugiere que la incorporación del refuerzo natural no compromete la procesabilidad del PET, debido a que los procesos industriales de extrusión y moldeo por inyección se realizan típicamente entre 250 °C y 280 °C. A temperaturas superiores, aproximadamente entre 400 °C y 500 °C, se observa la principal pérdida de masa, correspondiente a la degradación térmica del PET. Este fenómeno se asocia principalmente con la ruptura de los enlaces éster presentes en la cadena polimérica y con la formación de compuestos volátiles. Finalmente, al alcanzar temperaturas cercanas a 593 °C, las muestras presentan un residuo sólido entre aproximadamente 15.39 % y 18.21 %, el cual puede atribuirse a la formación de estructuras carbonosas y a la presencia de compuestos minerales provenientes del sargazo. Estos compuestos poseen un alto contenido de cenizas y permanecen estables a altas temperaturas (Awaja & Pavel, 2005; Holland & Hay, 2002; Villafán-Vidales et al., 2025).

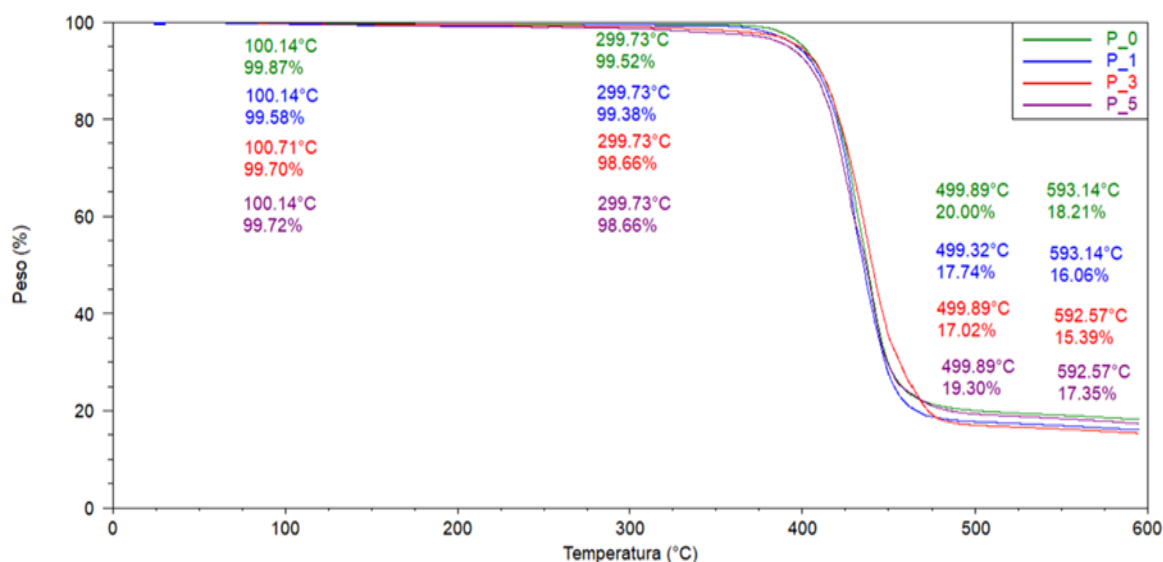


Figura 3.13. Termograma TGA de Pérdida de peso en función de la temperatura de los compuestos PET/sargazo.

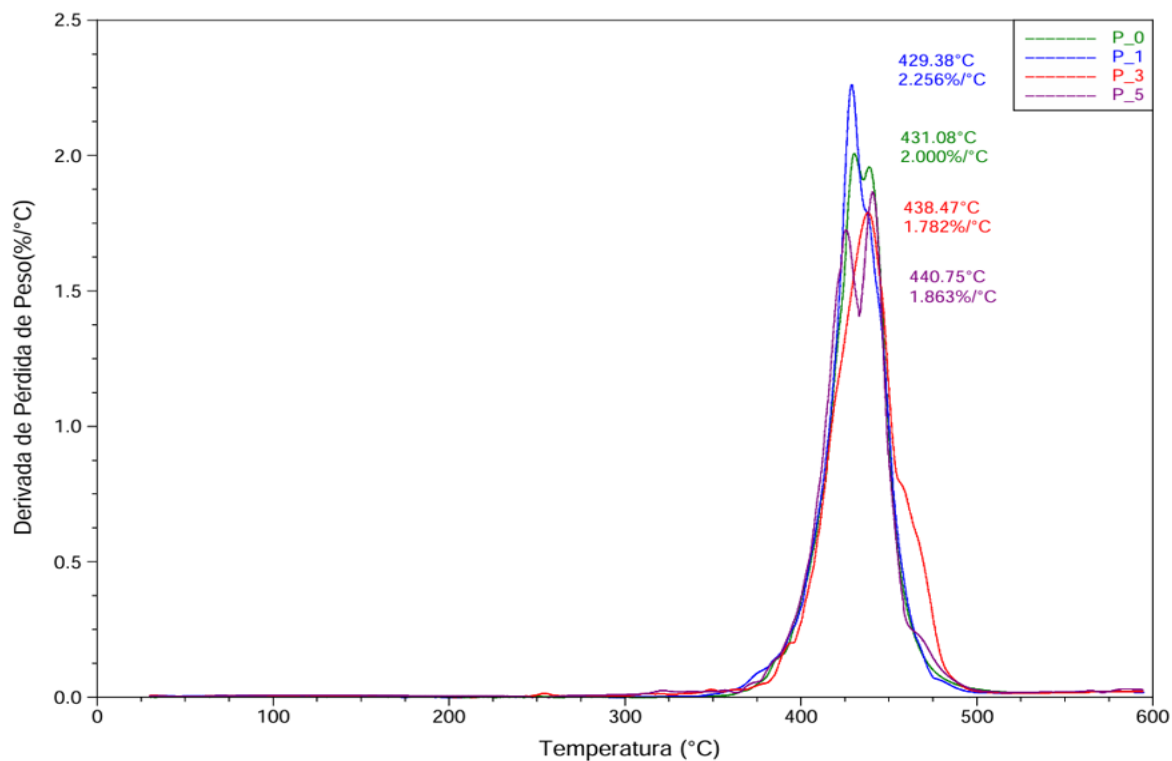


Figura 3.14. Derivada de la pérdida de peso (%/°C) en función de la temperatura para los compuestos PET/sargazo.

La tabla 3.1 reporta la temperatura y tasa de descomposición de los compuestos de PET y sargazo.

Tabla 3.1. Temperatura promedio de degradación y tasa de pérdida con respecto a la temperatura de compuestos de PET y sargazo.

| Compuesto | Temperatura promedio de degradación (°C) | Variación de la pérdida con respecto a la temperatura (%/°C) |
|-----------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| PET_0     | 430                                      | 2.19                                                         |
| PET_1     | 431                                      | 2.03                                                         |
| PET-3     | 438                                      | 1.78                                                         |
| PET-5     | 440                                      | 1.85                                                         |

La Figura 3.14 nos ayuda a identificar con mayor claridad las temperaturas donde la degradación alcanza su máxima velocidad y a entender mejor la cinética del proceso. El análisis de la derivada de la pérdida de peso respecto a la temperatura (DTGA) permite identificar con mayor precisión los eventos cinéticos asociados a la degradación térmica del material. En la formulación de PET puro (P\_0) se observan dos picos de degradación cercanos, localizados a 430.51 °C y 438.47 °C, con velocidades máximas de pérdida de masa de 2.199 %/°C y 1.956 %/°C, respectivamente, lo que indica la presencia de procesos de degradación superpuestos relacionados con la escisión de las cadenas poliméricas y la posterior descomposición de los fragmentos oligoméricos formados. En la formulación P\_1, el evento principal se presenta alrededor de 431.65 °C, con una velocidad máxima de degradación de 2.037 %/°C, mostrando una ligera disminución en la tasa de pérdida de masa respecto al PET puro. Para la formulación P\_3, el pico de degradación se desplaza hacia 438.47 °C, mientras que la velocidad máxima disminuye a 1.782 %/°C, lo que indica un retardo en la cinética de degradación. Finalmente, en la formulación P\_5 se distinguen dos eventos térmicos: el primero a 425.96 °C con una velocidad de 1.722 %/°C, asociado a la degradación de los componentes lignocelulósicos del sargazo y de la región interfacial entre la biomasa y la matriz polimérica, y un segundo pico a 440.18 °C con una velocidad de 1.857 %/°C, correspondiente a la degradación principal del PET. La disminución progresiva de la velocidad máxima de pérdida de masa con el incremento del contenido de sargazo sugiere que las partículas de biomasa actúan como una barrera física dentro de la matriz, dificultando la transferencia de calor y la difusión de productos volátiles, lo que conduce a una degradación más lenta y controlada del material (Yang et al., 2007; Yalçın et al., 2025).

### **3.4. Resistencia a la Tracción**

El PET de referencia mostró altos valores de resistencia a la tracción, entre 266.51 y 506.98 kgf/cm<sup>2</sup>, con módulos de Young entre 38974.09 y 48305.65 kgf/cm<sup>2</sup>. La elongación a la rotura se mantuvo entre 2.37% y 7.71%, reflejando un balance entre rigidez y ductilidad. Estos resultados confirman el carácter semicristalino y resistente del PET, tal como ha sido descrito en estudios previos sobre sus propiedades mecánicas (George y Kurian, 2014).

Al incorporar sargazo en concentraciones de P\_1, se observó una disminución significativa en la resistencia a la tracción (212.61 a 276.68 kgf/cm<sup>2</sup>) y en el módulo de Young (27734.92 a 31745.18 kgf/cm<sup>2</sup>). La elongación a la rotura fue menor al 5%, evidenciando pérdida de ductilidad. Este deterioro se atribuye a una dispersión deficiente del aditivo y a interacciones débiles entre la matriz de PET y las partículas de sargazo, fenómeno similar al reportado en refuerzos poliméricos mal integrados (Zhou y col., 2012).

En concentraciones de P\_3, la resistencia a la tracción se incrementó notablemente, alcanzando valores de hasta 329.23 kgf/cm<sup>2</sup> con elongaciones superiores al 11%. Estos resultados sugieren una mejor compatibilidad entre el sargazo y la matriz de PET a este nivel de carga, lo cual favorece la transferencia de esfuerzos y otorga mayor ductilidad al material (Rahman y col., 2016).

Finalmente, en P\_5 de sargazo, los compuestos mantuvieron valores estables de resistencia (222-225 kgf/cm<sup>2</sup>) y módulos de Young cercanos a 30500-31500 kgf/cm<sup>2</sup>. La elongación a la rotura se estabilizó en torno al 4%, indicando un comportamiento semidúctil constante. Esto coincide con lo señalado en la literatura, donde una mayor carga de fibras naturales puede estabilizar las propiedades mecánicas, pero con una reducción de la ductilidad (Bledzki y Gassan, 1999). La figura 3.15 presenta el gráfico de esfuerzo-deformación obtenido a partir de las pruebas de tracción realizadas en los compuestos de PET reciclado con diferentes concentraciones de sargazo.

En la curva se distinguen las etapas típicas del comportamiento mecánico de los polímeros: una región elástica inicial donde el esfuerzo es proporcional a la deformación, seguida de la zona plástica en la que ocurre el alargamiento antes de la rotura. Este análisis permite determinar parámetros fundamentales como la resistencia máxima a la tracción, el módulo de Young y la elongación a la rotura.

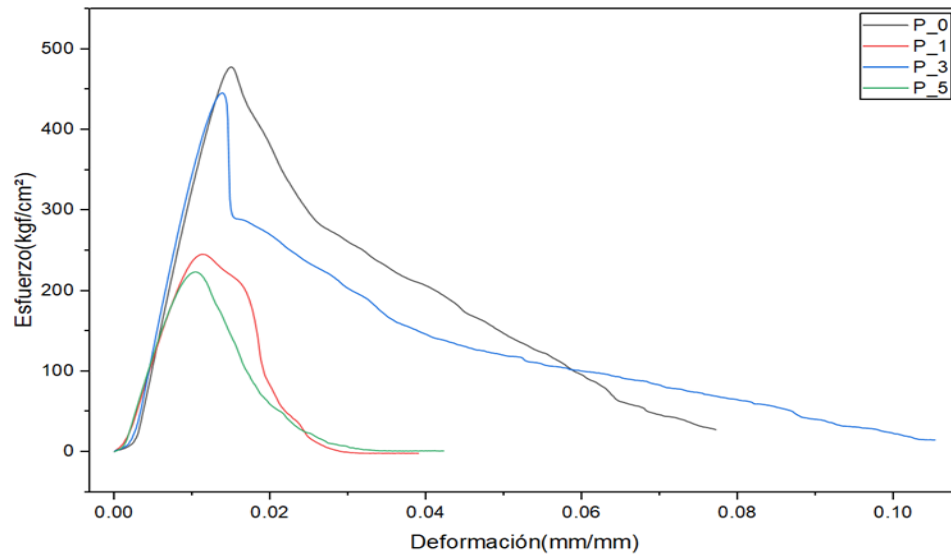


Figura 3.15. Curva de esfuerzo-deformación de los compuestos de PET reciclado con sargazo.

En las figuras 3.16, 3.17 ,3.18 y 3.19 muestran las probetas después del ensayo de tracción.



Figura 3.16. Probetas para tracción P\_0.



Figura 3.17. Probetas para tracción P\_1.



Figura 3.18. Probetas para tracción P\_3.



Figura 3.19. Probetas para tracción P\_5.

### 3.5. Resistencia al Impacto (IZOD)

Los ensayos de impacto realizados muestran que el PET de referencia absorbió en promedio 0.086 J, estableciendo la línea base del material sin modificación. Con la adición de sargazo en bajas concentraciones (P\_1 y P\_3) se observaron mejoras claras en la energía absorbida, alcanzando un valor máximo de 0.109 J en 3 phr, lo que equivale a un incremento del 26 % respecto al PET puro. Esto sugiere que en pequeñas cantidades el sargazo puede actuar como un refuerzo moderado, favoreciendo mecanismos de disipación de energía como la desviación de grietas o la microdeformación en la interfaz partícula-matriz.

Al aumentar la concentración a P\_5, la energía absorbida disminuyó a 0.102 J. Este resultado refleja que el beneficio alcanzado en bajas proporciones se pierde cuando la carga de sargazo es mayor, probablemente debido a fenómenos de aglomeración y deficiente dispersión en la matriz de PET. Estas irregularidades generan puntos de inicio de fractura que reducen la tenacidad del material y provocan un comportamiento más frágil.

Este comportamiento coincide con lo reportado en otras investigaciones donde el PET se emplea como matriz polimérica reforzada con fibras naturales. Monti y colaboradores estudiaron compuestos de PET reciclado con fibra de vidrio y observaron que la resistencia al impacto medida con Izod mejoraba únicamente cuando se aseguraba una buena compatibilización entre matriz y refuerzo, mientras que en ausencia de ésta, el impacto se reducía (Monti y col., 2021). Por su parte, estudios con fibras de yute y sisal en matrices de PET muestran que la adición de bajas proporciones genera mejoras en la tenacidad, pero que contenidos más altos provocan una pérdida de ductilidad y la aparición de fracturas frágiles (Junio y col., 2025). De manera similar, Satyanarayana y colaboradores señalan que en biocompuestos con matrices termoplásticas existe siempre un rango óptimo de refuerzo, más allá del cual la fragilización predomina sobre la ganancia en resistencia (Satyanarayana y col. 2009). La Figura 3.20 presenta la resistencia al impacto de las mezclas de PET con sargazo a diferentes concentraciones, desde la muestra de referencia hasta P\_5. Se observa que el comportamiento mecánico sigue una tendencia similar a la descrita en la literatura, donde una cantidad moderada de refuerzo puede contribuir a una mejor absorción de energía antes de la fractura. No obstante, al incrementar el contenido de sargazo por encima del límite

óptimo, la cohesión interfacial disminuye, dando lugar a zonas débiles que facilitan la propagación de grietas. Esto sugiere que la compatibilidad entre el PET y el sargazo es un factor determinante para lograr un equilibrio entre rigidez y tenacidad. En consecuencia, un control adecuado del porcentaje de refuerzo y del tratamiento superficial del sargazo podría mejorar notablemente el desempeño mecánico de los compuestos desarrollados.

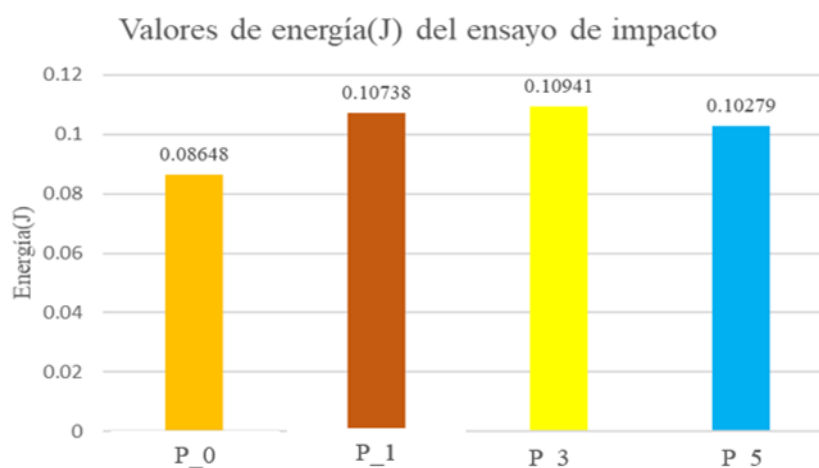


Figura 3.20 Resistencia al impacto para las mezclas de PET y sargazo a distintas concentraciones.

### 3.6. Análisis Dinámico Mecánico (DMA)

El Análisis Dinámico Mecánico (DMA) es una técnica ampliamente utilizada para estudiar el comportamiento viscoelástico de los polímeros y sus materiales compuestos, ya que permite evaluar la respuesta del material frente a sollicitaciones dinámicas en función de la temperatura o la frecuencia. Mediante este método es posible determinar parámetros fundamentales como el módulo de almacenamiento ( $E'$ ), que representa la rigidez y la capacidad del material para almacenar energía elástica de manera reversible; el módulo de pérdida ( $E''$ ), asociado a la energía disipada en forma de calor debido a los movimientos internos de las cadenas poliméricas; y el factor de pérdida ( $\tan \delta$ ), definido como la relación entre  $E''$  y  $E'$ , el cual permite identificar la transición vítrea ( $T_g$ ) y evaluar la calidad de la interacción entre la matriz y el refuerzo (Menard, 2008; Ferry, 1980).

En este trabajo, el análisis DMA se aplicó al PET puro (P\_0) y a sus compuestos con diferentes concentraciones de sargazo (P\_1, P\_3 y P\_5), con el objetivo de determinar cómo varía el comportamiento viscoelástico del material en función del contenido de carga. El estudio de estos parámetros permite establecer la efectividad del sargazo como refuerzo, así como identificar las condiciones en las que su incorporación contribuye a mejorar la rigidez, la disipación de energía y la adhesión interfacial en comparación con la matriz polimérica sin refuerzo (Abdul Khalil y col., 2012; He, 2021).

Durante los ensayos se observaron variaciones significativas en los valores de  $E'$  y  $\tan \delta$  con el incremento del contenido de sargazo, lo que evidencia la influencia directa del refuerzo sobre la movilidad molecular del PET. En particular, las muestras con bajo contenido de sargazo presentaron un aumento del módulo de almacenamiento, indicando una mayor rigidez del sistema y una mejor transferencia de esfuerzos entre la matriz y el refuerzo. En contraste, a concentraciones más elevadas, el exceso de partículas favoreció la aparición de heterogeneidades estructurales, lo que se reflejó en una mayor disipación de energía, un incremento del  $\tan \delta$  y una reducción del  $E'$ , comportamiento típico de compuestos con dispersión no homogénea del refuerzo (Yang, 2007; Menard, 2008).

La efectividad de los rellenos en materiales compuestos puede evaluarse mediante el coeficiente de efectividad (C), el cual se basa en la relación entre los módulos de almacenamiento en la región rígida y en la región viscosa del material. Este parámetro se expresa como:

$$C = \frac{(E_g'/E_r')_{Compuesto}}{(E_g'/E_r')_{Resina}} \quad \text{Ec.3.1}$$

donde  $E_r'$  corresponde al módulo de almacenamiento en la región rígida y  $E_g'$  al módulo de almacenamiento en la región viscosa. De acuerdo con lo reportado en la literatura, valores elevados de C indican una menor efectividad del relleno como refuerzo, ya que reflejan una

menor capacidad del material para mantener la rigidez relativa al pasar de la región vítrea a la región viscoelástica (Yang, 2007).

En este estudio, los módulos de almacenamiento empleados para el cálculo del coeficiente C se determinaron en el intervalo de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , seleccionando temperaturas ubicadas antes y después de la transición vítrea, la cual se identifica experimentalmente mediante el máximo de la curva de  $\tan \delta$ . Este procedimiento permitió analizar de manera comparativa la eficiencia del sargazo como fase de refuerzo en los compuestos de PET respecto al material sin carga.

Las Figuras 3.21, 3.22 y 3.23 muestran, respectivamente, la variación con la temperatura del módulo de almacenamiento ( $E'$ ), el módulo de pérdida ( $E''$ ) y el factor de disipación ( $\tan \delta$ ).

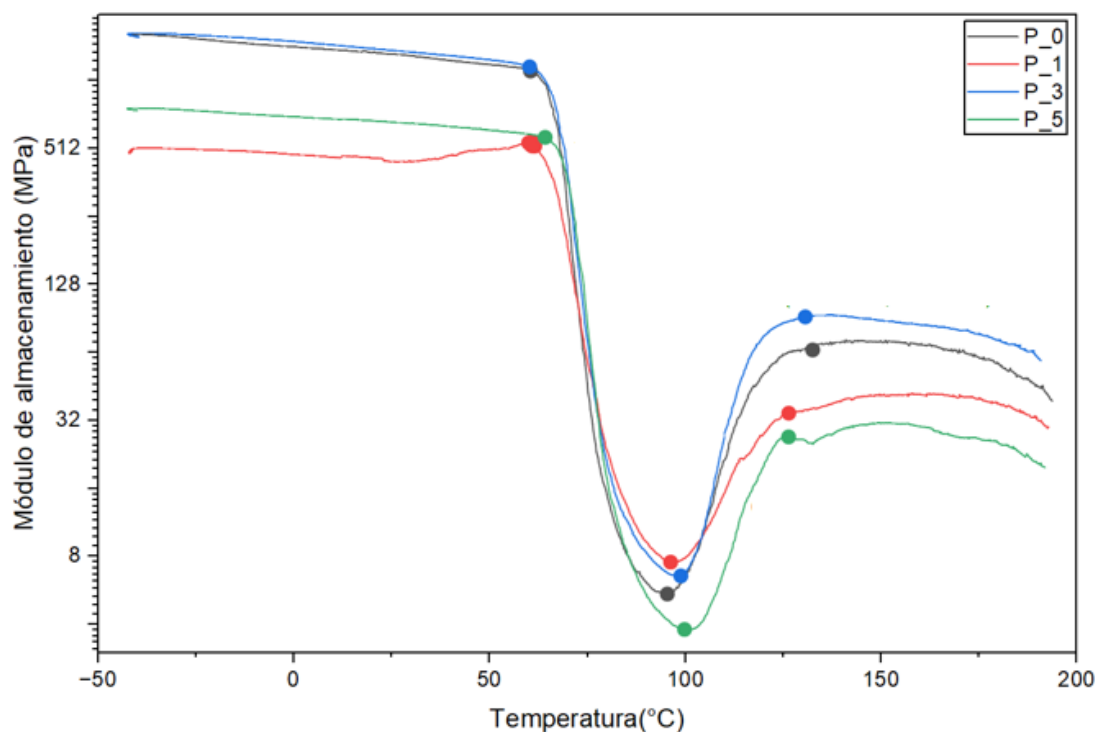


Figura 3.21. Termograma del DMA del módulo de almacenamiento vs Temperatura.

El análisis mecánico dinámico (DMA) permitió identificar con claridad las distintas regiones viscoelásticas del material en función de la temperatura, principalmente asociadas a la transición vítrea y a procesos estructurales posteriores. En la zona de transición, comprendida

entre 60 y 64 °C, todos los sistemas presentaron un máximo local o leve sobre impulso en el módulo de almacenamiento ( $E'$ ), inmediatamente antes de la caída pronunciada que caracteriza el inicio de la transición vítrea. Este comportamiento no corresponde a un pico amplio o definido, sino a una estabilización transitoria del módulo previa al ablandamiento progresivo del material.

En esta región, el material conserva una respuesta predominantemente elástica; sin embargo, comienza a manifestarse la movilidad segmentaria de las cadenas poliméricas asociada a la relajación  $\alpha$ . El sistema P\_3 alcanzó el valor más alto del módulo de almacenamiento (1176 MPa alrededor de 60 °C), seguido de P\_0 (1127 MPa en el mismo intervalo térmico), lo que sugiere que la incorporación de 3 phr de sargazo no solo preserva la rigidez inicial del material, sino que también favorece una mejor transferencia de esfuerzos entre la matriz polimérica y el refuerzo. En contraste, los sistemas P\_5 y P\_1 mostraron valores considerablemente menores (574 y 553 MPa, respectivamente, dentro del mismo intervalo de transición), lo que indica que concentraciones demasiado bajas o excesivas de refuerzo pueden generar discontinuidades estructurales, limitando la capacidad del material para almacenar energía elástica en esta etapa previa a la transición vítrea.

El incremento posterior del módulo de almacenamiento observado a temperaturas superiores a la transición vítrea puede atribuirse a la recristalización térmica del Polietileno tereftalato (PET), fenómeno ampliamente documentado por Awaja y Pavel (polymer researcher, 2005). Cuando el PET amorfo se calienta por encima de su  $T_g$ , la mayor movilidad molecular facilita la reorganización de las cadenas en estructuras cristalinas más ordenadas y estables, lo que produce una recuperación parcial de la rigidez mecánica. Este proceso, conocido como cristalización en frío, incrementa la fracción cristalina del material y se traduce en un aumento del módulo elástico aun después de que el polímero ha atravesado la transición vítrea.

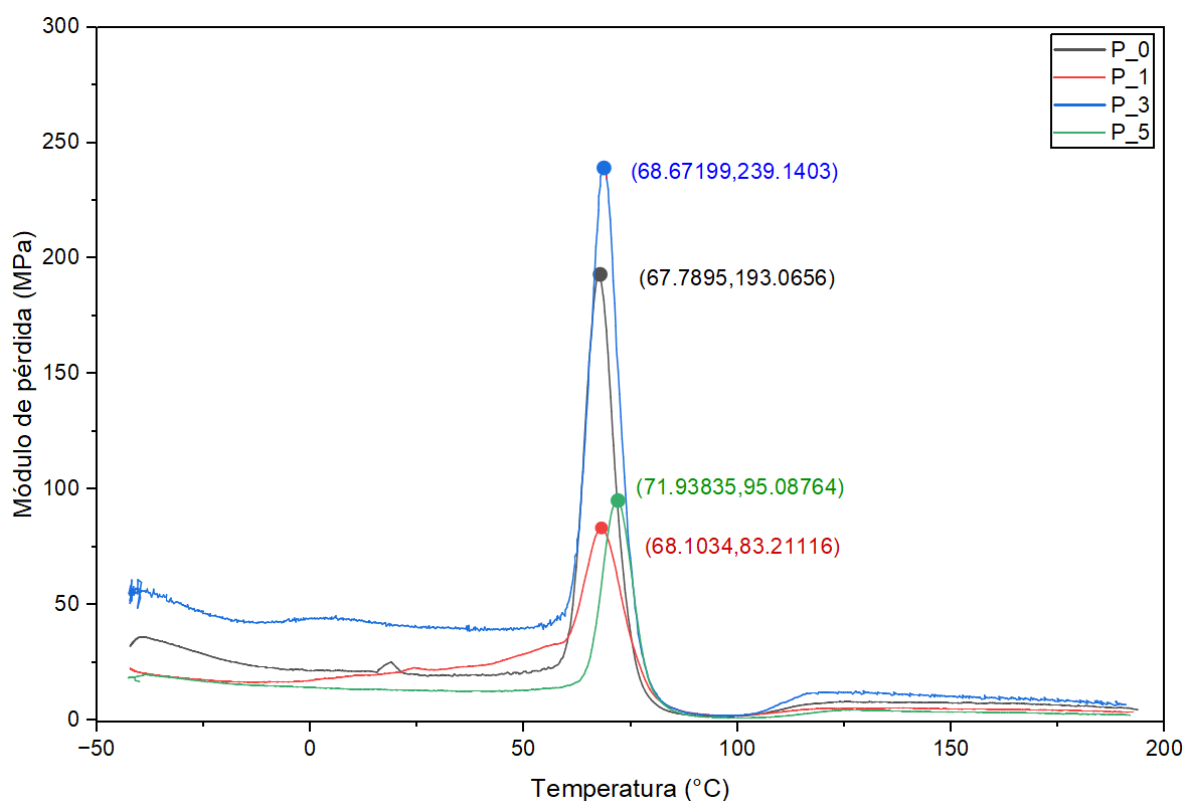


Figura 3.22. Termograma del DMA del módulo de pérdida vs Temperatura.

El análisis del módulo de pérdida ( $E''$ ) mostró diferencias notables en cómo el material disipa energía, dependiendo de la cantidad de sargazo presente.

En la zona del pico de  $E''$ , que se encuentra entre 68 y 72 °C, el sistema P\_3 destacó con el valor más alto (239 MPa a 69 °C), seguido por P\_0 (193 MPa a 68 °C). Estos hallazgos sugieren que hay una mayor fricción interna y una mejor capacidad para convertir energía mecánica en calor, lo que está relacionado con un control en la movilidad de las cadenas poliméricas. Por otro lado, los sistemas P\_5 y P\_1 mostraron valores mucho más bajos del módulo viscoso, alcanzando 95 MPa a 72 °C y 83 MPa a 68 °C, respectivamente.

Esta disminución indica que la eficiencia en la disipación de energía es menor, probablemente debido a una dispersión menos uniforme del refuerzo y a una interacción reducida entre la matriz y la fibra. En el caso de concentraciones altas de sargazo (P\_5), la posible

aglomeración de partículas puede limitar la deformación viscoelástica efectiva del material, restringiendo así la absorción de energía.

Lo que se ha observado respalda la idea de que añadir 3 phr de sargazo (P\_3) es la mejor opción para maximizar la capacidad de disipación de energía del sistema. Este efecto se debe a la interacción entre la matriz y la fibra, así como a la creación de microespacios interfaciales que facilitan la absorción de energía mecánica en cantidades específicas de refuerzo, promoviendo una distribución más equilibrada de las tensiones internas. Sin embargo, en concentraciones más altas, estos mecanismos se ven limitados por la acumulación de partículas y la formación de zonas de concentración de esfuerzo (Bahlouli y col., 2023).

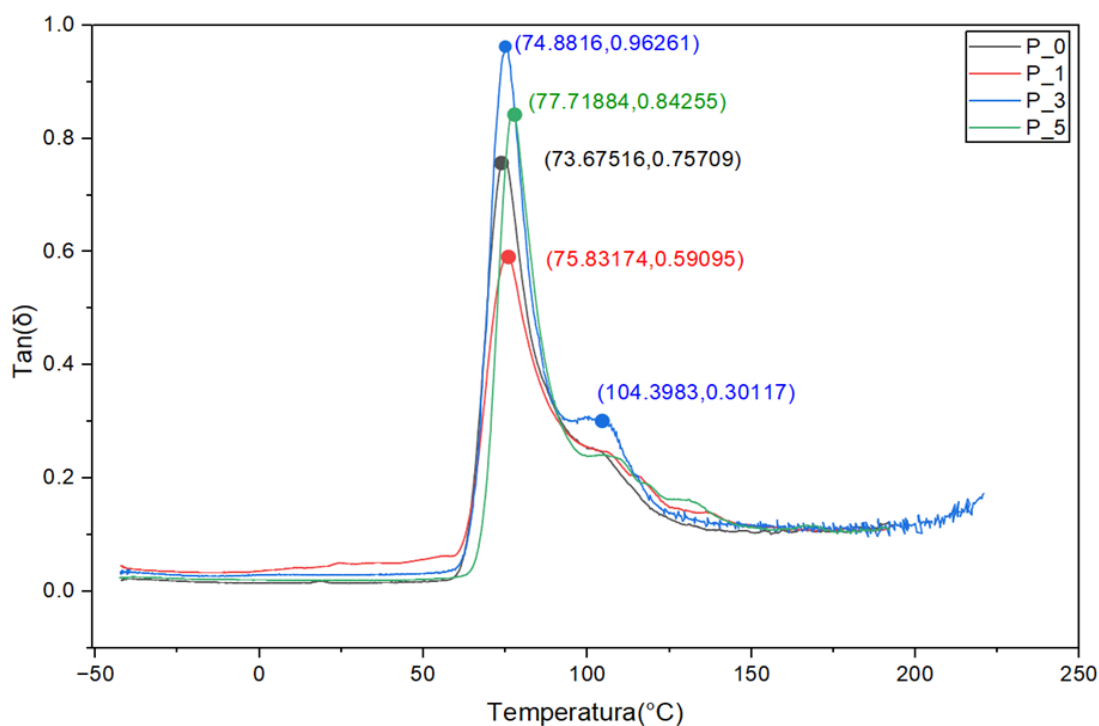


Figura 3.23. Termograma del DMA de la Tan( $\delta$ ) de los diferentes compuestos de PET con Sargazo.

El comportamiento del factor de amortiguamiento ( $\tan \delta$ ) en la región de transición vítrea evidencia cambios significativos en la movilidad molecular del PET reciclado al incorporar partículas de sargazo. En la muestra P\_0, el valor máximo de  $\tan \delta$  fue de 0.76, lo que indica que la matriz polimérica presenta una capacidad considerable de disipación de energía, asociada a la movilidad de sus cadenas macromoleculares en la fase amorfa.

En la muestra P\_1, el valor de  $\tan \delta$  disminuyó a 0.586, lo que sugiere una mayor restricción en la movilidad segmentaria. Esta reducción puede atribuirse a una interacción más eficiente entre la matriz y las partículas de sargazo, las cuales actúan como sitios de anclaje físico que limitan el movimiento de las cadenas poliméricas. Como consecuencia, se reduce la disipación viscoelástica y aumenta la rigidez del sistema, fenómeno común en compuestos termoplásticos reforzados con fibras naturales.

En la muestra P\_3, se observa un incremento notable de  $\tan \delta$  hasta 0.96, acompañado por la aparición de un hombro y un segundo pico de menor intensidad alrededor de 104 °C ( $\tan \delta \approx 0.3$ ). Este comportamiento indica la presencia de múltiples mecanismos de relajación viscoelástica dentro del material. La aparición del segundo pico puede asociarse a la heterogeneidad estructural generada por la incorporación del sargazo, el cual, al tratarse de un material lignocelulósico complejo (celulosa, hemicelulosa, lignina y componentes minerales), favorece la formación de regiones interfaciales con distintos grados de adhesión y restricción molecular.

En este contexto, el primer pico corresponde a la transición vítrea (relajación  $\alpha$ ) del PET, mientras que el segundo puede atribuirse a relajaciones secundarias asociadas a zonas interfaciales, dominios menos cristalinos o regiones con diferente densidad de empaquetamiento molecular. Este tipo de respuesta ha sido reportado en compuestos de PET y otros polímeros reforzados con fibras lignocelulósicas, donde la presencia del refuerzo introduce heterogeneidad microestructural y múltiples mecanismos de disipación energética, detectables mediante análisis mecánico dinámico (DMA) (Neto y col., 2021).

Además, la mayor intensidad del  $\tan \delta$  en P\_3 sugiere que esta formulación presenta una combinación óptima entre movilidad molecular y fricción interfacial, lo que favorece la disipación de energía. La coexistencia de regiones con buena adhesión y otras con menor restricción genera una respuesta viscoelástica más compleja y eficiente.

Por otro lado, en P\_5 el valor de  $\tan \delta$  disminuye a 0.848, lo que sugiere un equilibrio entre la restricción de la movilidad y la capacidad de disipación de energía. A mayores concentraciones de sargazo, aumenta la fracción de fase rígida, lo que limita nuevamente la

movilidad segmentaria del PET; sin embargo, aún persisten regiones capaces de absorber y disipar energía mecánica.

El análisis de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) respalda estas observaciones. La muestra P\_0 presenta una  $T_g$  de 74.09 °C, mientras que en P\_1 aumenta a 76.35 °C, confirmando que la incorporación inicial de sargazo incrementa la rigidez del sistema al restringir el movimiento molecular. En P\_3, la  $T_g$  disminuye ligeramente a 75.47 °C, lo que puede relacionarse con una dispersión menos homogénea del refuerzo y la presencia de dominios con mayor movilidad relativa. Finalmente, P\_5 alcanza la  $T_g$  más alta (77.02 °C), indicando que el incremento en la concentración de partículas lignocelulósicas refuerza la restricción segmentaria del PET, tal como se ha documentado en compuestos termoplásticos reforzados con fibras naturales (Gudayu, 2021).

Estos resultados son coherentes con el coeficiente de efectividad de relleno ( $C$ ). En P\_1, el valor de  $C = 0.73$ , inferior a la unidad, indica una mejor eficiencia relativa del sistema PET/sargazo, ya que el material conserva de manera más estable su rigidez al pasar de la región vítrea a la región viscoelástica. En contraste, P\_3 y P\_5 presentaron valores superiores a la unidad,  $C = 1.16$  y  $C = 1.08$ , respectivamente, lo que sugiere una menor efectividad del relleno y una mayor heterogeneidad estructural. Por lo tanto, aunque P\_3 mostró los valores más altos de módulo de almacenamiento y  $\tan \delta$ , este comportamiento debe interpretarse como una mayor rigidez y disipación de energía, pero no necesariamente como una mayor eficiencia global del refuerzo (Yang et al., 2007).

En este sentido, P\_3 puede considerarse la formulación con mayor respuesta dinámica en términos de rigidez y amortiguamiento, mientras que P\_1 representa la formulación más equilibrada desde el punto de vista viscoelástico, debido a su menor coeficiente de efectividad de relleno y a una respuesta más estable respecto al PET reciclado sin refuerzo. Este comportamiento sugiere que bajas concentraciones de sargazo favorecen una mejor integración física con la matriz, mientras que concentraciones mayores pueden promover regiones heterogéneas, fricción interfacial excesiva y posibles aglomeraciones de partículas (Aragón Vallejo, 2023).

En la tabla 3.2 se resumen los resultados obtenidos mediante análisis mecánico dinámico para los compuestos P\_0, P\_1, P\_3 y P\_5, incluyendo la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), el factor de amortiguamiento ( $\tan \delta$ ), los módulos de almacenamiento ( $E'$ ) y de pérdida ( $E''$ ), así como el coeficiente de efectividad de relleno (C). Estos parámetros permiten comprender integralmente la evolución del comportamiento viscoelástico del sistema PET/sargazo y confirman que el efecto del refuerzo depende directamente de su concentración y dispersión dentro de la matriz polimérica.

Tabla 3.2 Parámetros reológicos de compuesto, PET/Sargazo determinando coeficiente de efectividad.

| Compuesto | Tg(°C) | Tan( $\delta$ ) | Módulo de almacenamiento $E'$ (MPa) | Módulo de pérdida $E''$ (MPa) | Coeficiente |
|-----------|--------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| P_0       | 73     | 0.83            | 66.57                               | 55.26                         | 1.00        |
| P_1       | 75     | 0.59            | 50.40                               | 30.21                         | 0.72        |
| P_3       | 74     | 0.96            | 72.89                               | 70.17                         | 1.16        |
| P_5       | 77     | 0.84            | 32.08                               | 28.80                         | 1.08        |

### 3.7. Índice de fluidez (MFI)

El PET reciclado sin refuerzo (P\_0) mostró un MFI de 22.0 g/10 min. Esto indica que, a pesar de haber pasado por un proceso térmico previo, conserva una estructura molecular con un grado de degradación controlado. Según Awaja y Pavel (2005), los procesos de reciclaje alteran la arquitectura molecular del PET a través de reacciones de degradación térmica y oxidativa, lo que afecta su viscosidad y, por lo tanto, sus propiedades reológicas. Al incorporar partículas de sargazo como refuerzo, se nota una disminución progresiva del MFI:

17.6 g/10 min para P\_1, 4.1 g/10 min para P\_3 y 3.6 g/10 min para P\_5. Este comportamiento es coherente con lo que se ha observado en compuestos poliméricos reforzados con cargas naturales particuladas, donde un aumento en la fracción de refuerzo limita la movilidad de las cadenas poliméricas y eleva la viscosidad aparente del sistema (Bledzki y Gassan, 1999). La similitud entre los valores obtenidos para P\_3 y P\_5 sugiere que, a partir de cierta concentración de refuerzo, se alcanza un umbral crítico que restringe la movilidad molecular. Más allá de este punto, aumentar la cantidad de partículas no genera una disminución significativa adicional en la fluidez. Esta tendencia puede relacionarse con la formación de una estructura tipo red o un fenómeno de percolación de las partículas de sargazo dentro de la matriz polimérica, lo que limita el flujo del material fundido y ayuda a estabilizar la viscosidad del compuesto. Este comportamiento es común en sistemas compuestos con cargas particuladas, especialmente cuando se supera una concentración crítica (Li y col., 2020). En el caso específico del sargazo, sus componentes lignocelulósicos y su naturaleza rígida actúan como una fase dispersa dentro de la matriz de PET, funcionando como barreras físicas que dificultan el flujo del material fundido. Esto ha sido documentado en estudios recientes sobre la incorporación de cargas vegetales particuladas en matrices termoplásticas (Alavi y col., 2021). La notable disminución del índice de fluidez (MFI) en concentraciones superiores a P\_1 se puede atribuir también a interacciones físicas adicionales, como la aglomeración de partículas y un aumento en la fricción interna, lo que a su vez incrementa la resistencia al flujo. Este aspecto es fundamental al momento de optimizar parámetros de procesamiento, como la temperatura, la presión de inyección o las condiciones de extrusión. En la Tabla 3.3, se presentan los valores del índice de fluidez para los compuestos de PET que han sido reforzados con partículas de sargazo.

Tabla 3.3 Índice de fluidez de los materiales compuestos de PET con sargazo.

| Material | MFI (g/10 min) |
|----------|----------------|
| P_0      | 22.0           |
| P_1      | 17.6           |
| P_3      | 4.1            |
| P_5      | 3.6            |

### 3.8. Microscopía Óptica

La microscopía óptica permitió evaluar la morfología superficial de los compuestos y analizar la distribución de las partículas de sargazo dentro de la matriz de PET reciclado, así como determinar el grado de homogeneidad en la dispersión y la presencia de defectos estructurales como vacíos o aglomeraciones. Este tipo de análisis es fundamental en materiales compuestos, ya que la calidad de la dispersión del refuerzo influye directamente en las propiedades mecánicas y térmicas del sistema (Mittal, 2014; Fu y col., 2008).

En la muestra P\_0, correspondiente al PET reciclado sin refuerzo, se observa una matriz continua con la presencia de posibles impurezas o irregularidades superficiales. Estas características son comunes en polímeros reciclados debido a la posible degradación térmica, contaminación residual o variaciones en el procesamiento, lo cual puede generar defectos microscópicos en la estructura (Al-Salem y col., 2009).

Para el compuesto P\_1, se identifica claramente una fase continua correspondiente a la matriz de PET y una fase discontinua asociada a las partículas de sargazo. No obstante, se aprecia una homogenización limitada atribuida a una dispersión parcial del refuerzo. Aunque el número de aglomerados es bajo, se observan pequeños agrupamientos localizados, lo cual coincide con lo reportado por Fu y col. (2008), quienes señalan que a bajas concentraciones

de carga puede existir una dispersión aceptable, aunque no completamente uniforme, dependiendo de la compatibilidad interfacial.

En la muestra P\_3, el fenómeno de aglomeración se vuelve más evidente, mostrando agrupamientos de partículas distribuidos en diferentes regiones de la matriz polimérica. Este comportamiento está relacionado con el incremento en la interacción partícula-partícula a medida que aumenta el contenido de refuerzo, lo que dificulta su dispersión homogénea y puede generar concentradores de esfuerzo (Nabi Saheb y Jog, 1999).

Finalmente, en el compuesto P\_5 se observa una mayor cantidad de aglomerados y una disminución en la uniformidad de la distribución del sargazo. Este aumento en la aglomeración indica una reducción en la eficiencia de dispersión y una mayor interacción física entre partículas, fenómeno ampliamente documentado en compuestos con altas fracciones de fibras naturales, donde la falta de compatibilización favorece la formación de defectos estructurales y vacíos interfaciales (Pickering y col., 2016; Kabir y col., 2012).

Las figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27 presentan las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica de los compuestos elaborados a partir de PET reciclado con diferentes concentraciones de sargazo, evidenciando los cambios morfológicos asociados al incremento del contenido de refuerzo y su impacto en la homogeneidad del sistema.



Figura 3.24. Microscopía de la muestra P\_0.



Figura 3.25. Microscopía de la muestra P\_1.



Figura 3.26. Microscopía de la muestra P\_3.

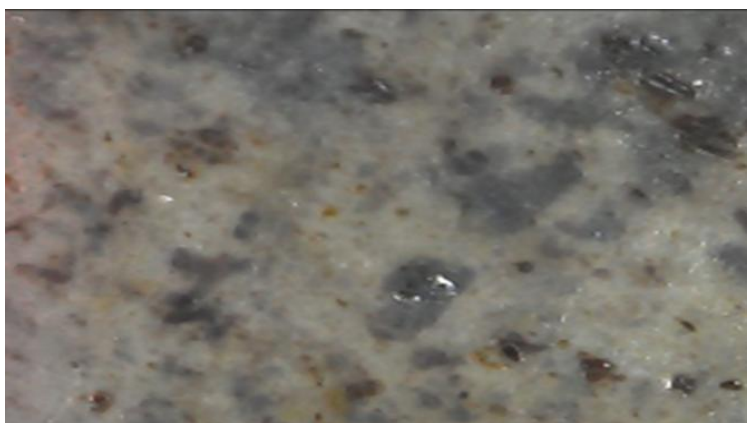


Figura 3.27. Microscopía de la muestra P\_5.

### 3.9. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Las figuras 3.28 a 3.31 muestran las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de los materiales correspondientes a las muestras P\_0, P\_1, P\_3 y P\_5, analizadas a diferentes aumentos ( $250\times$ ,  $500\times$  y  $1000\times$ ). El objetivo de este análisis es evaluar la morfología superficial y la distribución del refuerzo dentro de la matriz polimérica, así como su relación con el comportamiento mecánico de los compuestos.

En el caso del material P\_0 (Figura 3.28), correspondiente al PET sin refuerzo, se observa una morfología superficial heterogénea, caracterizada por la presencia de zonas rugosas y defectos. Estas irregularidades pueden asociarse a la presencia de microvacíos y discontinuidades generadas durante el reprocesamiento del polímero reciclado. De acuerdo con lo reportado por Awaja y Pavel (2005) y George y col. (2012), este tipo de morfología es común en polímeros reciclados y se relaciona con un comportamiento frágil, debido a la limitada capacidad del material para disipar esfuerzos. Esto concuerda con los resultados mecánicos obtenidos, donde el material presenta resistencia moderada pero baja ductilidad.

En cuanto a la muestra P\_1 (Figura 3.29), las micrografías evidencian una mejora notable en la morfología superficial. A  $250\times$  (Figura 3.29a), se identifican partículas de sargazo dispersas dentro de la matriz; a  $500\times$  (Figura 3.29b), la superficie se observa más homogénea, y a  $1000\times$  (Figura 3.29c) se aprecia una adecuada integración del refuerzo. Esta buena

dispersión sugiere una interacción física efectiva entre la matriz y el sargazo. Según Faruk y col. (2012) y Petchwattana y Covavisaruch (2014), una distribución uniforme del refuerzo favorece la transferencia de esfuerzos en compuestos con fibras naturales. En este sentido, la microestructura observada en P\_1 explica que esta formulación conserve propiedades mecánicas cercanas al PET reciclado, tal como se reporta en los ensayos de tracción de este trabajo.

Para el compuesto P\_3 (Figura 3.30), las micrografías revelan cambios morfológicos importantes. A 250× (Figura 3.30a), se observa una superficie relativamente homogénea, pero con la presencia de grietas, las cuales pueden atribuirse a tensiones internas o a una deficiente adhesión interfacial. A 500× (Figura 3.30b), estos defectos persisten, mientras que a 1000× (Figura 3.30c) se identifican zonas quebradizas y una menor evidencia de dispersión del refuerzo. Este comportamiento es característico de compuestos con mayor contenido de carga, donde la interacción matriz-refuerzo se vuelve menos eficiente. De acuerdo con Mohanty y col. (2005), la pobre compatibilidad interfacial en compuestos con fibras naturales favorece la formación de defectos y la propagación de grietas. En consecuencia, estas características microestructurales se relacionan directamente con la disminución en la resistencia mecánica y el aumento en la rigidez observados en esta formulación.

Finalmente, las micrografías correspondientes a la muestra P\_5 (Figura 3.31) muestran una morfología más deteriorada en comparación con las demás formulaciones. A 250× (Figura 3.31a), se observa una superficie relativamente lisa; sin embargo, a mayores aumentos (Figuras 3.31b y 3.31c) se evidencian rugosidades, aglomeraciones de sargazo y defectos estructurales. La alta concentración de refuerzo favorece la formación de aglomerados y vacíos, lo cual reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado por Bledzki y Gassan (1999) y Pickering y col. (2016), quienes señalan que el incremento en la fracción de fibras naturales puede deteriorar las propiedades mecánicas cuando no existe una adecuada compatibilización. En este caso, la microestructura observada explica la disminución significativa en la resistencia a la tracción y el comportamiento más frágil del material.

En conjunto, el análisis morfológico mediante SEM confirma que existe una relación directa entre la calidad de la dispersión del refuerzo, la adhesión interfacial y el desempeño mecánico

de los compuestos. Mientras que bajas concentraciones de sargazo (P\_1) favorecen una mejor integración y permiten conservar propiedades mecánicas adecuadas, contenidos mayores (P\_3 y P\_5) promueven la formación de defectos estructurales, aglomeraciones y fallas interfaciales que actúan como concentradores de esfuerzo, deteriorando el comportamiento mecánico del material. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura para compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales (Faruk et al., 2012; Pickering y col., 2016).

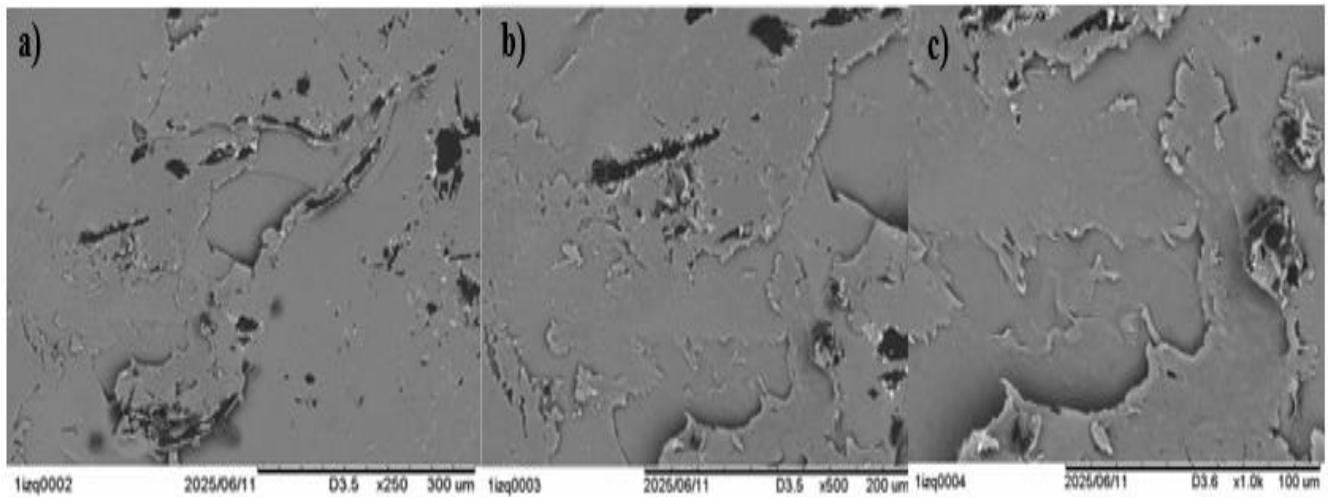


Figura 3.28. Imágenes SEM de la muestra P\_0: a) aumento de 250 X, b) aumento de 500 X y c) aumento de 1000 X.

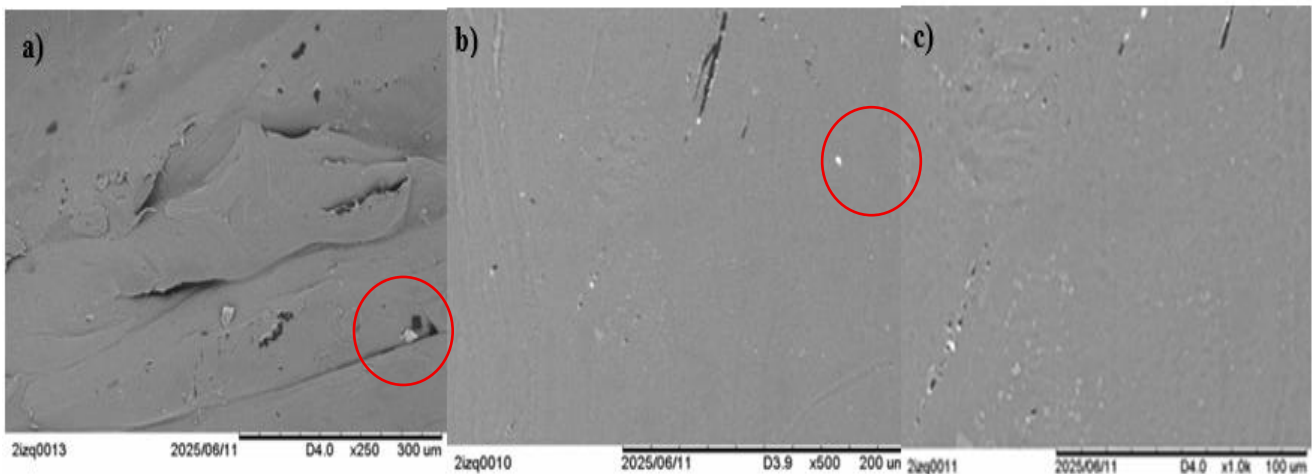


Fig 3.29. Imágenes SEM de la muestra P\_1: a) aumento de 250 X, b) aumento de 500 X y c) aumento de 1000 X.

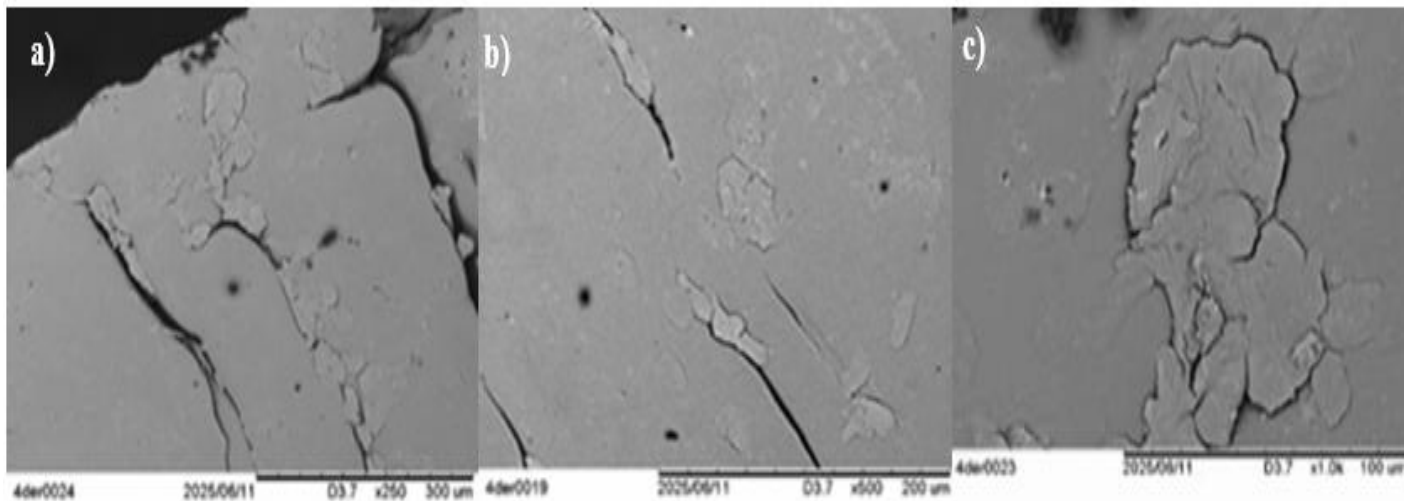


Figura 3.30. Imágenes SEM de la muestra P\_3: a) aumento de 250 X, b) aumento de 500 X y c) aumento de 1000 X.

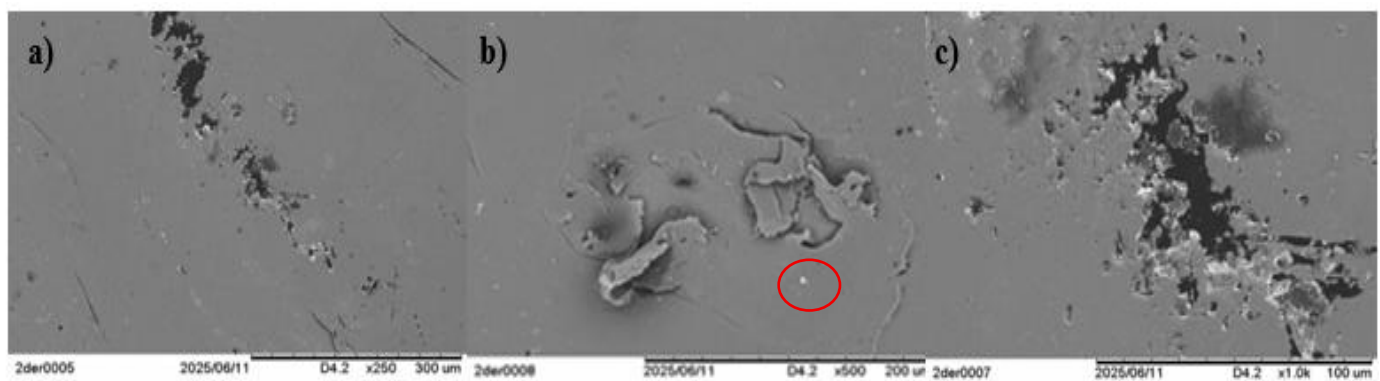


Figura 3.31. Imágenes SEM de la muestra P\_5: a) aumento de 250 X, b) aumento de 500 X y c) aumento de 1000 X.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrollaron compuestos de PET reciclado reforzados con partículas de sargazo en diferentes concentraciones, con el propósito de evaluar su comportamiento estructural, térmico, reológico, morfológico y mecánico para su posible aplicación en manufactura aditiva. Las formulaciones analizadas fueron P\_0, correspondiente al PET reciclado sin refuerzo, y P\_1, P\_3 y P\_5, correspondientes a los

compuestos con incorporación progresiva de sargazo. A partir de las caracterizaciones realizadas mediante FTIR, TGA, DSC, DMA, MFI, microscopía óptica, SEM y ensayos mecánicos de tracción e impacto, fue posible establecer una relación directa entre el contenido de sargazo, la dispersión del refuerzo y el desempeño final del material.

Mediante el análisis FTIR se confirmó la presencia de los grupos funcionales característicos del PET reciclado, principalmente aquellos asociados a los enlaces C=O, C–O y C–H. La incorporación de sargazo en las formulaciones P\_1, P\_3 y P\_5 no generó nuevas bandas significativas, por lo que se concluye que la interacción entre la matriz polimérica y el refuerzo natural fue principalmente de tipo físico. Esto indica que el sargazo actuó como una fase dispersa dentro del PET reciclado, sin modificar de manera considerable la estructura química principal del polímero.

Los resultados obtenidos por TGA y DTG evidenciaron que el PET reciclado sin refuerzo presentó la mayor estabilidad térmica, con una degradación principal ubicada aproximadamente entre 450 °C y 500 °C. Al aumentar el contenido de sargazo se observó una ligera disminución en la temperatura de degradación, atribuida a la naturaleza orgánica del refuerzo y a la descomposición de sus componentes lignocelulósicos. Sin embargo, también se presentó un incremento en el residuo final, relacionado con el contenido mineral propio del sargazo. Estos resultados permiten concluir que el refuerzo natural influye en la estabilidad térmica del compuesto, aunque en bajas concentraciones no compromete significativamente su procesamiento.

A través del análisis DSC se identificaron cambios menores en las temperaturas de cristalización y fusión del PET reciclado con la incorporación de sargazo. Estas variaciones sugieren que las partículas del refuerzo pueden influir en el ordenamiento de las cadenas poliméricas durante el enfriamiento del material. No obstante, dichos cambios no impidieron la obtención de filamentos ni la fabricación de probetas por impresión 3D, por lo que los compuestos conservaron una ventana de procesamiento adecuada.

En cuanto al comportamiento mecánico, los ensayos de tracción mostraron que la formulación P\_1 mantuvo propiedades cercanas al PET reciclado sin refuerzo, con una resistencia aceptable y una ligera disminución en la elongación. En contraste, las

formulaciones P\_3 y P\_5 presentaron una reducción más evidente en la resistencia mecánica y en la capacidad de deformación. Este comportamiento se relaciona con una menor compatibilidad interfacial entre el PET y el sargazo, así como con la posible formación de aglomerados conforme aumenta la cantidad de partículas incorporadas.

Los resultados de resistencia al impacto confirmaron esta tendencia, ya que el incremento del contenido de sargazo redujo la capacidad del material para absorber energía antes de fracturarse. Esto indica que concentraciones elevadas de refuerzo pueden generar zonas de concentración de esfuerzos, discontinuidades internas y una respuesta más frágil del compuesto. Por ello, el uso de sargazo debe mantenerse en proporciones controladas para evitar una disminución considerable de la tenacidad del material.

El análisis dinámico mecánico permitió complementar la interpretación del comportamiento térmico-mecánico de los compuestos. Las variaciones en el módulo de almacenamiento, módulo de pérdida,  $\tan \delta$  y temperatura de transición vítrea evidenciaron que el contenido de sargazo modifica la rigidez, la movilidad molecular y la capacidad de disipación de energía del PET reciclado. En este sentido, la formulación P\_3 presentó una respuesta destacada en parámetros específicos, principalmente en rigidez y amortiguamiento, debido a sus valores más altos de módulo de almacenamiento y  $\tan \delta$ . Sin embargo, este comportamiento no debe interpretarse de manera aislada como el mejor desempeño global del material, ya que una mayor capacidad de disipación de energía también puede estar asociada con mayor fricción interfacial, heterogeneidad estructural y distribución menos homogénea del refuerzo.

Por otra parte, la formulación P\_1 mostró el comportamiento más equilibrado desde el punto de vista viscoelástico, al presentar una respuesta más estable y un menor coeficiente de efectividad de relleno. Esto sugiere una mejor integración física entre el PET reciclado y las partículas de sargazo a baja concentración. Por lo tanto, P\_3 puede considerarse relevante cuando se buscan propiedades dinámico-mecánicas específicas, mientras que P\_1 representa la formulación más adecuada desde una perspectiva integral.

El índice de fluidez permitió relacionar la incorporación de sargazo con la procesabilidad del PET reciclado en estado fundido. Las variaciones observadas en el MFI indican que el refuerzo natural modifica la viscosidad del material, aspecto importante durante la extrusión

de filamentos y la impresión 3D. La formulación P\_1 presentó un comportamiento más favorable para el procesamiento, mientras que contenidos mayores de sargazo pueden dificultar la homogeneidad del flujo y favorecer irregularidades durante la fabricación del filamento.

Las observaciones mediante microscopía óptica y SEM corroboraron los resultados obtenidos en las pruebas térmicas, reológicas y mecánicas. La muestra P\_0 presentó una matriz más homogénea, mientras que P\_1 mostró una dispersión relativamente adecuada de las partículas de sargazo. Por el contrario, P\_3 y P\_5 evidenciaron mayor presencia de aglomerados, zonas de acumulación y posibles defectos interfaciales. Estas características morfológicas explican la disminución de la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto y la estabilidad mecánica observada en las formulaciones con mayor contenido de refuerzo.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el sargazo constituye un refuerzo natural viable para el PET reciclado cuando se emplea en bajas concentraciones. Dentro del rango estudiado, la formulación P\_1 mostró el mejor equilibrio entre estabilidad térmica, comportamiento mecánico, respuesta viscoelástica, morfología y procesabilidad. Aunque P\_3 presentó una respuesta destacada en el análisis DMA, principalmente en rigidez y capacidad de amortiguamiento, el incremento en el contenido de refuerzo favoreció la aparición de heterogeneidades, posible aglomeración de partículas y defectos interfaciales que limitaron el desempeño global del material.

Por lo tanto, la incorporación controlada de sargazo en bajas proporciones representa una alternativa sostenible para la fabricación de biocompuestos aplicables en manufactura aditiva y en componentes de baja exigencia estructural. Además, esta propuesta contribuye al fortalecimiento de estrategias de economía circular mediante la valorización simultánea de residuos plásticos y biomasa marina, promoviendo el desarrollo de materiales compuestos sostenibles con potencial aplicación en impresión 3D.

## 5. Bibliografía

Abdul Khalil, H. P. S., Bhat, A. H., & Yusra, A. F. I. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 963–979. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>

Alavi, N., Zare, D., & Naderi, G. (2021). Properties and applications of PET: A comprehensive review. *Journal of Polymer Science*, 59(7), 1221–1235. <https://doi.org/10.1002/pol.2021>

Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of PET. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.001>

Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>

Aragón Vallejo, J. D. (2023). *Estudio de la modificación química de partículas de sargazo para uso como modificador de una matriz de polipropileno* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero].

Araujo, R. G., et al. (2022). Polymeric composite reinforced with PET fiber waste for civil-construction coating elements. *Polymers*, 14(7), 1293. <https://doi.org/10.3390/polym14071293>

Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>

Badía, J. D., Strömberg, E., Ribes-Greus, A., & Karlsson, S. (2012). The role of crystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in recycled PET. *Polymer Degradation and Stability*, 97(1), 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.008>

Barajas, F. (2014). *Estudio del efecto de procesamiento y la extensión de cadena sobre las propiedades reológicas y mecánicas del PET* [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada].

Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose-based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)

Brydson, J. A. (2017). *Plastics materials* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

Caballero Vázquez, J. A., & Acosta González, G. (2020). *Impactos del sargazo en el Caribe Mexicano y estrategias de manejo*. SEMARNAT.

Chaturvedi, E., Rajput, N. S., Upadhyaya, S., & Pandey, P. (2017). Experimental study and mathematical modeling for extrusion using high-density polyethylene. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1670–1676. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.006>

Colthup, N. B., Daly, L. H., & Wiberley, S. E. (1990). *Introduction to infrared and Raman spectroscopy* (3rd ed.). Academic Press.

Cruz-Estrada, R. H., Cupul-Manzano, C. V., & Rodríguez, I. F. H. (2020). Obtención de un compuesto con sargazo y plástico recuperado. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/344619715>

Desrochers, A., Cox, S.-A., Oxenford, H. A., & van Tussenbroek, B. (2020). *Sargassum uses guide*. FAO & CERMES.

ECOCE, A.C. (2023). *Informe anual sobre el manejo del PET en México*. <https://www.ecoce.org.mx/informes>

Escobar, S., García, H., & López, A. (2021). Chemical composition and potential applications of *Sargassum* as a biorefinery feedstock. *Marine Drugs*, 19(4), 203. <https://doi.org/10.3390/md19040203>

- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Ferreira, E. S., et al. (2022). Thermal behavior of PET–biocomposite systems. *Polymers*, 14(11), 2338. <https://doi.org/10.3390/polym14112338>
- Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). Wiley.
- Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, interface adhesion and loading on polymer composites. *Composites Part B*, 39(6), 933–961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>
- Goh, G. D., & Xiong, L. (2021). Advancements in 3D printing of thermoplastic composites. *Materials & Design*, 198, 109343. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109343>
- Herrera-Franco, P. J., Valadez-González, A., & Fuentes-Talavera, F. J. (2020). Propiedades térmicas y mecánicas de compuestos con fibras naturales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 783–800. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2926>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on natural fibre reinforced composites. *Composites Part B*, 43(7), 2883–2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Kačuráková, M., & Wilson, R. H. (2001). Developments in FTIR spectroscopy of carbohydrates. *Carbohydrate Polymers*, 44(4), 291–303. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00230-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00230-1)
- Kumar, S., Singh, P., & Kumar, R. (2019). Polyethylene terephthalate: Properties, applications, and recycling. *Environmental Science & Technology*, 53(15), 8798–8815. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01520>

Menard, K. P. (2008). *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction* (2nd ed.). CRC Press.

Menard, K. P. (2016). *Handbook of dynamic mechanical analysis*. CRC Press.

Milledge, J. J., & Harvey, P. J. (2016). Golden tides: Valorisation of *Sargassum*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60. <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). Natural fibre composites: A review. *Composites Part A*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>

Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion* (5th ed.). Hanser.

Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers. *Progress in Polymer Science*, 34(9), 982–1021. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002>

Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). Melt extrusion additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192–204. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>

Ward, I. M., & Sweeney, J. (2012). *Mechanical properties of solid polymers* (3rd ed.). Wiley.

Zhou, Y., Zhao, G., & Cheng, Y. (2021). Advances in PET recycling technologies. *Materials Today*, 47, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.04.012>