



**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 DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE COMPUESTOS  
REFORZADOS CON PARTÍCULAS DE SARGAZO Y SBS CON DIFERENTE  
CONTENIDO DE VINILOS**

Que para obtener el Grado de:  
**Maestra en Ciencias en Ingeniería Química**

Presenta:

**Ing. Jessica Lizeth García Castañeda**  
**G13071761**  
**No. CVU de CONACyT: 1106149**

Directora de Tesis:

**Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz**  
**No. CVU de CONACyT: 269016**

Co director de Tesis:

**Dr. Gabriel Hernández Zamora**

Ciudad Madero, Tamaulipas, 19/mayo/2023

Oficio No.: U.055/2023

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**C. JESSICA LIZETH GARCÍA CASTAÑEDA**  
**No. DE CONTROL G13071761**  
**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 Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**“EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS DE SARGAZO Y SBS CON DIFERENTE CONTENIDO DE VINILOS”**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

|                     |      |                              |
|---------------------|------|------------------------------|
| PRESIDENTA:         | DRA. | BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ |
| SECRETARIO:         | DR.  | GABRIEL HERNÁNDEZ ZAMORA     |
| VOCAL:              | DR.  | JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA     |
| SUPLENTE:           | DRA. | ANA BEATRIZ MORALES CEPEDA   |
| DIRECTORA DE TESIS: | DRA. | BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ |
| CO-DIRECTOR:        | DR.  | GABRIEL HERNÁNDEZ ZAMORA     |

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación 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"*

**MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p.- Archivo  
MACG 'NPDZ'



## AGRADECIMIENTOS

---

A Dios por concederme la dicha de estar cumpliendo una de mis más grandes metas profesionales. A mis padres por su amor y sobre todo su apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, todo siempre es por y para ustedes.

A mi directora de tesis, la Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz por su guía, apoyo, paciencia, consejos y todas las enseñanzas que me ha dado no solo para la realización de esta tesis sino también para la vida, ha sido un honor para mí haber formado parte de su equipo de trabajo.

Gracias a mi comité tutorial conformado por Dr. Gabriel Hernández Zamora, Dr. José Luis Rivera Armenta y la Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda por las observaciones y aportaciones a mi trabajo, a mis profesores de posgrado y a la coordinadora, la Dra. Nancy Patricia Díaz Zavala por su ayuda en cada una de las situaciones que como estudiante se me presentaron; gracias a mis compañeros en especial a mis amigos Eric y Rivaldo con quienes compartí momentos y experiencias que me llevo por siempre en mi memoria.

Mi reconocimiento a la empresa Dynasol por la donación del material con la que se realizó este estudio, así como por el apoyo para las pruebas de índice de fluidez, dureza Shore A y abrasión. También mi agradecimiento a la Maestra Ana Cecilia Espíndola y al CICATA Unidad Altamira por el apoyo con el equipo para la realización de pruebas tensiles

Por último, agradezco al CONACYT, por el apoyo económico que me permitió ser parte del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

## RESUMEN

---

En este estudio se plantea la posibilidad de utilizar el alga Sargazo, como refuerzo para compuestos con matrices SBS de diferente contenido de vinilos, para el estudio de sus propiedades viscoelásticas.

El alga se recolecta de las costas de la Playa Miramar, Cd. Madero, Tamps, para posteriormente ser tratada mediante lavado y tamizado hasta obtener partículas de tamaño de 177 micras. Los compuestos se llevan a cabo mediante extrusión en una cámara de mezclado a condiciones de procesamiento de 100°C a una velocidad de 60 rpm y un tiempo de mezclado de 15 minutos. Se utiliza aceite Nafténico como ayudante en el procesamiento de los compuestos.

Los compuestos son caracterizados mediante Espectrofotometría de Transformada de Fourier (FTIR), Análisis Termogravimétrico (TGA), pruebas mecánicas de tensión, Análisis Dinámico Mecánica (DMA), microscopía óptica, pruebas de envejecimiento, índice de fluidez, abrasión y dureza shore A.

Las caracterizaciones demuestran que se obtiene una buena compatibilidad entre la matriz y el refuerzo. El mejor comportamiento en propiedades mecánicas se presenta en formulaciones con menores relaciones de partículas de sargazo.

La variación de la cantidad de vinilos influye en las propiedades del material compuesto ya que en general se observan mejores resultados en los compuestos obtenidos con la matriz de bajo contenido de vinilos en comparación a la matriz con alto contenido de vinilos.

## ABSTRACT

---

In this study, the possibility of using Sargazo seaweed as a reinforcement for composites with SBS matrices of different vinyl content is proposed for the study of its viscoelastic properties.

The seaweed is collected from the shores of Miramar Beach, Cd. Madero, Tamps, to be subsequently treated by washing and sieving to obtain particles of 177 microns in size. The compounds are extruded in a mixing chamber at processing conditions of 100°C at a speed of 60 rpm and a mixing time of 15 minutes. Naphthenic oil is used as an assistant in the processing of the composites.

The composites are characterized by Fourier Transform Spectrophotometry (FTIR), Thermogravimetric Analysis (TGA), mechanical tensile tests, Dynamic Mechanical Analysis (DMA), optical microscopy, aging tests, flow index, abrasion and shore A hardness.

The characterizations show that a good compatibility between the matrix and the reinforcement is obtained. The best performance in mechanical properties is presented in formulations with lower ratios of twill particles.

The variation of the amount of vinyls influences the properties of the composite material since in general better results are observed in the composites obtained with the matrix with low vinyl content compared to the matrix with high vinyl content.

## Índice general

|   |    |
|---|----|
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | 9  |
| <b>CAPÍTULO 1. MARCO TEORICO</b> .....                                | 10 |
| 1.1 Antecedentes .....  | 11 |
| 1.2 Materiales compuestos.....  | 14 |
| 1.2 Tipos de refuerzos .....  | 15 |
| 1.3 Polímeros .....   | 17 |
| 1.3.1 Clasificación.....  | 17 |
| 1.4 Compuestos SBS/PS .....   | 22 |
| 1.4.1 Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).....                          | 22 |
| 1.4.2 Sargazo .....   | 26 |
| <b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b> .....                                  | 31 |
| 2.1 Materiales .....  | 32 |
| 2.2 Metodología .....   | 32 |
| 2.2.1 Preparación de las partículas de sargazo.....                   | 32 |
| 2.2.2 Preparación de los compuestos SBS/PS.....                       | 33 |
| 2.3 Técnicas .....  | 35 |
| 2.3.1 Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier .....      | 35 |
| 2.3.2 Análisis termogravimétrico (TGA) .....                          | 36 |
| 2.3.3 Pruebas mecánicas .....   | 37 |
| 2.3.4 Análisis Dinámico Mecánico (DMA) .....                          | 38 |
| 2.3.5 Microscopía .....   | 39 |
| 2.3.6 Pruebas de envejecimiento .....                                 | 41 |
| 2.3.7. Índice de Fluidez .....  | 43 |
| 2.3.8. Abrasión .....   | 44 |
| 2.3.9 Dureza Shore A .....  | 45 |
| <b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....                       | 46 |
| 3.1 Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) ..... | 47 |
| 3.2 Análisis Termogravimétrico.....                                   | 49 |
| 3.3 Pruebas mecánicas .....   | 53 |
| 3.4 Análisis Mecánico Dinámico (DMA) .....                            | 59 |
| 3.5 Microscopías.....   | 63 |
| 3.5.1 Microscopía óptica .....  | 63 |
| 3.5.2 Microscopía SEM.....  | 64 |
| 3.6 Pruebas de envejecimiento.....                                    | 65 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.6.2 Hidro envejecimiento .....                        | 65        |
| 3.6.3 Foto envejecimiento .....                         | 67        |
| 3.7 Índice de Fluidez.....                              | 70        |
| 3.8 Abrasión.....                                       | 71        |
| 3.9 Dureza Shore A .....                                | 72        |
| <b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> | <b>75</b> |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....                         | 78        |
| ANEXOS.....   | 85        |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Representación gráfica de un material compuesto.....  | 14 |
| Figura 1.2 Tipos de materiales compuestos según el refuerzo. a) Compuesto particulado; b) Compuesto fibroso; c) Compuesto laminado. ....             | 16 |
| Figura 1.3 Clasificación de polímeros en función de su estructura. a) Lineales, b) ramificados, c) entrecruzados. ....                               | 18 |
| Figura 1.4 Esquema de copolímeros (a) aleatorios, (b) alternados, (c) en bloques y (d) colgantes o injertados. ....                                  | 20 |
| Figura 1.5 URC del SBS. ....   | 22 |
| Figura 1.6 Reacción de polimerización del SBS.....   | 24 |
| Figura 1.7. Formación de copolímero activo .....   | 24 |
| Figura 1.8 Cadena aniónica .....   | 25 |
| Figura 1.9. Obtención del SBS.....   | 25 |
| Figura 1.10 Sargazo (Sargassum) .....  | 26 |
| Figura 1.11 estructura física del sargazo.....   | 27 |
| Figura 2.1 Preparación de las partículas de sargazo. ....  | 33 |
| Figura 2.2 Procedimiento para la obtención de los compuestos SBS/PS.....   | 35 |
| Figura 2.3 Espectrofotómetro de Transformada de Fourier Perkin Elmer Spectrum 100..  | 36 |
| Figura 2.4 TGA/DSC TA instruments STD Q600 .....   | 37 |
| Figura 2.5 Maquina universal Instron .....   | 38 |
| Figura 2.6 a) DMA TA instruments STD 600; b) Probetas utilizadas en el análisis. ....  | 39 |
| Figura 2.7 Microscopio óptico Zeiss Axio Lab A1 .....  | 40 |
| Figura 2.8 Microscopio Electrónico de Barrido .....  | 41 |
| Figura 2.9 Prueba de hidrodegradación .....  | 42 |
| Figura 2.10 Prueba de Fotodegradación.....   | 43 |
| Figura 2.11 Plastómetro de fluidez.....  | 44 |
| Figura 2.12 Abrasímetro MUYER 5057 .....   | 44 |
| Figura 2.13 Durómetro MUYER 5019 .....   | 45 |
| Figura 3.1 FTIR de a) compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos b) compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos. ....                         | 48 |
| Figura 3.3 a) Termograma de la pérdida de peso vs Temperatura b) DTGA vs Temperatura, para los compuestos SBS/PS con alto contenido de vinilos. .... | 51 |
| Figura 3.4 Gráfica esfuerzo vs deformación a) P1 (bajo contenido de vinilos) b) P2 (alto contenido de vinilos). ....                                 | 55 |
| Figura 3.5 Resultados de pruebas mecánicas, a) Módulo de Young, b) Elongación a ruptura, c) extensión a la fluencia .....                            | 56 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 3.7 Resultados DMA para P2 (alto contenido de vinilos), a) Tan $\delta$ vs Temperatura b) Módulo de almacenamiento vs Temperatura.....       | 62 |
| Figura 3.8 Microscopías SEM para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos....   | 64 |
| a) 30 $\mu\text{m}$ b) 100 $\mu\text{m}$ c) 200 $\mu\text{m}$ .....   | 64 |
| Figura 3.9 Microscopías SEM para compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos.....  | 64 |
| a) 30 $\mu\text{m}$ b) 100 $\mu\text{m}$ c) 200 $\mu\text{m}$ .....   | 64 |
| Figura 3.10 Resultados de diferencias de peso respecto al tiempo de los compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos.....                         | 66 |
| Figura 3.11 Resultados de diferencias de peso respecto al tiempo de los compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos.....                         | 67 |
| Figura 3.12 Resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilo sometidos a foto envejecimiento. a) 0 PHR b) 15 PHR c) 30 PHR..... | 68 |
| Figura 3.13 Resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilo sometidos a foto envejecimiento. a) 0 PHR b) 15 PHR c) 30 PHR..... | 69 |
| Figura 3.14 Resultados del índice de fluidez para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos .....                                      | 70 |
| Figura 3.15 Resultados del ensayo de abrasión DIN para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos.....                                  | 72 |
| Figura 3.16 Resultados del ensayo de Dureza Shore A para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos.....                                | 73 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1 Composición química del sargazo de la zona.....  | 28 |
| Tabla 2.1 Características de las matrices SBS.....   | 32 |
| Tabla 2.2 Matriz experimental .....  | 33 |
| Tabla 2.3 Condiciones de termocompresión. ....   | 34 |
| Tabla 3.1 Datos térmicos obtenidos por TGA de la pérdida de peso de los compuestos SBS/PS.....     | 50 |
| Tabla 3.2 Datos térmicos obtenidos por TGA de la pérdida de peso de los compuestos SBS/PS.....     | 52 |
| Tabla 3.3 Resultados de pruebas mecánicas para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos..... | 53 |
| Tabla 3.4 Resultados de pruebas mecánicas para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos..... | 53 |
| Tabla 3.5 Datos recopilados para módulo de Young. ....   | 57 |
| Tabla 3.6 Resultados de análisis ANOVA para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos .....   | 58 |
| Tabla 3.7 Resultados de análisis ANOVA para compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos .....   | 58 |
| Tabla 3.8 Resultados de microscopía óptica de los compuestos SBS/PS .....                          | 63 |

## INTRODUCCIÓN

Mundialmente cada vez hay una mayor preocupación por el medio ambiente, lo que en el área de nuevos materiales ha llevado a buscar alternativas para proporcionar compuestos más amigables con el entorno. Es aquí donde las fibras naturales han ganado terreno sobre las fibras sintéticas al demostrar que pueden ser una buena alternativa en la obtención de compuestos con mejores propiedades mecánicas, térmicas, e incluso con mejor biodegradabilidad. Sin embargo, la utilización de fibras naturales implica también algunos desafíos entre estos las fallas estructurales que pueden generar fracturas en el material, mala dispersión en la matriz polimérica y la retención de humedad.

Por otra parte, las investigaciones actuales se enfocan principalmente en utilizar como fuente de refuerzo materiales de desecho para así poder implementar un aprovechamiento, estos van desde los obtenidos de desechos orgánicos hasta los de plantas invasoras y algas marinas que generan problemas medioambientales, como es el Sargazo (con denominación técnica *Sargassum*).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) señala que el *Sargassum* es una macroalga marina parda o verde negruzca, que puede crecer varios metros de largo. Aunque no es perjudicial para la salud, su acumulación sí lo es para los ecosistemas y, además, debido a la gran cantidad en la que se acumula en las playas de las costas mexicanas y al mal olor característico que desprende al descomponerse, el sargazo está provocando importantes pérdidas económicas en el sector turístico de esta región.

En la búsqueda de soluciones para evitar la bioacumulación del alga, especialistas en el tema coinciden en que son diversas las aplicaciones que se le puede dar a la especie, desde su utilización como materia prima para la industria cosmética, fertilizante, generador de gas metano, alimento para animales, modificador de asfaltos y recientemente, existe un interés especial en su estudio como refuerzo de polímeros.



# **CAPÍTULO 1. MARCO TEORICO**

## 1.1 Antecedentes

La búsqueda de nuevos materiales compuestos utilizando materias primas de origen natural ha derivado en experimentar con diversos tipos y formas de modificadores, obteniendo buenos resultados entre los que se pueden destacar una mejora en las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales evaluados. Entre los refuerzos de origen natural más utilizados en la literatura se encuentran los provenientes de tallos como Bambú y agave; además se ha experimentado ya adicionando el refuerzo en forma de partículas, observando que es favorable para lograr una mejor interacción superficial entre la matriz y el refuerzo. Sin embargo, son pocas las investigaciones de materiales compuestos utilizando el alga *Sargassum* como refuerzo de una matriz polimérica, lo que confiere un carácter innovador a la presente investigación.

En 2006 Balam-Cocom y colaboradores obtuvieron materiales compuestos reforzados por fibras de henequén y polipropileno como matriz. Las fibras se molieron y tamizaron en mallas #30 y #100 ASTM y se agregaron en diferentes concentraciones. Los compuestos se caracterizaron térmicamente mediante TGA y calorimetría diferencial de barrido DSC, morfológicamente por medio de la microscopía electrónica de barrido SEM y se les realizó pruebas tensiles en una maquina universal. Los mejores resultados mecánicos se obtuvieron con las fibras de menor tamaño lo cual se atribuyó a una mejor dispersión de las fibras en la matriz. <sup>[1]</sup>

En 2017 Méndez-Hernández y colaboradores obtuvieron y caracterizaron compuestos a partir de Estireno Butadieno (SBR) y plumas de pollo (CF). Se utilizaron tres tipos de SBR con contenido de 45%, 32% y 25% de estireno respectivamente. Los compuestos se prepararon mediante extrusión en condiciones de 180°C, 100 rpm y un tiempo de 20 minutos de mezclado. Los compuestos se caracterizaron por espectroscopía de transformada de Fourier (FTIR), DSC, Análisis dinámico mecánico (DMA) y técnicas de difracción de rayos X. Los resultados

mostraron que la rigidez de los compuestos SB/CF es mayor en comparación con el elastómero puro.<sup>[2]</sup>

En 2018 Adefisan y colaboradores obtuvieron compuestos a partir de partículas de bambú y polietileno de alta densidad (HDPE). Se utilizaron tamaños de 2mm y 0.5mm de partículas dispersadas en la matriz mediante extrusión. A los compuestos se les evaluó su resistencia térmica, flujo de fusión y flexión. Los resultados mostraron que los compuestos obtenidos con las partículas de menor tamaño tenían una mayor resistencia a la flexión y un aumento en el módulo de elasticidad con respecto a los que se obtuvieron con un tamaño mayor de partícula, se dedujo que esto se debió a una mejor interacción interfacial entre la fibra y la matriz. Se concluyó que el tamaño de las partículas afectó significativamente las propiedades mecánicas, físicas térmicas y reológicas de los compuestos evaluados.<sup>[3]</sup>

En 2020 Bartos y colaboradores obtuvieron compuestos de fibra de bagazo de caña de azúcar con PP, los cuales se prepararon mediante moldeo por inyección a partir de dos tamaños de partículas: 0.8mm y 0.35 mm respectivamente. Además, se utilizó como agente acoplante al MAPP. Se estudiaron las propiedades mecánicas de los compuestos mediante pruebas de tensión e impacto y la deformación con SEM. La fuerza de adhesión se estimó cuantitativamente y fue diez veces más fuerte ( $1600 \text{ MJ/m}^2$ ) en presencia del MAPP que sin él ( $140 \text{ MJ/m}^2$ ) lo que indica una mayor resistencia del compuesto en el primer caso. Se concluyó que el gran tamaño de las fibras utilizadas en el estudio no fue ventajoso, por lo cual deben reducirse para lograr una mejora en las propiedades, pero incluso en ese caso, la aplicación del agente acoplante es indispensable.<sup>[4]</sup>

En 2020 Salazar-Cruz y colaboradores investigaron el comportamiento del ligante asfáltico modificado por sargazo, estudiándose por primera vez la constitución elemental del sargazo recolectado de la playa Miramar de Ciudad Madero Tamaulipas. La comparación de resultados de la zona con respecto a otros

resultados reportados en la literatura de otras regiones comprobó que la constitución química depende en gran medida de la región de donde se obtiene. [5]

En 2020 Cruz Estrada y colaboradores obtuvieron compuestos con sargazo recolectado de las playas de Puerto Morelos, Quintana Roo y HDPE. El sargazo fue lavado, triturado y tamizado a un tamaño de partícula de 2 mm. Se utilizaron porcentajes de 60% y 40% matriz/refuerzo respectivamente y se procesó por medio de extrusión. Finalmente, el material se moldeó mediante compresión para obtener probetas para las pruebas mecánicas de flexión. Los resultados mostraron que el material obtenido demostró tener una mayor rigidez respecto a la matriz sin reforzar, buena resistencia a la flexión y alta deformación. [6]

En 2021 Escobar Medina y colaboradores estudiaron el efecto del tamaño de partícula de sargazo en las propiedades finales del asfalto modificado con sargazo. Las partículas de sargazo se obtuvieron y caracterizaron mediante análisis elemental, TGA, difracción de rayos X y FTIR. Se prepararon mezclas asfálticas modificadas utilizando diferentes proporciones de partículas de sargazo en dos tamaños: 500  $\mu\text{m}$  y 850  $\mu\text{m}$ . Las mezclas asfálticas puras y modificadas con sargazo se evaluaron mediante análisis físicos y pruebas reológicas. Los resultados sugirieron que las partículas por debajo de 500  $\mu\text{m}$  lograron ser eficientes para mejorar las propiedades físicas y reológicas del asfalto original. [7]

En 2022 Martínez Reyes y colaboradores emplearon fibras de coco tratadas y no tratadas químicamente para obtener materiales compuestos con SBS de estructura radial con el objetivo de obtener un material con mejor biodegradabilidad que la del material original. Las fibras de coco fueron añadidas a diferentes concentraciones. Se evaluó la degradación hidrolítica y degradación térmica, se realizaron pruebas de DMA, TGA y pruebas tensiles de acuerdo a la norma ASTM D412.

Los resultados mostraron que el material obtuvo una buena sinergia con las partículas tratadas químicamente, se mejoró su módulo de almacenamiento y en la prueba de termo degradación se presentó un fenómeno el cual mejora las

propiedades térmicas ya que el SBS a determinada exposición térmica el material se volvía rígido y quebradizo lo contrario a los compuestos reforzados los cuales mantenían la flexibilidad y elasticidad característicos de los hules.<sup>[8]</sup>

## 1.2 Materiales compuestos

Un material compuesto se define como la combinación de dos o más componentes que generan un nuevo material con propiedades específicas. Se identifican dos fases en un material compuesto las cuales son denominadas como matriz y refuerzo<sup>[9]</sup> como se observa en la figura 1.1.

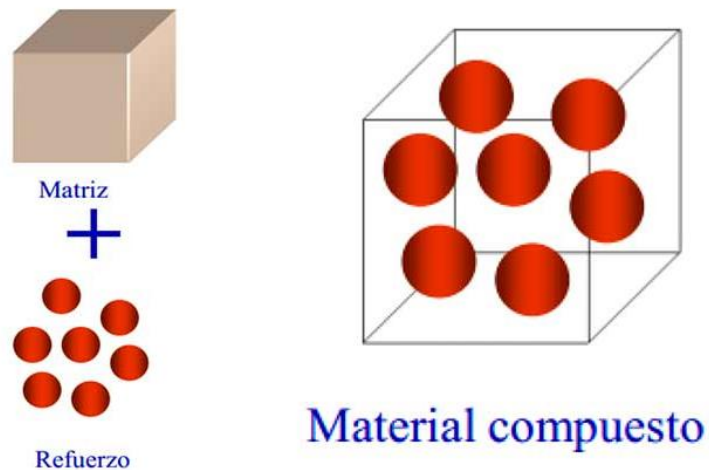


Figura 1.1 Representación gráfica de un material compuesto.

**Matriz:** Es el componente continuo del material. Desempeña un papel importante en el comportamiento mecánico de tracción, cizallamiento y fractura, ya que protege y mantiene al refuerzo en su lugar. Generalmente es responsable de las propiedades químicas y funcionales del material y limita la temperatura de trabajo del material compuesto.



Dependiendo del tipo de matriz, los compuestos se pueden dividir en tres grupos:

- Compuestos de matriz metálica: Son materiales consisten en metales ligeros, por ejemplo, el aluminio que comúnmente es reforzado con fibras de carburo de silicio. Se utilizan cada vez más en la industria del automóvil.
- Compuestos de matriz cerámica: Estos materiales consisten en una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers de carburo de silicio o nitruro de boro. Se utilizan en aplicaciones de alta temperatura.
- Compuestos de matriz polimérica: También se les conoce como polímeros reforzados con fibras y son los más comúnmente utilizados. La matriz es un polímero y diversas fibras, como el vidrio, carbono o más recientemente las fibras naturales se utilizan como refuerzo. <sup>[10]</sup>

Refuerzo: Es un componente discontinuo del material. Su tarea principal es mejorar o completar las propiedades de la matriz en ciertas direcciones predeterminadas o al azar. Los refuerzos generalmente se clasifican en función de su geometría. En general, el objetivo principal de agregar refuerzo es aumentar la rigidez y la resistencia de la matriz. <sup>[11]</sup>

## 1.2 Tipos de refuerzos

Una de las clasificaciones más importantes encontradas en la literatura para los materiales compuestos se basa en la forma o naturaleza de su refuerzo; esta clasificación se divide en tres tipos de compuestos: particulados, fibrosos y laminados como se ilustra en la figura 1.2

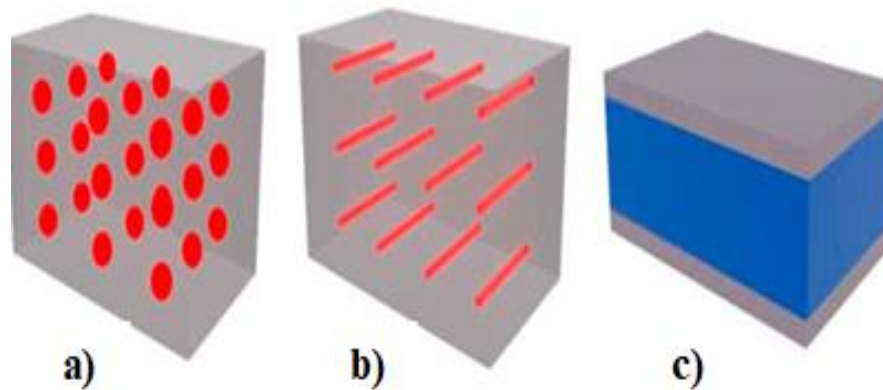


Figura 1.2 Tipos de materiales compuestos según el refuerzo. a) Compuesto particulado; b) Compuesto fibroso; c) Compuesto laminado.

➤ Materiales Compuestos Particulados:

El comportamiento mecánico de este tipo de materiales es generalmente isótropo y son los más baratos y fáciles de fabricar de todos los materiales compuestos.

➤ Materiales compuestos de fibra:

*Fibras cortas:* cuando se utilizan fibras cortas para reforzar materiales, su longitud afecta las propiedades del material. Los compuestos reforzados con fibra pueden ser tanto isotrópicos como anisotrópicos, proporcionando excelentes propiedades en la dirección de las fibras.

*Fibras largas:* Son elementos helicoidales con una relación  $L/D > 100$ , donde “L” es la longitud de la fibra y “D” es el diámetro de su sección transversal. Para este tipo de refuerzo, el aumento de la longitud de la fibra no afecta las propiedades del material.

➤ Materiales compuestos laminados:

Los refuerzos laminados se forman repitiendo un número limitado de placas en diferentes direcciones. En este caso, cada lámina puede ser de material (fibra corta, fibra larga o tejido bidimensional). Los compuestos laminados siempre exhiben un comportamiento anisotrópico. <sup>[12]</sup>

### 1.3 Polímeros

Los polímeros son un tipo específico de macromolécula caracterizada por una unidad repetitiva a lo largo de la molécula. Las moléculas pequeñas que se unen a través de un proceso químico llamado reacción de polimerización para formar un polímero se llaman monómeros. La asociación de todas estas moléculas pequeñas da como resultado una estructura estructural repetitiva en el polímero, y la unidad que se repite regularmente en toda la molécula se denomina unidad repetitiva constitutiva (URC) o unidad monomérica. En algunos casos, la repetición es lineal, al igual que una cadena consta de sus eslabones. En otros casos, las cadenas están ramificadas o interconectadas para formar redes tridimensionales. [13, 14]

#### 1.3.1 Clasificación

Los polímeros pueden tener distintas propiedades, por ejemplo, pueden clasificarse en función de:

- Origen
- Estructura
- Monómeros constituyentes en la estructura
- Comportamiento térmico

#### *Clasificación de polímeros en función del origen*

Pueden existir dos tipos de origen de polímeros:

Polímeros naturales: Estos se obtienen de la naturaleza como plantas, animales, etc. También existen polímeros biodegradables llamados biopolímeros. Los ejemplos incluyen caucho natural, celulosa, PLA.

Polímeros sintéticos: estos fueron fabricados por humanos en laboratorios y ahora se producen industrialmente. El polipropileno (PP) y el polietileno (PE) son ejemplos.

[15]

*Clasificación de polímeros en función de su estructura.*

La estructura molecular de los polímeros se puede clasificar como lineal, ramificada o reticulada. Las diferencias entre cada tipo corresponden a diferencias de forma, que es un criterio adicional para clasificar los polímeros. [16]

Estas estructuras se describen en la Figura 1.3

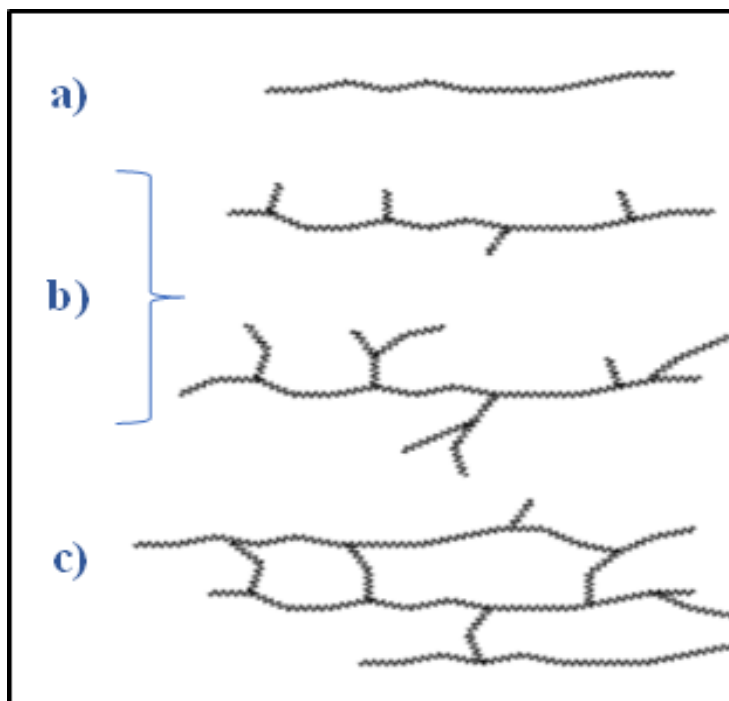


Figura 1.3 Clasificación de polímeros en función de su estructura. a) Lineales, b) ramificados, c) entrecruzados.

Polímeros lineales: los monómeros se unen entre sí para formar largas cadenas rectas [E8G1].

Polímeros de cadena ramificada: estos polímeros están hechos de ramificación de cadenas lineales de monómeros. Tienen bajos puntos de fusión y bajas densidades.

Polímeros entrecruzados / polímeros de red: estos polímeros están formados por monómeros bifuncionales y trifuncionales con un fuerte enlace covalente entre las diversas cadenas poliméricas lineales. Estos polímeros son frágiles por naturaleza.

[17, 18]

*Clasificación de polímeros en función de variedad de monómeros involucrados en la estructura.*

Dependiendo de la composición, los polímeros pueden ser homopolímeros o copolímeros.

Homopolímero: Se refiere al polímero que está formado por el mismo monómero en toda la cadena, ejemplos de polímeros pertenecientes a esta familia son el polietileno, el poliestireno o el polipropileno.

Copolímero: Este es el nombre de un polímero que consta de al menos dos monómeros diferentes en toda la cadena. El acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) o el estireno-butadieno-estireno (SBS) son ejemplos de esta clasificación. <sup>[19]</sup>

Además, los copolímeros a su vez pueden clasificarse en función de cómo se distribuyen las unidades monoméricas en la cadena. Estos tipos pueden ser:

*Aleatorios*: Permutación de unidades regulares A y B en una cadena. Las unidades estructurales se derivan de ambos monómeros presentes en forma desordenada en la cadena. Este es el tipo de copolímero más común, su composición general está determinada principalmente por la composición de la mezcla inicial, la reactividad de los monómeros y las condiciones de polimerización (catalizador, disolvente, temperatura). <sup>[19,20]</sup>

*Alternados*: Alternancia de unidades regulares A y B a lo largo de la cadena.

*Bloques*: Formados cuando dos monómeros se apilan para formar "bloques" de unidades repetitivas. Un bloque es una parte de una macromolécula que consta de varios bloques de construcción y tiene al menos una propiedad que no está presente en las partes adyacentes. Esta clase de macromoléculas se produce mediante la combinación de dos o más bloques de polímeros químicamente diferentes en una serie lineal de monómeros idénticos que pueden ser termodinámicamente incompatibles.

*Injertados*: Los copolímeros de injerto consisten en macromoléculas con uno o más tipos de bloques unidos a la cadena principal para formar cadenas laterales; esas cadenas tienen propiedades de configuración diferentes de la cadena principal. <sup>[19]</sup>

Esta clasificación se ilustra en la figura 1.4.

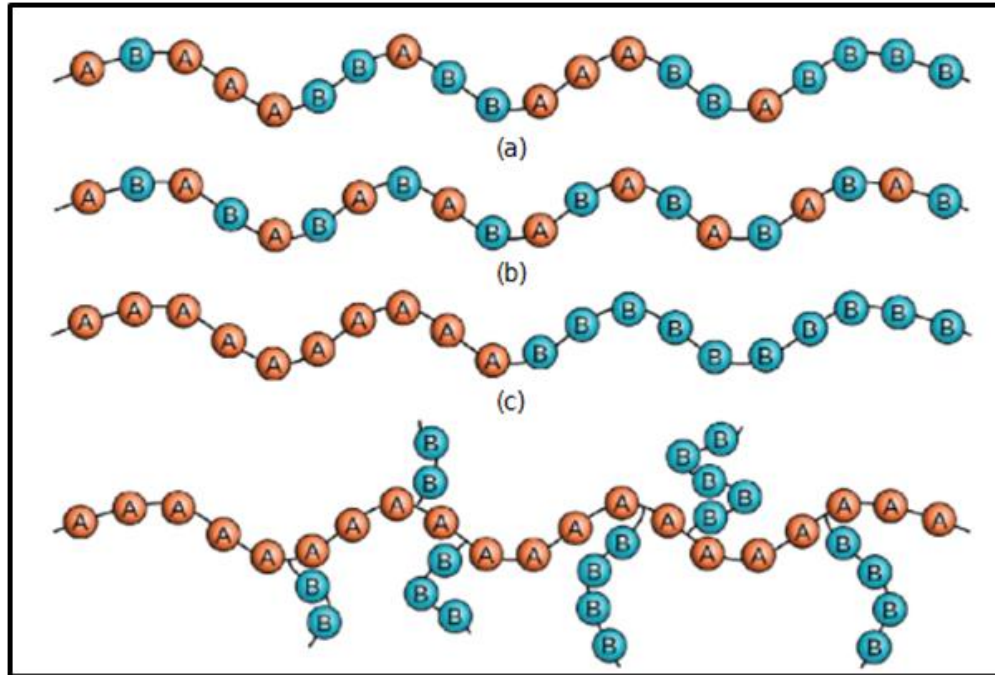


Figura 1.4 Esquema de copolímeros (a) aleatorios, (b) alternados, (c) en bloques y (d) colgantes o injertados.

### *Clasificación de polímeros en función de su comportamiento térmico*

Termoplásticos: Son polímeros formados por la adición de estructuras de moléculas largas con fuertes enlaces atómicos. Hay enlaces de Van der Waals entre moléculas adyacentes que cambian dependiendo de la temperatura. Al levantarlos, y debido a que estas fuerzas son débiles, pueden ocurrir transiciones entre capas. La mayoría consisten en marcos muy largos de átomos de carbono enlazados. <sup>[20]</sup>

Debido a que las moléculas suelen ser diferentes, no existe un punto de fusión específico para los plásticos: se ablandan a diferentes temperaturas. Ejemplos de termoplásticos son poliamidas (nylon), polietileno, cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno, policarbonatos, poliésteres y poliestireno.

Termoestables: Estos polímeros tienen una estructura tipo red basada en enlaces covalentes, donde las cadenas se entrecruzan por calor o una combinación de calor y presión durante la reacción de polimerización. Los polímeros termoendurecibles se obtienen a menudo en forma de dos resinas líquidas. Uno contiene endurecedores, endurecedores y plastificantes, las otras cargas y/o materiales de refuerzo, que pueden ser orgánicos o inorgánicos.

Cuando estos dos componentes se mezclan, la reacción de reticulación, como cualquier otra, se inicia por calor y/o presión. Gracias a esto, los termoplásticos no pueden sobrecalentarse como los termoplásticos, pero no se rompen ni se ablandan cuando se calientan, sino que se queman. Esto es una desventaja, ya que los fragmentos generados durante el proceso no se pueden reutilizar. <sup>[19, 20]</sup>

Elastómeros: Los elastómeros son materiales cuya característica es la elasticidad inmediata, totalmente reversible e ilimitada por grandes deformaciones. Estos materiales tienen un peso molecular elevado y una Tg muy baja, lo que les confiere una gran flexibilidad.

Las moléculas de estos materiales contienen una concentración moderada de entrecruzamiento, que es en gran parte responsable del comportamiento elástico porque evita la migración de la cadena. La deformación elástica se puede observar cuando el elastómero se estira y se recoge. A nivel molecular, el fenómeno es que las cadenas se "estiran" en la dirección del esfuerzo y las cadenas se retraen cuando ya no se usan. <sup>[21]</sup>

## 1.4 Compuestos SBS/PS

### 1.4.1 Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)

El SBS (estireno-butadieno-estireno) es un copolímero formado por una cadena corta de poliestireno, seguida de otra cadena larga de polibutadieno y finalmente otra cadena corta de poliestireno. La unidad de repetición constitucional (URC) de estireno butadieno estireno se muestra en la Figura 1.5.

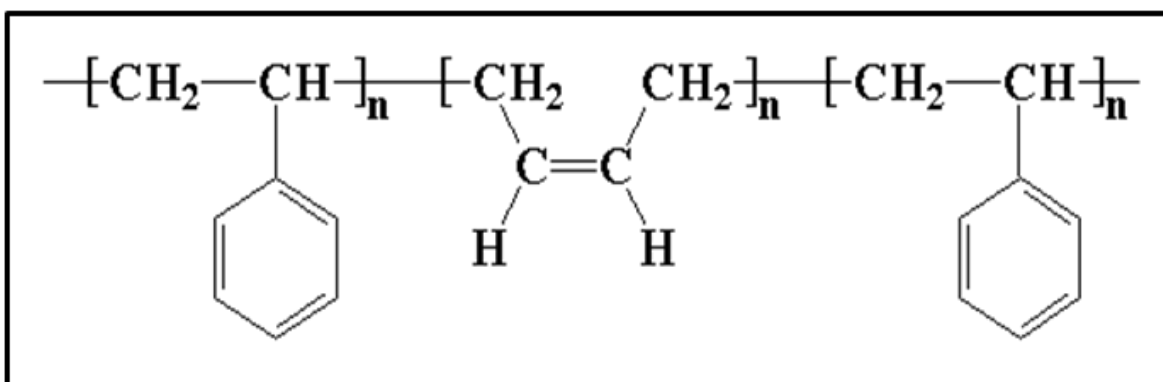


Figura 1.5 URC del SBS.

El poliestireno es un polímero duro y rígido que le da al SBS su rigidez. El polibutadieno (PB) es un material de caucho y le da al SBS sus propiedades de caucho. Además, las cadenas de poliestireno tienden a unirse en agregados a través de interacciones de baja intensidad, lo que favorece la formación de enlaces reversibles. [24]

Además, la molécula de PB consta de un doble enlace que representa el sitio activo disponible para la reacción. Estas insaturaciones son la mayor característica del polibutadieno y la clave de sus propiedades elásticas. Los dobles enlaces tienen una fuerte tendencia a reaccionar entre sí o especialmente con sustancias añadidas, formando puentes entre moléculas. Durante el trabajo, el material sigue cambiando de forma, pero gracias a los puentes, vuelve a su forma original cuando cesa el esfuerzo. Por lo tanto, los puentes entre los dobles enlaces le permiten recuperar su forma después de la deformación elástica. [24,25]



En ciertas aplicaciones, el polibutadieno se vulcaniza ligeramente, es decir, se forman enlaces químicos entre los enlaces d-fold existentes para proporcionar propiedades elásticas. Si el grado de vulcanización es excesivo, el PB se vuelve rígido y quebradizo. [24]

El polibutadieno, como todos los polímeros, tiene una mayor resistencia mecánica, cuanto mayor sea su peso molecular medio. Como resultado, su viscosidad también aumenta, lo que dificulta su uso en el proceso. También es importante la distribución del peso molecular, o mejor conocida como polidispersidad (PD).

Una distribución amplia facilita el manejo, pero una distribución estrecha puede proporcionar ciertas características en ciertas aplicaciones. [25]

Por lo tanto, SBS se puede clasificar como un elastómero termoplástico. Introducidos a fines de la década de 1960, los elastómeros termoplásticos, también conocidos como cauchos termoplásticos, son copolímeros o mezclas físicas de polímeros (generalmente plástico y caucho) que producen materiales y elastómeros con propiedades termoplásticas. Los elastómeros termoplásticos se pueden moldear en la forma deseada mediante procesos clásicos de conversión de plástico. Los métodos más comunes son el moldeo por inyección y la extrusión. [24]

El SBS y otros elastómeros termoplásticos son caucho sin reticulación, lo que los hace fáciles de mecanizar en formas útiles. Su temperatura de reblandecimiento es de 140-200 °C. [24] El SBS se obtiene por medio de una polimerización aniónica viviente. Una polimerización viviente es la que tiene lugar sin reacciones de terminación, es decir, que una vez que el monómero en el reactor ha sido agotado y se ha transformado en polímero, las cadenas poliméricas aún se encuentran activas. Para obtener una cadena de poliestireno viviente se polimeriza el monómero estireno, con un iniciador aniónico como el butilitio.

En la figura 1.6 se muestra la reacción de polimerización.

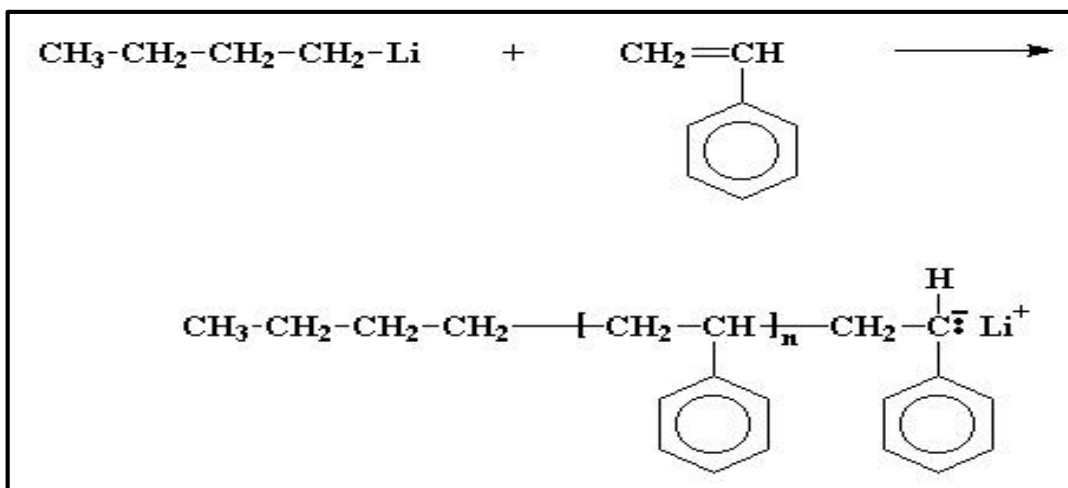


Figura 1.6 Reacción de polimerización del SBS

Se adiciona el segundo monómero (butadieno), esto da un copolímero en bloque estireno-butadieno vivo, como se muestra en la figura 1.7.

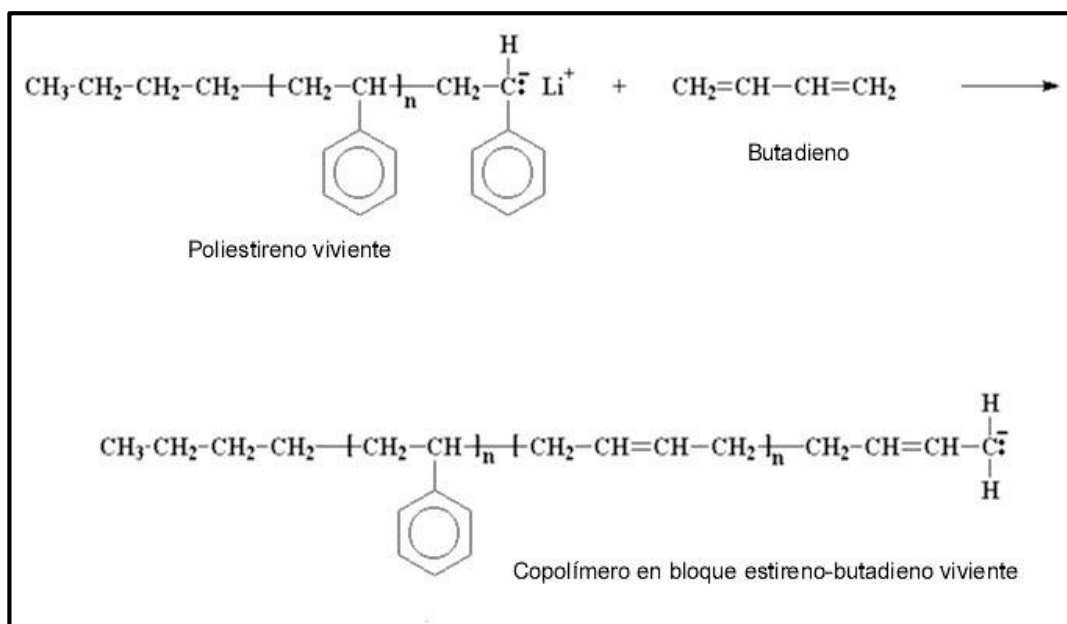


Figura 1.7. Formación de copolímero activo

Posteriormente se le hace reaccionar con un compuesto llamado diclorodimetilsilano como la reacción en la figura 1.8

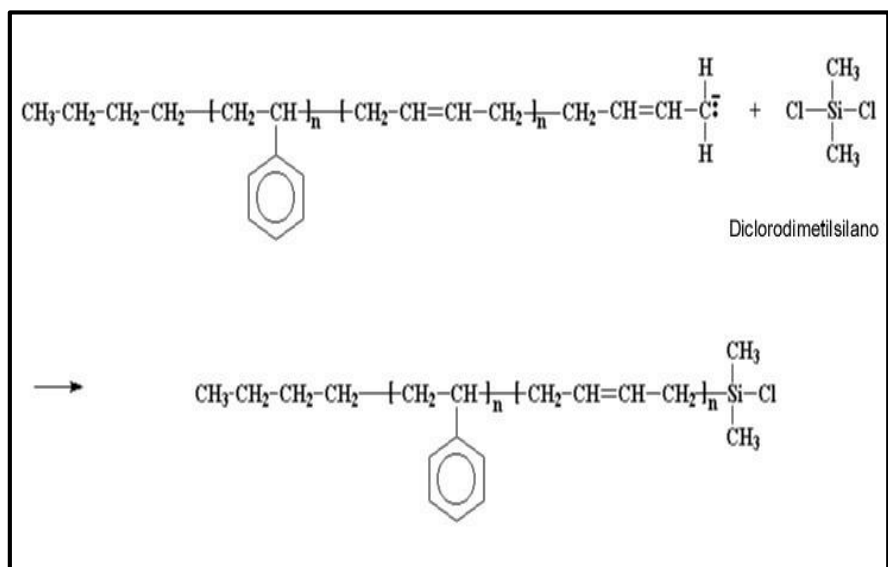


Figura 1.8 Cadena aniónica

La cadena aniónica viviente expulsa un átomo de cloro del silano y se obtiene un polímero que termina en un clorosilano (no viviente). Con esto se consigue que el homopolímero poliestireno viviente reaccione con el polímero terminado en clorosilano, de igual forma en que lo hizo el copolímero estireno-butadieno con el diclorodimetilsilano. Esto da el copolímero SBS en tribloque <sup>[24]</sup> mostrado en la figura 1.9.

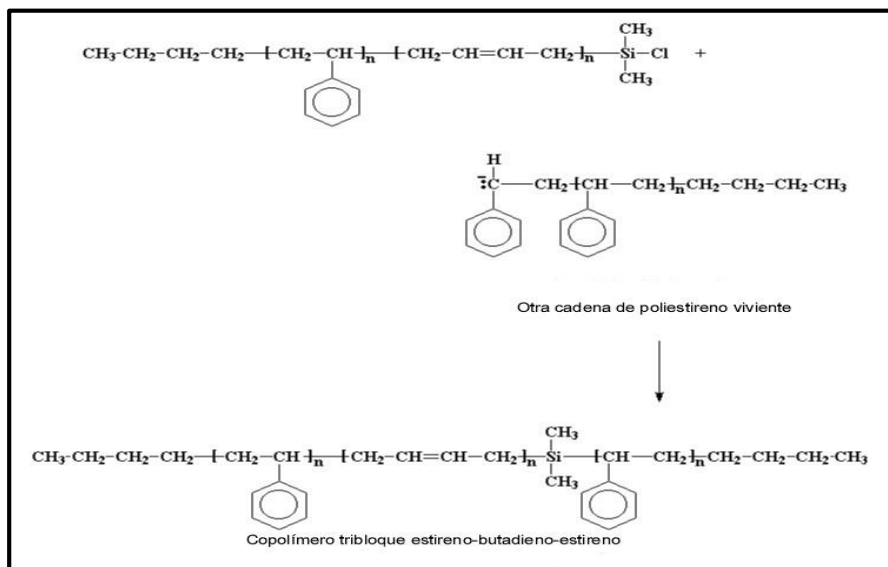


Figura 1.9. Obtención del SBS

En cuanto a aplicaciones, el SBS es muy adecuado para ser utilizado como material de sellado y un adhesivo en el proceso de fusión en caliente. También se utiliza ampliamente en aplicaciones como la fabricación de calzado, modificación de asfalto y lámina asfáltica, modificación de polímeros, artículos para el hogar, componentes de automóviles, materiales líquidos de sellado, capas o recubrimientos impermeables y adhesivos. [24,25]

#### 1.4.2 Sargazo

El sargazo, figura 1.10 es una macroalga marina parda del género *Sargassum* características de áreas costeras tropicales. Forma colonias que llegan a cubrir grandes extensiones y que se mueven de acuerdo con las corrientes oceánicas. [26]



Figura 1.10 Sargazo (*Sargassum*)

Las masas flotantes de sargazo sirven como hábitat para muchas especies marinas, ya que proporcionan alimento, protección y refugio a peces, camarones, cangrejos y tortugas. Muchas de las especies que se esconden en las masas de sargazo tienen una coloración parduzca, similar a la de los sargazos, para camuflarse.

Las algas, que pueden crecer en varios metros, son pardas o verde negruzcas. Algunas especies tienen vesículas llenas de gas para mantenerse a flote y promover la fotosíntesis. Muchas tienen texturas duras entrelazadas y con cuerpos robustos, pero flexibles, las ayudan a sobrevivir a corrientes fuertes. Se caracterizan por que cada nivel de ramificación con sus respectivos filoides se origina del eje principal (estipe) así como los receptáculos en ramas auxiliares. Hay dos especies de sargazo involucradas en la afluencia de sargazo: *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*. [27]

La estructura física común de esta especie se ilustra en la figura 1.11.

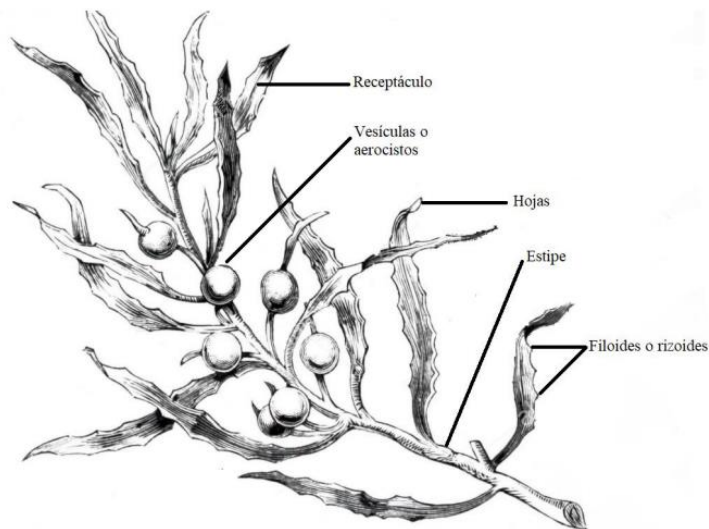


Figura 1.11 estructura física del sargazo

Una explicación del origen de estas algas es que son desprendimientos provenientes del Mar de los Sargazos. Esta gran biomasa de sargazo sigue una corriente marina que circula por latitudes tropicales desde las costas del Atlántico oriental, frente a África occidental y la desembocadura del río Congo, para llegar al mar Caribe y el golfo de México después de haber pasado por las costas del noreste de Brasil, frente a la desembocadura del río Amazonas y girar finalmente rumbo al norte. [27,28]

A partir de 2011 y sin previo aviso se detectaron en el mar Caribe agregaciones significativas y atípicas de sargazo pelágico o flotante de las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*. [28]

Respecto a la constitución química del sargazo en la bibliografía se encuentran estudios elementales del sargazo obtenidos en diversas regiones del mundo. En México, el Instituto Politécnico Nacional estudió la constitución elemental de sargazo recolectado de las costas de Baja California Sur. Se observaron minerales con concentraciones expresadas en mg/100 g entre ellos Na, 363.56, K, 222.88, Ca, 142.52, Mg, 51.44, Cu, 0.21 y el zinc en 0.02 %. [29]

En 2021 se reportó una caracterización del sargazo de la playa Miramar en Ciudad Madero,

Tamaulipas, México, utilizando la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (EDXRF). Este estudio es un análisis elemental que utiliza radiación gama para determinar el contenido de elementos esenciales y no esenciales en la muestra. Los resultados indicaron que los elementos más abundantes fueron S, K, Al, P, Si y Cl. [8]

Las muestras además fueron analizadas mediante Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (GC/MS) donde se identificaron un total de 24 compuestos, los cuales se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composición química del sargazo de la zona.

| Componente            | Tiempo de retención | Área       | %AR (porcentaje área relativa) |
|-----------------------|---------------------|------------|--------------------------------|
| N, N'-dimetilamina    | 3.34                | 265,674    | 0.52                           |
| 2-metilpropanal       | 4.19                | 2,806,561  | 5.49                           |
| 2,3-epoxibutano       | 4.91                | 1,770,658  | 3.46                           |
| 2-hidroxiopropanamida | 5.71                | 5,749,090  | 11.24                          |
| 3-metilbutanal        | 5.99                | 713,849    | 1.40                           |
| Propilenglicol        | 6.14                | 8,043,904  | 15.73                          |
| Hexanal               | 9.24                | 4797487.00 | 9.38                           |

|  |       |             |       |
|--|-------|-------------|-------|
| Heptanal                               | 11.59 | 3227770.50  | 6.31  |
| Dimetil sulfoxido                      | 11.89 | 417538.41   | 0.82  |
| 1-(2-furanil) etanona                  | 12.34 | 541736.19   | 1.06  |
| 2-pentilfuran                          | 12.97 | 335329.13   | 0.66  |
| 2,2,3,3,-tetrametilpentano             | 13.34 | 671151.00   | 1.31  |
| Benzaldehido                           | 13.47 | 608290.44   | 1.19  |
| 5-metil-2-furanocarboxaldehído         | 13.69 | 6973008.00  | 13.64 |
| Octanal                                | 13.81 | 697017.75   | 1.36  |
| Ácido hexanoico                        | 14.02 | 2176027.75  | 4.26  |
| 1-clorododecano                        | 14.64 | 239440.66   | 0.47  |
| Hexanal bencil trans-2-hexenilo Acetal | 15.37 | 2296895.00  | 4.49  |
| 4-hidroxi-5-metil-3-furanona           | 15.69 | 655655.31   | 1.28  |
| Nonanal                                | 15.94 | 4100728.00  | 8.02  |
| Ácido nonaico                          | 19.62 | 2485685.25  | 4.86  |
| 2-ciclohexiloctano                     | 21.52 | 306052.09   | 0.60  |
| Hexadecano                             | 21.99 | 349758.38   | 0.68  |
|  | Total | 51135962.53 | 100   |

El componente que se encontró en mayor proporción fue el propilenglicol (15.7% en peso), seguido del 5-metil-2-furancarboxaldehído (13.64% en peso).

Además, se caracterizó el sargazo por medio de FTIR donde el espectro obtenido mostró una fuerte banda de absorción centrada en  $3250\text{ cm}^{-1}$ , atribuido a las flexiones N-H y O-H; esta observación es consistente con la presencia de polisacáridos y aminoácidos en el alginato, que es el más abundante constituyente de las algas pardas (representan alrededor del 40 % en peso de su peso seco) y consiste en de matrices de celulosa que forman sus paredes celulares [7]. Se observa una banda media atribuida al estiramiento C=C de los grupos de lignina.

La banda de absorción centrada en  $1250\text{ cm}^{-1}$  revela la presencia de grupos S=O, que son relacionado con los polisacáridos sulfatados conocidos como fucanos. Las fuertes bandas de absorción ubicadas a  $1100\text{ cm}^{-1}$  en la región de la huella dactilar corresponden a los modos de estiramiento C-F asociados con la molécula de celulosa. Finalmente, la banda observada a  $670\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la tensión vibraciones de C-S y C=S de compuestos sulfatados. [7,8]

Los estudios apuntan a que la constitución química del sargazo depende del lugar de donde es obtenido.





# **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

## 2.1 Materiales

Para la obtención de los compuestos se utilizaron dos copolímeros SBS de estructura lineal con diferencia en contenido de estructura vinílica (1,2-Butadieno), provistos por Dynasol Elastómeros y etiquetados como P1 con un total de 12% de contenido de vinilos (bajo contenido de vinilos) y P2 con un contenido de 40% de vinilos (alto contenido de vinilos). Las características de las matrices poliméricas se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de las matrices SBS

| SBS                                       | Calprene 501 (P1) | Calprene 580 (P2) |
|---|-------------------|-------------------|
| <b>Estructura</b>                         | Lineal            | Lineal            |
| <b>Composición butadieno/estireno (%)</b> | 69/31             | 69/31             |
| <b>Contenido de vinilos (%)</b>           | 12                | 40                |

Como refuerzo se emplearon partículas de Sargazo en tamaño de 177  $\mu\text{m}$  y se utilizó al aceite Nafténico como ayudante de procesamiento.

## 2.2 Metodología

### 2.2.1 Preparación de las partículas de sargazo

El sargazo se recolectó de la playa Miramar en Ciudad Madero; Tamaulipas, se lavó con agua destilada para eliminar residuos de sal, arena de mar o basura que pudiesen estar presentes para posteriormente eliminar el exceso de agua con un colador. Se secó en una estufa a 40°C por un período de 24 horas.

El alga seca se redujo de tamaño por medio de un molino de paletas y se tamizó utilizando una malla No. 80 ASTM hasta alcanzar un tamaño de partícula de 177 micras. El proceso de preparación de las partículas de sargazo se ilustra en la figura 2.1.



Figura 2.1 Preparación de las partículas de sargazo.

### 2.2.2 Preparación de los compuestos SBS/PS

Los compuestos se prepararon utilizando la matriz experimental mostrada en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Matriz experimental

| Formulaciones    |     |     |     |      |      |      |      |      |
|------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Materiales       | P_0 | P_1 | P_5 | P_10 | P_15 | P_20 | P_25 | P_30 |
| SBS<br>(P1 y P2) | 100 | 100 | 100 | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Aceite           | 0   | 30  | 30  | 30   | 30   | 30   | 30   | 30   |
| Sargazo (phr)    | 0   | 1   | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |

Los compuestos fueron identificados como P1 para el co polímero SBS de bajo contenido de vinilos y P2 para el co polímero SBS de alto contenido de vinilos, seguido de la cantidad de partículas de sargazo en phr, por ejemplo, al compuesto conformado por SBS de bajo contenido de vinilos y 10 phr de partículas de sargazo se le identifica como P1\_10.

Se decidió utilizar aceite Nafténico como ayudante de proceso. El aceite nafténico es un derivado del petróleo generalmente utilizado en fabricación de suelas de calzado, adhesivos, mangueras.

Gracias a la excelente compatibilidad que dicho aceite tiene con la matriz polimérica SBS fue elegido para su uso en la preparación de los compuestos. La cantidad de aceite se mantuvo constante en toda la matriz experimental a excepción de los blancos P1\_0 y P2\_0 que fueron procesados sin aceite.

Previo al procesamiento se realizó un análisis termogravimétrico de los materiales para determinar las condiciones adecuadas para la preparación de los compuestos SBS/PS.

Los compuestos se procesaron en una cámara de mezclado marca Brabender Intelli Torque conformada por tres secciones que son calefactadas eléctricamente de forma independiente. Un termopar situado en la sección central permite la determinación de la temperatura alcanzada por el material en el interior de la cámara las condiciones de 100°C de temperatura, 60 rpm de velocidad y 15 minutos de tiempo de mezclado. Los compuestos SBS/PS obtenidos en forma de mastique se llevaron a moldeo por termocompresión utilizando una prensa hidráulica marca Dake a 150°C y condiciones de carga y tiempo de prensado descritos en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Condiciones de termocompresión.

| <b>Carga (ton)</b> | <b>tiempo (min)</b> |
|--------------------|---------------------|
| <b>0</b>           | 5                   |
| <b>5</b>           | 2                   |
| <b>10</b>          | 2                   |
| <b>15</b>          | 1                   |

El procedimiento para la obtención de los compuestos SBS/PS se ilustra en la figura 2.2.



Figura 2.2 Procedimiento para la obtención de los compuestos SBS/PS.

## 2.3 Técnicas

### 2.3.1 Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier

Los espectrómetros infrarrojos son una de las herramientas más importantes para observar espectros vibracionales. Una sustancia definida puede identificarse por su espectro infrarrojo. Estos espectros pueden ser considerados como las huellas digitales de dicha sustancia. Los espectros muestran bandas que son típicas de grupos funcionales particulares y que tienen localizaciones e intensidades específicas dentro de los espectros infrarrojos.

Por otra parte, las intensidades en las bandas del espectro de una mezcla, son generalmente proporcionales a las concentraciones de las componentes individuales.

Por lo tanto, es posible determinar la concentración de una sustancia y realizar análisis de muestras con varias componentes además es posible, mediante el uso

de dispositivos experimentales adecuados, obtener espectros infrarrojos sin alteración de la muestra, lo que constituye a esta espectroscopía como una herramienta de análisis no destructiva. Generalmente el tiempo necesario para obtener y almacenar un espectro IR son tan solo un par de minutos [30].

Se evaluaron los espectros por FTIR del sargazo y de los compuestos SBS/PS en el espectrofotómetro de Transformada de Fourier Perkin Elmer Spectrum 100 con celda ATR, figura 2.3. Las muestras de los compuestos se midieron en forma de lámina mientras el sargazo fue medido en partículas con un tamaño de 177 micras. Ambos espectros se evaluaron de un rango de  $4000\text{ cm}^{-1}$  a  $600\text{ cm}^{-1}$ , con una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  y 12 barridos de muestreos para optimizar la calidad de la imagen.



Figura 2.3 Espectrofotómetro de Transformada de Fourier Perkin Elmer Spectrum 100

### 2.3.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico o TGA es una técnica industrial que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de sustancias sometiéndolas a una temperatura elevada. El dispositivo TGA ayuda a evaluar cambios en la masa con respecto al cambio de temperatura. De esta manera, se pueden determinar varios parámetros físicos y químicos pertinentes a una sustancia en particular. Esta aplicación práctica ha hecho que la TGA sea beneficiosa para una multitud de vocaciones, incluidas las industrias relacionadas con el procesamiento de alimentos, productos farmacéuticos, fabricación de plásticos y muchas más.

Se realizó un análisis termogravimétrico con el analizador simultaneo TGA/DSC de la marca TA instruments modelo STD Q600, figura 2.4, para determinar el flujo de calor y los cambios de peso en función del tiempo. La prueba se realizó en un rango programado de 30-600°C a 10°C/min en un ambiente inerte con 100ml/min de N<sub>2</sub>.



Figura 2.4 TGA/DSC TA instruments STD Q600

### 2.3.3 Pruebas mecánicas

La prueba de resistencia a la tracción cubre el efecto de aplicar una carga en tensión, obteniendo respuesta de esfuerzo de tracción, alargamiento y carga máxima a la ruptura.

El estudio de las propiedades mecánicas, incluye el Módulo de Elasticidad o de Young, la resistencia a la tracción y el alargamiento a la ruptura.

El ensayo mecánico se realizó en una máquina universal Instron modelo 5982, figura 2.5 con una celda de 100 kN a temperatura controlada. Los especímenes de prueba se prepararon de acuerdo con la norma ASTM D412, teniendo como dimensiones 140 mm x 15 mm x 2.6 mm.

Se utilizaron mordazas de cruceta y la velocidad de carga fue de 20pulgadas/min.

Se analizaron seis muestras para cada prueba, calculándose la media y la desviación estándar para cada magnitud, dejando fuera de estudio aquellas muestras defectuosas.



Figura 2.5 Máquina universal Instron

#### 2.3.4 Análisis Dinámico Mecánico (DMA)

El análisis dinámico mecánico (DMA) es una técnica que se emplea para la evaluación de las propiedades mecánicas, estudia la influencia de la estructura molecular sobre las propiedades físicas de los polímeros, la determinación de estas propiedades permite conocer la aplicación final del material analizado. El DMA se basa en la medición de la fuerza máxima aplicada, la amplitud de la deformación obtenida y la diferencia de fase entre ambos, a partir de estos parámetros se puede obtener tanto el módulo de almacenamiento y pérdida.



La medición se desarrolló en el equipo de TA Instruments de la serie Q800, figura 2.6 utilizando una mordaza dual cantiléver. Se obtuvieron probetas de sección rectangular de 20x12x4mm (largo, ancho y espesor) a condiciones de -90 a 100°C con una rampa de 5°C/min.

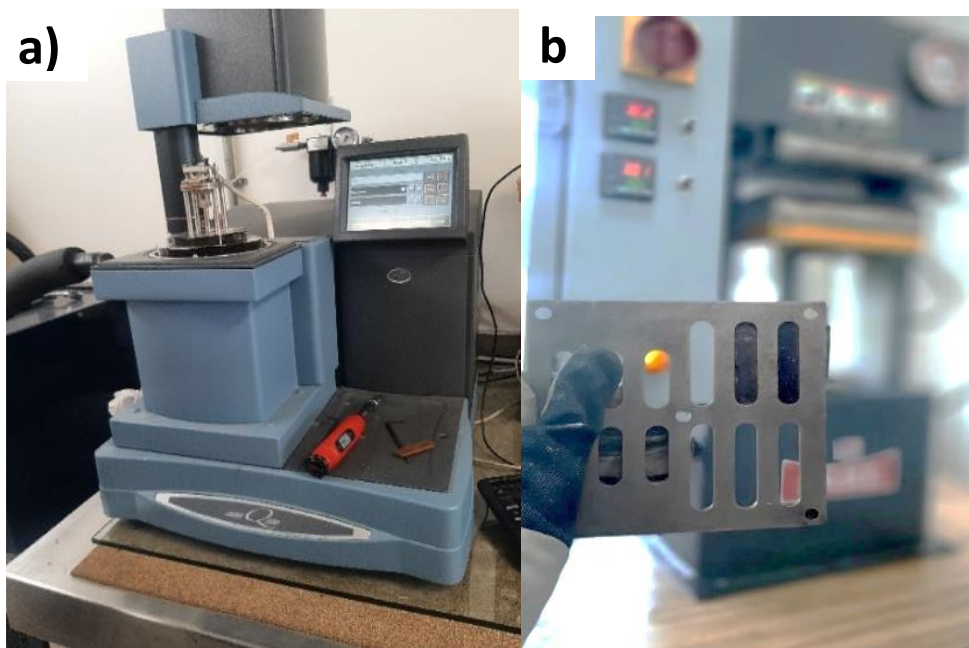


Figura 2.6 a) DMA TA instruments STD 600; b) Probetas utilizadas en el análisis.

### 2.3.5 Microscopía

Las técnicas microscópicas son útiles para hacer visibles estructuras de muestras que a simple vista es difícil de observar, el microscopio óptico proporciona una imagen amplificada de la absorción, reflexión o dispersión de las muestras observadas. Esto es útil para comprender la composición de las muestras observadas.

Microscopía óptica.

La morfología de los compuestos se determinó mediante un microscopio óptico Zeiss Axio Lab A1, utilizando una lente de 5x aumentos. Figura 2.7.



Figura 2.7 Microscopio óptico Zeiss Axio Lab A1

### Microscopía SEM.

La técnica de microscopía electrónica de barrido, es utilizada generalmente en el análisis de las superficies. Se basa en electrones de alta velocidad que golpean la superficie de un sólido en vacío, los electrones son reflejados por la superficie, con estos electrones que barren la superficie se forma una imagen de la superficie barrida. Generalmente es utilizada para examinar las superficies de muestras en alta resolución.

Es una técnica instrumental que encuentra gran cantidad de aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la tecnología.

El equipo permite obtener imágenes de muestras tanto en alto vacío como en presión variable. Por medio de esta técnica, se pueden observar gran variedad de muestras sólidas, secas o húmedas, alcanzando magnificaciones de hasta 60.000x obteniendo imágenes de alta resolución en formato digital.

Las muestras se caracterizaron usando un Microscopio Electrónico de Barrido marca Hitachi TM-1000 operando con un voltaje de 15 kV con aislamiento por alto vacío. Las muestras se recubrieron con una capa de oro con un espesor de  $7 \times 10^{-2}$  mB para mejorar la conductividad.



Figura 2.8 Microscopio Electrónico de Barrido

### 2.3.6 Pruebas de envejecimiento

Uno de los problemas que presentan los materiales poliméricos es su corta vida útil, ya que la mayoría de estos en sus aplicaciones se encuentran expuesto a factores ambientales (radiación solar, humedad, temperatura) que degradan de manera progresiva sus propiedades mecánicas, ópticas y térmicas.

Por otra parte, es importante mencionar que una de las principales limitaciones que tienen los compuestos reforzados con fibras o partículas naturales es la gran afinidad a absorber agua del ambiente lo que afecta directamente en la durabilidad del material.

Se ha observado con gran preocupación que las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras naturales y sintéticas disminuyen si se exponen al ambiente abierto <sup>[31,32]</sup>. Las principales razones de la disminución son la temperatura, la humedad y la radiación. <sup>[33]</sup>

Debido a esta situación, es necesario realizar pruebas de envejecimiento por temperatura, de tal manera que todas las muestras de prueba estén a condiciones de forma controlada, con el fin de que se pueda obtener resultados de laboratorio sobre durabilidad y fiabilidad de las muestras.

Para estas pruebas los compuestos SBS/PS fueron expuestos a condiciones controladas de temperatura (termo degradación) a dos diferentes temperaturas durante las primeras 5 horas y posteriormente en periodos de 24 y 30 horas. Las muestras fueron analizadas mediante FTIR.

Posteriormente se realizó la prueba de hidrodegradación empleando una cámara de envejecimiento, un dispositivo generador de humedad, un medidor de humedad y temperatura y 10 muestras por concentración. Se obtuvo una muestra por concentración y se cuantificó el peso de las muestras durante las primeras 5 horas y en periodos de 24, 48 y 72 hrs. La experimentación se ilustra en la figura 2.9.



Figura 2.9 Prueba de hidrodegradación

La prueba de fotodegradación se realizó en una cámara de envejecimiento conformada por un arreglo de espejos en su interior y una lámpara UV ral como se observa en la figura 2.10. Las muestras fueron colocadas en su interior durante las primeras 5 horas y posteriormente en periodos de 12, 24, 48, 36 y 72 horas respectivamente.

La fotodegradación de las muestras se analizó mediante FTIR.



Figura 2.10 Prueba de Fotodegradación

### 2.3.7. Índice de Fluidez

El índice de fluidez es una prueba reológica que mide la capacidad de flujo del polímero bajo condiciones de presión y temperatura controladas. La prueba consiste en medir en gramos la cantidad que fluye a través del orificio de un dado capilar durante 10 minutos.

Esta variable se relaciona inversamente con la viscosidad y el peso molecular (PM), es decir, a medida que aumenta el índice de fluidez del polímero, se obtiene una disminución en la viscosidad y el peso molecular.

Las pruebas de velocidad de flujo se rigen por varios estándares internacionales, incluido el Método ASTM D1238 e ISO R1133. Dichas normas especifican el tamaño de los orificios, la temperatura de fusión, el tamaño de la cámara de calor y el diámetro de la punta del pistón, así como el método de realización de la prueba.

La prueba de índice de fluidez para los compuestos SBS/PS se realizó con referencia en la norma ASTM D1238 a condiciones de 200°C y 5Kg en un plastometro de fluidez marca KAYENESS modelo D4004.



Figura 2.11 Plastómetro de fluidez

### 2.3.8. Abrasión

La resistencia a la abrasión es un factor de calidad determinante para muchos productos de caucho como mangueras, neumáticos o suelas de zapatos ya que es uno de los principales factores que determinan su esperanza de vida y eficiencia.

La prueba de abrasión consiste en hacer que la superficie del material a ensayar se una a otra superficie más dura y generalmente abrasiva para generar una interacción de desgaste. Las superficies se pueden desplazar o friccionar cíclicamente. Las muestras de los compuestos SBS/PS fueron analizadas conforme a la norma de Referencia DIN 53516 en un abrasímetro marca MUYER modelo 5057.



Figura 2.12 Abrasímetro MUYER 5057

### 2.3.9 Dureza Shore A

La dureza Shore es un método que determina la dureza o flexibilidad de los materiales. Existen diferentes escalas de dureza shore, sin embargo, para los elastómeros termoplásticos la dureza shore A es la escala más utilizada. En la escala Shore A, cero indica materiales extremadamente blandos y gelatinosos, como las siliconas, mientras que los plásticos semi rígidos se miden en el extremo más alto de la escala, alrededor de 90-95. [34,35]

La muestra se coloca sobre una superficie plana, rígida y de área suficientemente grande para que el pie de presión del durómetro entre en contacto con la probeta en un radio de mínimo 6mm desde el punto de abollado. La prueba inicia con la aplicación de presión a la muestra lo más rápidamente posible, pero sin golpes, asegurando que la indentación sea normal a la superficie. La lectura del durómetro se registra en momentos específicos: 3 segundos para el caucho vulcanizado y 15 segundos para el caucho termoplástico. Se registran cinco medidas de dureza en diferentes posiciones en la muestra, separadas por al menos 6 mm para el durómetro tipo A, y se calcula el valor medio. [35]

La prueba fue realizada en un durómetro marca MUYER modelo 5019 y teniendo como referencia el método DIN 53505.



Figura 2.13 Durómetro MUYER 5019



## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

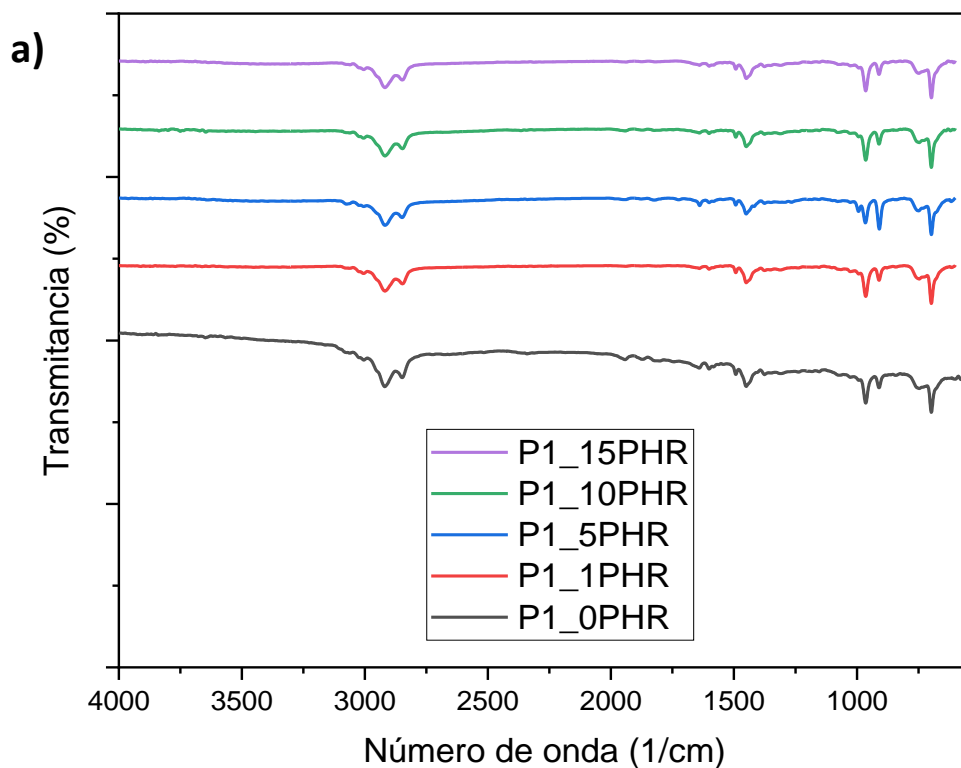


### 3.1 Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

En este capítulo se discuten los resultados de todas las pruebas de caracterización realizadas a los compuestos SBS/PS con bajo contenido de vinilos denotados como P1 y con alto contenido de vinilos denotados como P2. Los resultados discutidos son solo los más relevantes para la investigación, sin embargo, los resultados completos de las caracterizaciones se pueden consultar en la sección de anexos.

La técnica de FTIR se realizó para corroborar la existencia de enlaces químicos entre los grupos vinilos del material polimérico y el azufre constituyente de las partículas de sargazo.

En la figura 3.1 se presentan los datos más relevantes de la espectroscopia infrarroja realizada a los compuestos SBS/PS con bajo contenido de vinilos.



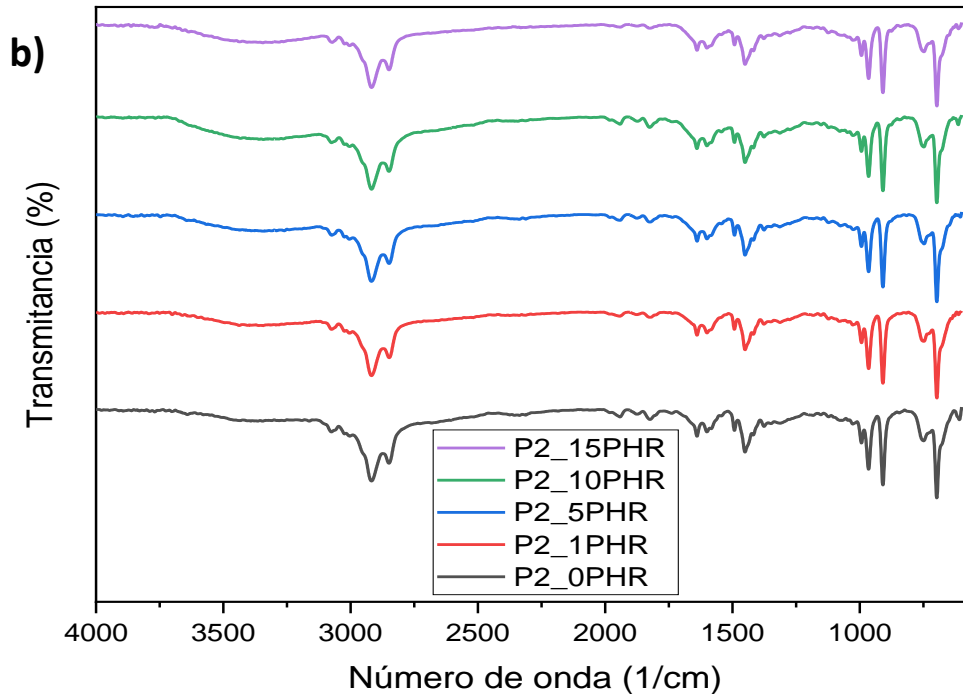


Figura 3.1 FTIR de a) compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos b) compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos.

Las señales más significativas correspondientes a los dobles enlaces atribuidos a las unidades de polibutadieno se visualizan alrededor de los 966, 724 y 911  $\text{cm}^{-1}$  como estiramientos del (=C-H) trans, (=C-H) cis y el grupo vinilo (= CH<sub>2</sub>) respectivamente [18].

En ambos casos, la banda observada en 911  $\text{cm}^{-1}$  tiene un cambio ligero de intensidad, el cual es más visible para los compuestos con bajo contenido de vinilo, esto se debe a la interacción física de las partículas de sargazo con la matriz polimérica. Sin embargo, no se visualizan bandas que indiquen interacciones químicas en los compuestos.

En los compuestos obtenidos con el polímero de mayor cantidad de vinilos se observa una banda ancha alrededor de los 3600  $\text{cm}^{-1}$  indicativos de grupos OH, relacionado con la presencia de humedad en las muestras.

### 3.2 Análisis Termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) determina la pérdida de masa con respecto a la temperatura, lo que es útil para determinar la descomposición térmica del material. La figura 3.2 muestra el termograma de la pérdida de peso vs temperatura y derivada de la pérdida de peso para los compuestos SBS/PS con menor contenido de vinilos.

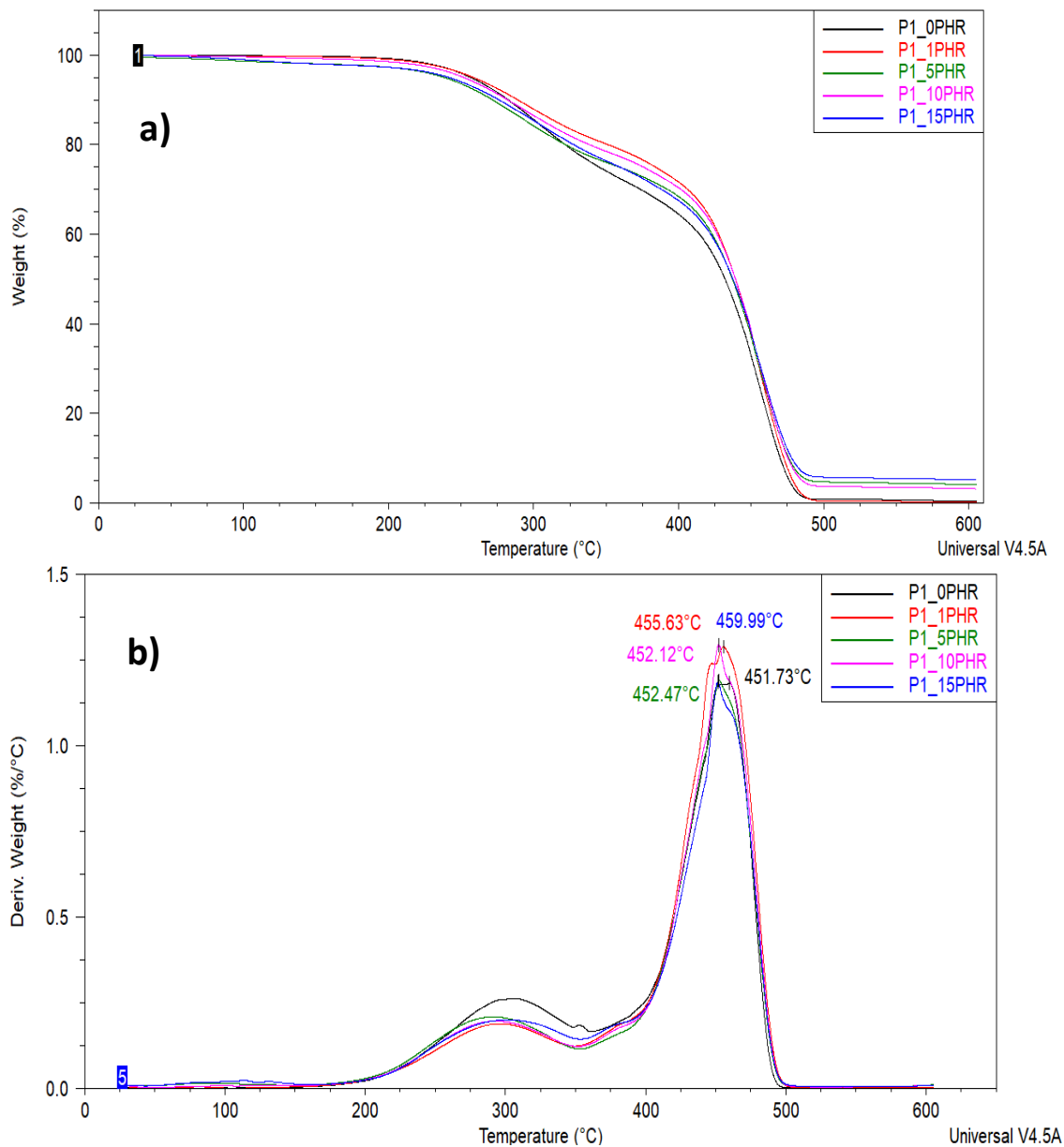


Figura 3.2 a) Termograma de la pérdida de peso vs Temperatura b) DTGA vs Temperatura, para los compuestos SBS/PS con bajo contenido de vinilos.

En la figura 3.2 a) inicialmente se observa una pérdida de peso en los compuestos SBS/PS que no es identificada en el polímero sin reforzar. Esta pérdida de peso puede ser atribuida a la pérdida de agua en los compuestos con partículas de sargazo.

Una segunda pérdida de peso se encuentra entre los 200°C y 325°C, relacionado con la descomposición del aceite Nafténico utilizado en los compuestos, posteriormente se observa la pérdida de peso más significativa entre los 325°C y 495°C atribuida a la descomposición de la matriz polimérica SBS y donde se visualiza que hay una mejora en la estabilidad térmica de los materiales compuestos en relación a la matriz sin reforzar, siendo los compuestos reforzados con 1 y 15 PHR los que obtienen una mejor respuesta ante la degradación térmica.

Lo anterior se refleja en la tabla, donde se muestran los resultados de las temperaturas de descomposición ante un 10%,30%,50% y 70% de pérdida de peso.

Tabla 3.1 Datos térmicos obtenidos por TGA de la pérdida de peso de los compuestos SBS/PS

| <b>Compuesto</b> | <b>10% pérdida de peso</b> | <b>30% pérdida de peso</b> | <b>50% pérdida de peso</b> | <b>70% pérdida de peso</b> |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>P1_0PHR</b>   | 282.88                     | 373.82                     | 431.91                     | 452.49                     |
| <b>P1_1PHR</b>   | 289.57                     | 406.30                     | 439.05                     | 455.70                     |
| <b>P1_5PHR</b>   | 272.19                     | 392.36                     | 436.98                     | 456.00                     |
| <b>P1_10PHR</b>  | 282.66                     | 401.60                     | 439.14                     | 456.95                     |
| <b>P1_15PHR</b>  | 276.58                     | 388.15                     | 437.38                     | 456.67                     |

Por otra parte, en la figura 4.2 b) la curva DTGA de los compuestos brinda información sobre la temperatura máxima donde se descomponen las muestras. Se observa una primera banda para todas las muestras con una temperatura máxima de 300°C que corrobora la temperatura en que el aceite Nafténico utilizado en todas las formulaciones tiene su máximo punto de descomposición.

Posteriormente se analiza que el pico de temperatura máxima de degradación térmica del material sin reforzar sucede en 451.73°C mientras que esta temperatura

aumenta para el resto de los materiales compuestos siendo la mayor de 459.99°C correspondiente a la concentración de 15PHR de partículas de sargazo. Lo que confirma que la adición de PS mejora la estabilidad térmica del material.

El comportamiento térmico de los compuestos SBS/PS con alto contenido de vinilos es mostrado en la figura 3.3

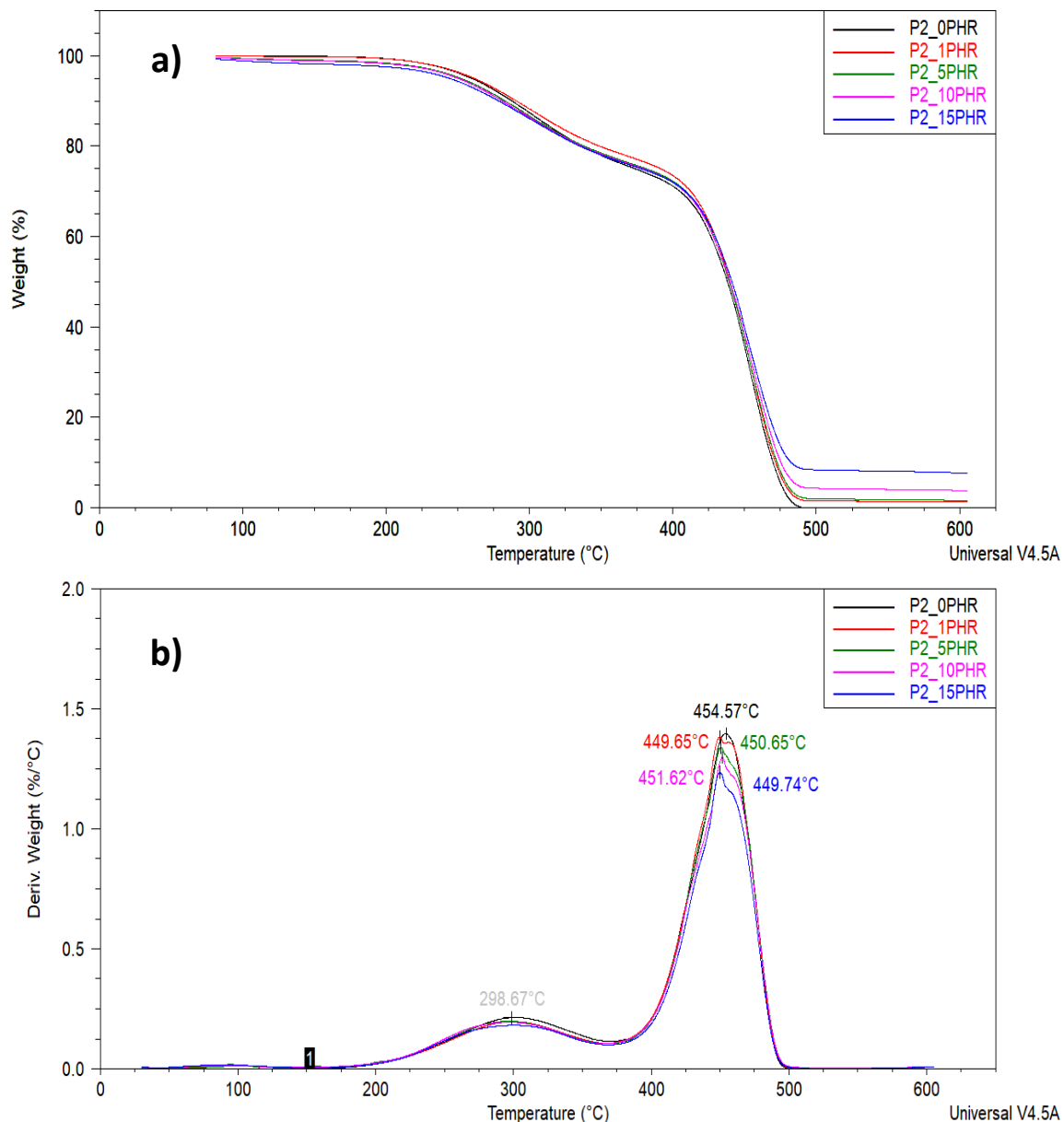


Figura 3.3 a) Termograma de la pérdida de peso vs Temperatura b) DTGA vs Temperatura, para los compuestos SBS/PS con alto contenido de vinilos.

La primera caída de peso registrada en los compuestos a 150°C aproximadamente se atribuye a la humedad que la adición de las partículas de sargazo confiere a las muestras. Posteriormente se observa una segunda caída alrededor de los 200°C y 350°C correspondiente a la descomposición del aceite Nafténico.

La curva DTGA de la figura 4.3 b) puede confirmar al observar el punto máximo de degradación del aceite en 298.67°C aproximadamente.

Una tercera caída de peso entre los 350°C y 495°C representa la descomposición térmica del SBS. La tabla 3.2 muestra los datos de temperatura en que se da el 10%,30%,50% y 70% de pérdida de peso de los materiales.

Tabla 3.2 Datos térmicos obtenidos por TGA de la pérdida de peso de los compuestos SBS/PS.

| <b>Compuesto</b> | <b>10% pérdida de peso</b> | <b>30% pérdida de peso</b> | <b>50% pérdida de peso</b> | <b>70% pérdida de peso</b> |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>P2_0PHR</b>   | 288.24                     | 404.74                     | 438.12                     | 454.13                     |
| <b>P2_1PHR</b>   | 291.34                     | 412.20                     | 439.94                     | 455.37                     |
| <b>P2_5PHR</b>   | 283.55                     | 408.82                     | 439.32                     | 455.49                     |
| <b>P2_10PHR</b>  | 281.64                     | 407.87                     | 439.82                     | 456.72                     |
| <b>P2_15PHR</b>  | 279.11                     | 408.38                     | 441.18                     | 458.44                     |

Inicialmente el material compuesto reforzado con 1PHR muestra una mayor resistencia térmica en comparación con el material sin reforzar, sin embargo, esta condición cambia al pasar a un 50% y 70% de pérdida de peso siendo el material reforzado con 15PHR el que muestra una mejor estabilidad térmica al perder la misma cantidad de peso a una temperatura mayor que el resto de los materiales. Este patrón de comportamiento también se observó con los compuestos con bajo contenido de vinilos.

### 3.3 Pruebas mecánicas

El ensayo de tracción permite determinar la resistencia a la tracción de los especímenes sometidos a prueba, así como analizar otros comportamientos mecánicos tales como el módulo de Young y elongación. La tabla 3.3 y 3.4 resumen los resultados más significativos de las pruebas mecánicas para los compuestos SBS/PS de bajo y alto contenido de vinilos respectivamente; el resto de las formulaciones son reportadas en la sección de anexos.

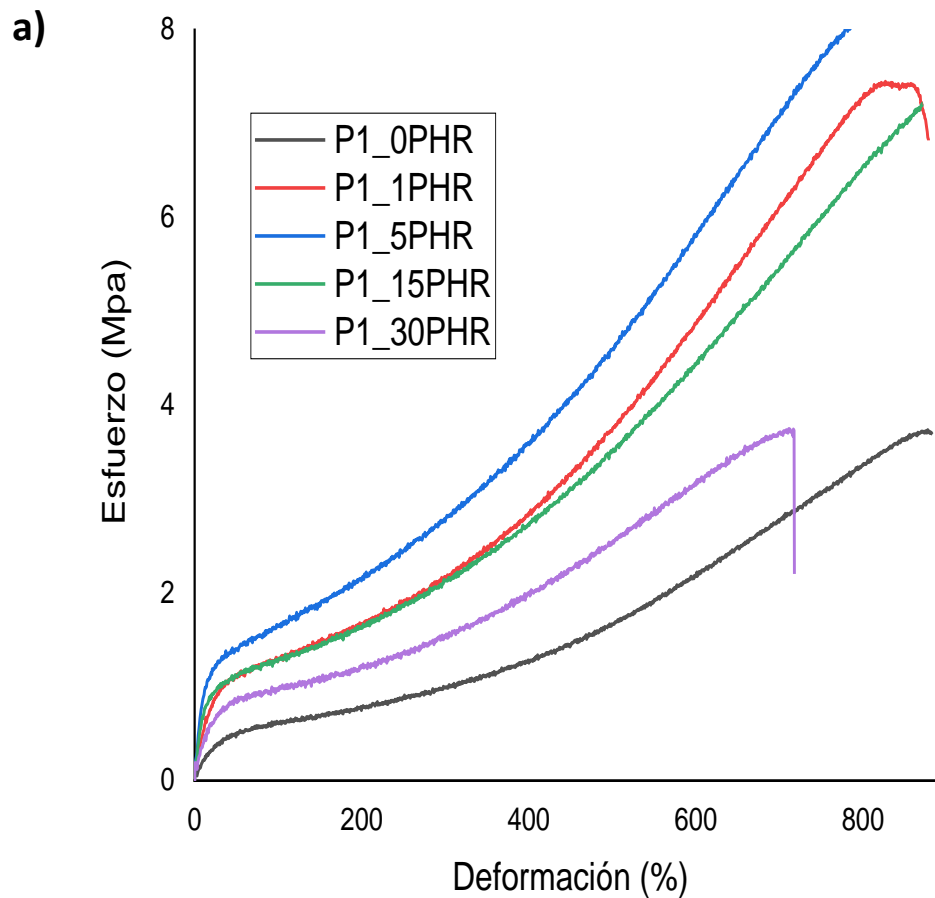
Tabla 3.3 Resultados de pruebas mecánicas para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos.

|   | <b>Compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos</b> |               |               |              |               |
|---|---|---------------|---------------|--------------|---------------|
| Concentración (PHR)                                 | 0   | 1             | 5             | 15           | 30            |
| Módulo (Automático de Young) (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 7.49 ± 3.20   | 8.83± 22.9    | 15.46± 5.7    | 10.02±5.18   | 10.16± 4.76   |
| Deformación por tracción a ruptura (%)              | 877.19 ± 6.94   | 857.96± 84.76 | 882.8± 31.7   | 881.6 ±30.51 | 716.84 ±62.61 |
| Extensión a Fluencia (Desplazamiento 0.2 %)<br>(mm) | 448.75 ± 9.34   | 419.20± 10.84 | 434.65± 39.63 | 452.46±48.1  | 442.85±38.1   |

Tabla 3.4 Resultados de pruebas mecánicas para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos.

|   | <b>Compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos</b> |              |               |               |             |
|---|---|--------------|---------------|---------------|-------------|
| Concentración (PHR)                                 | 0   | 1            | 5             | 15            | 30          |
| Módulo (Automático de Young) (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 5.82 ± 2.46   | 7.56± 0.54   | 9.33± 2.13    | 12.62± 7.49   | 11.54± 6.74 |
| Deformación por tracción a ruptura (%)              | 880.53± 3.26  | 879.8± 13.57 | 778.93± 76.9  | 692±71.95     | 728.84±29.2 |
| Extensión a Fluencia (Desplazamiento 0.2 %)<br>(mm) | 380.84± 37.28   | 435.21± 25   | 361.84± 15.24 | 383.36± 30.20 | 351.41      |

Todos los compuestos con bajo contenido de vinilos muestran un aumento en el módulo elástico con respecto a la referencia denotada como P1\_0PHR. Sin embargo, se observa una disminución del módulo entre las concentraciones de 5 a 30 PHR; dicho comportamiento es similar en los compuestos con alto contenido de vinilos donde el máximo incremento en el módulo elástico se obtiene en el compuesto P2\_15PHR y disminuye conforme se incrementa la concentración de partículas de sargazo. En la figura 3.4 se presentan las gráficas esfuerzo vs deformación de los compuestos con bajo y alto contenido de vinilos respectivamente.





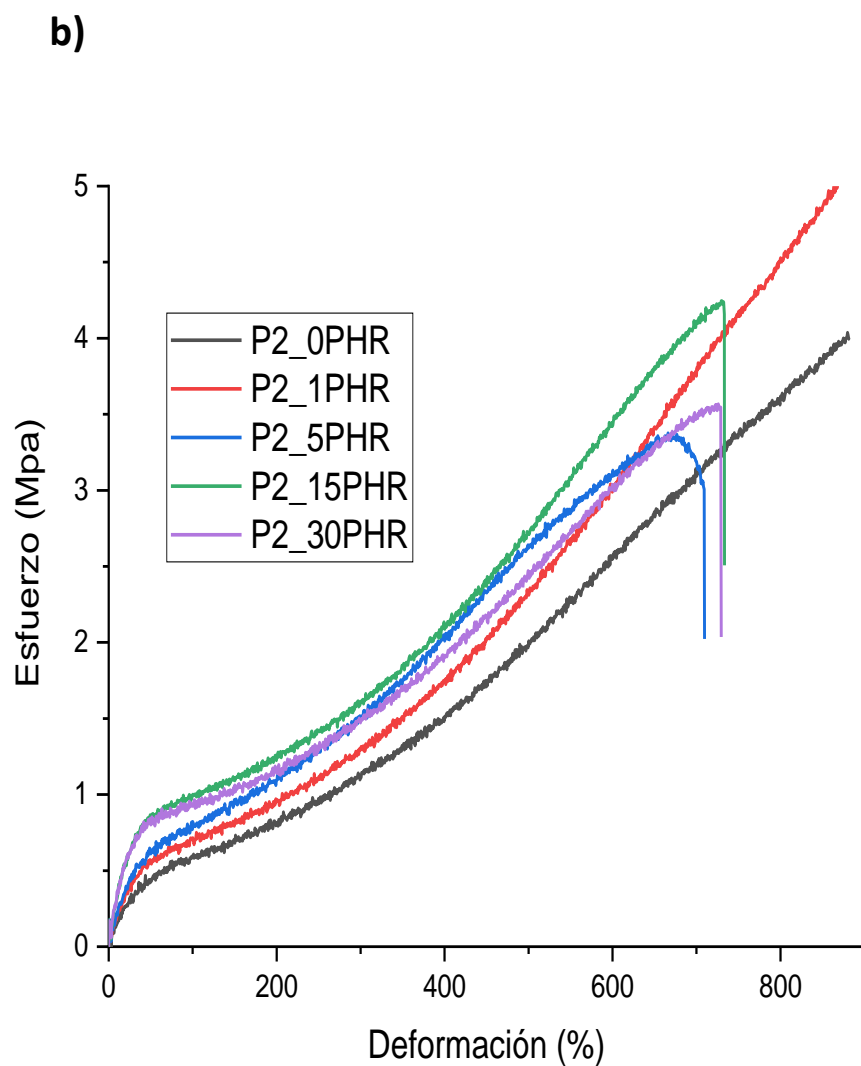


Figura 3.4 Gráfica esfuerzo vs deformación a) P1 (bajo contenido de vinilos) b) P2 (alto contenido de vinilos).

Por otra parte, la figura 3.5 muestra los resultados de la adición de PS a la matriz polimérica para los parámetros del módulo de Young, elongación a ruptura y la extensión a la fluencia.

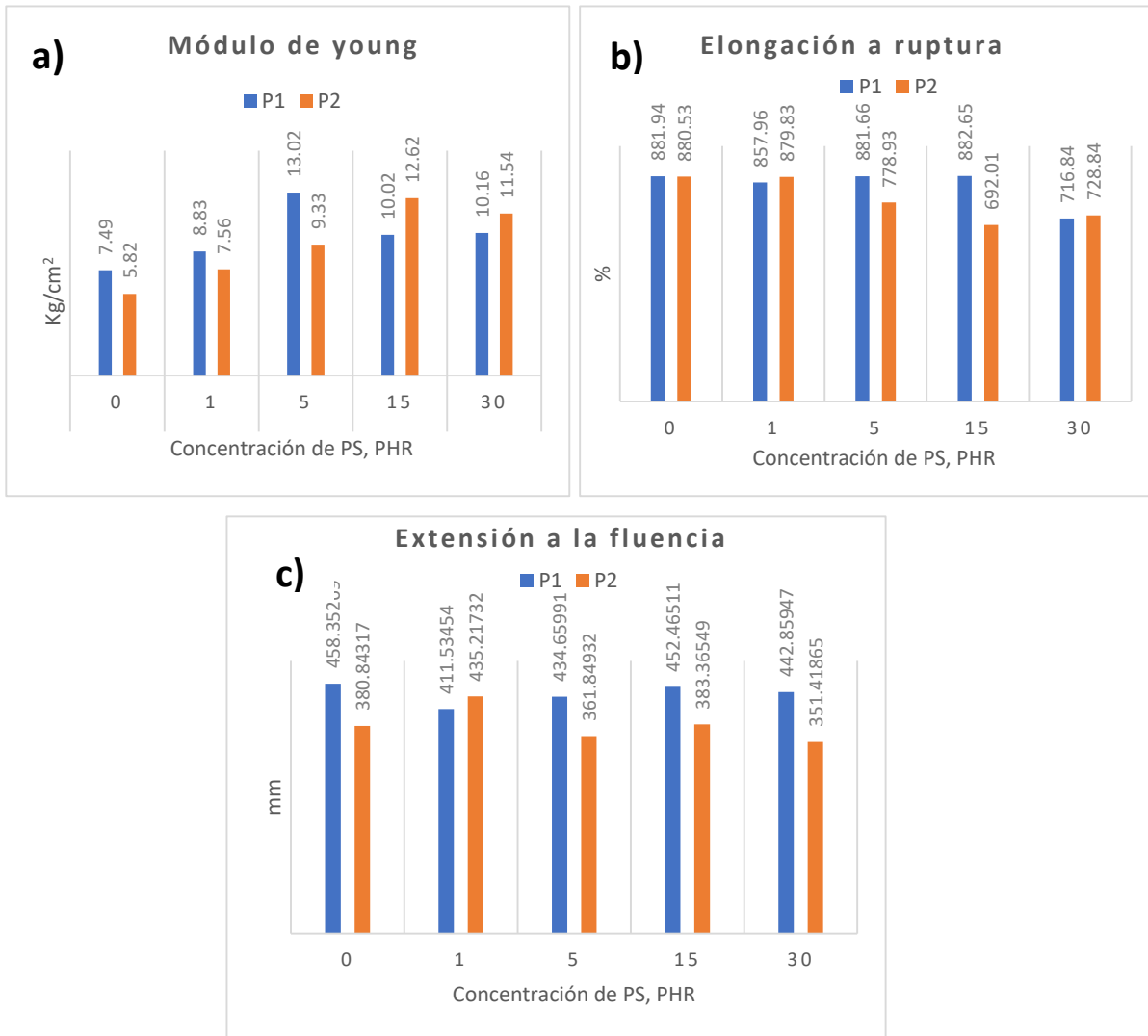


Figura 3.5 Resultados de pruebas mecánicas, a) Módulo de Young, b) Elongación a ruptura, c) extensión a la fluencia

La figura 3.5 a) representa al módulo de Young, se observa que para todas las concentraciones hay un incremento en el módulo de Young con respecto a la matriz sin reforzar lo que representa un aumento en la rigidez del material, sin embargo, a partir de la concentración de 5PHR para el polímero de bajo contenido de vinilos y 15 PHR para el polímero de alto contenido de vinilo el parámetro de módulo de Young decrece.

Dicho comportamiento se puede atribuir a que el aumento del contenido de PS forma aglomeraciones debilitando la adherencia interfacial con la matriz y a su vez provocando más puntos de falla. Situación similar a la analizada por Mujal-Rosas y colaboradores, en su estudio donde se determinó que el contenido de GTR entre el 5% al 10% debilita la compatibilidad matriz-refuerzo y disminuye la rigidez del material, sin importar el tamaño de partícula. [36]

Un comportamiento similar se puede observar en la figura 4.5 b) elongación a la ruptura, al incrementar el contenido de PS en la matriz las propiedades no mejoran. En general, se observa un mejor comportamiento mecánico en el polímero con menor contenido de vinilos probablemente debido al efecto estérico de la molécula de vinilo.

Se estableció un análisis de la varianza (ANOVA) de los datos obtenidos en la determinación del módulo de Young con la intención de encontrar la relación entre esta propiedad y la variación de la concentración de partículas de sargazo en los materiales. Los datos recopilados se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Datos recopilados para módulo de Young.

| <b>CONCENTRACION<br/>(PHR)</b> | <b>PROBETA<br/>1</b> | <b>PROBETA<br/>2</b> | <b>PROBETA<br/>3</b> | <b>PROBETA<br/>4</b> | <b>PROBETA<br/>5</b> | <b>PROBETA<br/>6</b> | <b>Yi.</b> |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| <b>0</b>                       | 5.82                 | 6.94                 | 6.25                 | 7.11                 | 6.66                 | 5.82                 | 38.6       |
| <b>1</b>                       | 8.05                 | 7.56                 | 8.85                 | 8.42                 | 8.79                 | 8.05                 | 49.7       |
| <b>5</b>                       | 7                    | 11.25                | 10.92                | 9.33                 | 6.69                 | 7                    | 52.2       |
| <b>10</b>                      | 8.45                 | 8.69                 | 7.49                 | 9.02                 | 8.79                 | 8.45                 | 50.9       |
| <b>15</b>                      | 15.9                 | 22.07                | 7.53                 | 6.39                 | 21.66                | 15.9                 | 89.5       |
| <b>20</b>                      | 8.15                 | 17.53                | 8.13                 | 18.64                | 7.33                 | 8.15                 | 67.9       |
| <b>25</b>                      | 54.37                | 11.32                | 103.99               | 27.38                | 35.1                 | 54.37                | 287        |
| <b>30</b>                      | 18.08                | 13.49                | 5.81                 | 17.34                | 23.23                | 18.08                | 96         |
|                                |                      |                      |                      |                      |                      |                      | Yi.. 141   |

El análisis de varianza se realizó en Excel teniendo en cuenta un factor y ocho niveles que corresponden al incremento en la concentración de partículas de sargazo. Los resultados se muestran en las tablas 3.6.

Tabla 3.6 Resultados de análisis ANOVA para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>   | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> | <b>INFLUYE:</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|
| Entre grupos                     | 1875.905027              | 7                         | 267.9864324                      | 1.86130098 | 0.09710596          | 2.20743604                  | <b>SI</b>       |
| Dentro de los grupos             | 6910.945029              | 48                        | 143.9780214                      |            |                     |                             |                 |
| Total                            | 8786.850055              | 55                        |                                  |            |                     |                             |                 |

Tabla 3.7 Resultados de análisis ANOVA para compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>    | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> | <b>INFLUYE</b> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|----------------|
| Entre grupos                     | 7725.890225              | 7                         | 1103.698604                      | 2.124149491 | 6.7771E-06          | 2.249024325                 | <b>SI</b>      |
| Dentro de los grupos             | 5715.5735                | 40                        | 142.8893375                      |             |                     |                             |                |
| Total                            | 13441.46373              | 47                        |                                  |             |                     |                             |                |

Donde el origen de las variaciones entre los grupos se refiere a los porcentajes de mezcla y dentro de los grupos se refiere al error de lo que no se puede explicar entre los porcentajes, F o número Fisher es el cociente entre los promedios de los cuadrados y como es mayor a 1, significa que efectivamente los distintos niveles del factor no producen el mismo efecto en la variable respuesta, lo que indicaría que la concentración de partículas de sargazo influye directamente en el módulo de Young es decir, afecta la resistencia mecánica del material.

### 3.4 Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

El análisis mecánico dinámico, DMA por sus siglas en inglés, se puede definir como la aplicación de una carga oscilatoria en una muestra de material, es una técnica útil para determinar las propiedades viscoelásticas de los materiales. En la figura 3.6 se muestran los resultados de la Tan delta y del módulo de almacenamiento vs Temperatura, para el P1 de bajo contenido de vinilos. En la figura 36a, se muestra la  $T_g$  (pico máximo de la tan delta) de los compuestos P1/PS, se observan como varia la  $T_g$  hasta un 8.9% con respecto a la referencia en relación a la adición de las partículas de sargazo, sin embargo, esto presenta un cambio máximo hasta la adición de 10phr de PS. El bloque suave correspondiente al PB (polibutadieno) del copolimero SBS (-71.6°C) presenta también una variación en la intensidad del pico de la Tan delta con la variación de la concentración de las PS, la disminución del valor de la Tan delta indica una menor capacidad de amortiguación del compuesto, lo que implica una menor capacidad para absorber y disipar energía durante las deformaciones dinámicas, además de ser más evidente los cambios en ese pico, esto es indicativo de la mejor interacción de las partículas hacia el bloque del polibutadieno.

Es importante mencionar que el factor de amortiguamiento, también conocido como tan delta ( $\tan \delta$ ) representa el cociente entre el módulo de almacenamiento y el módulo viscoso ( $E'/E''$ ), este indica la capacidad de compatibilidad entre la matriz y la fibra en un compuesto. Un valor bajo de  $\tan \delta$  sugiere una buena adhesión entre la matriz y las PS. <sup>[39]</sup>

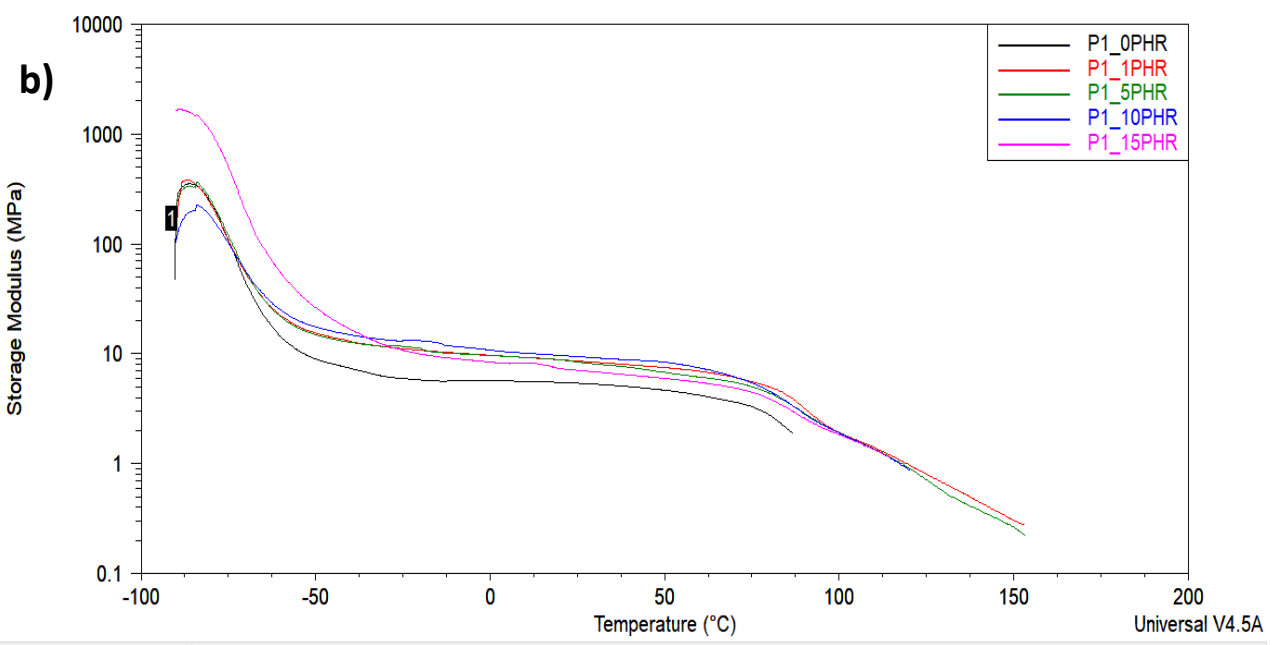
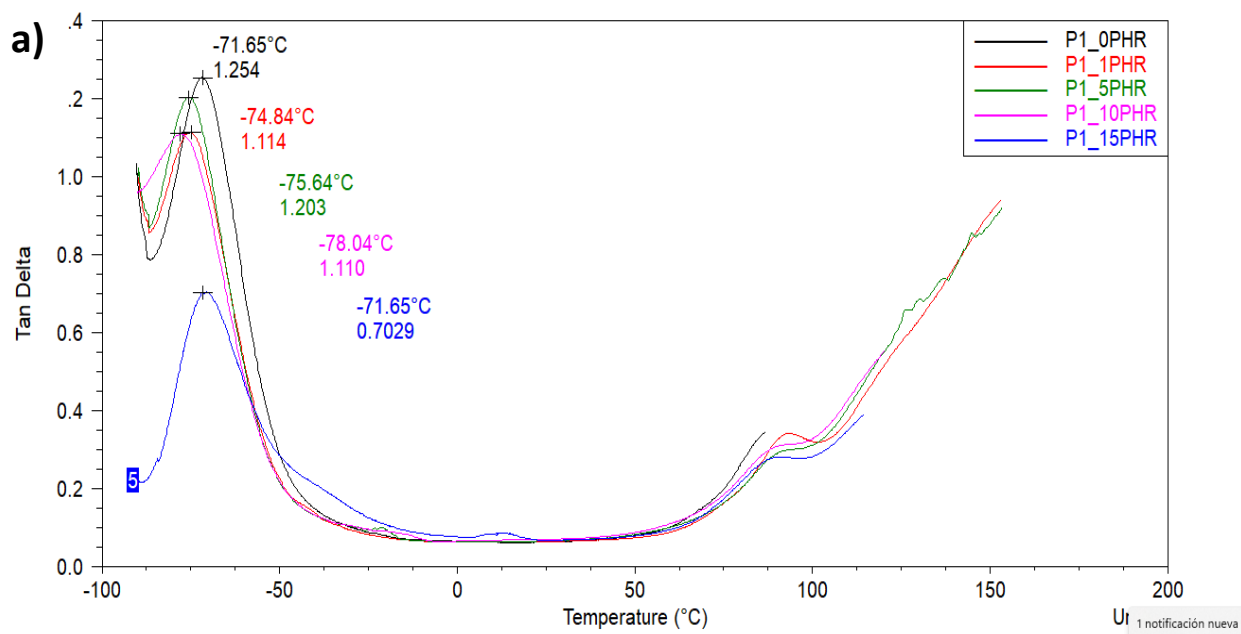
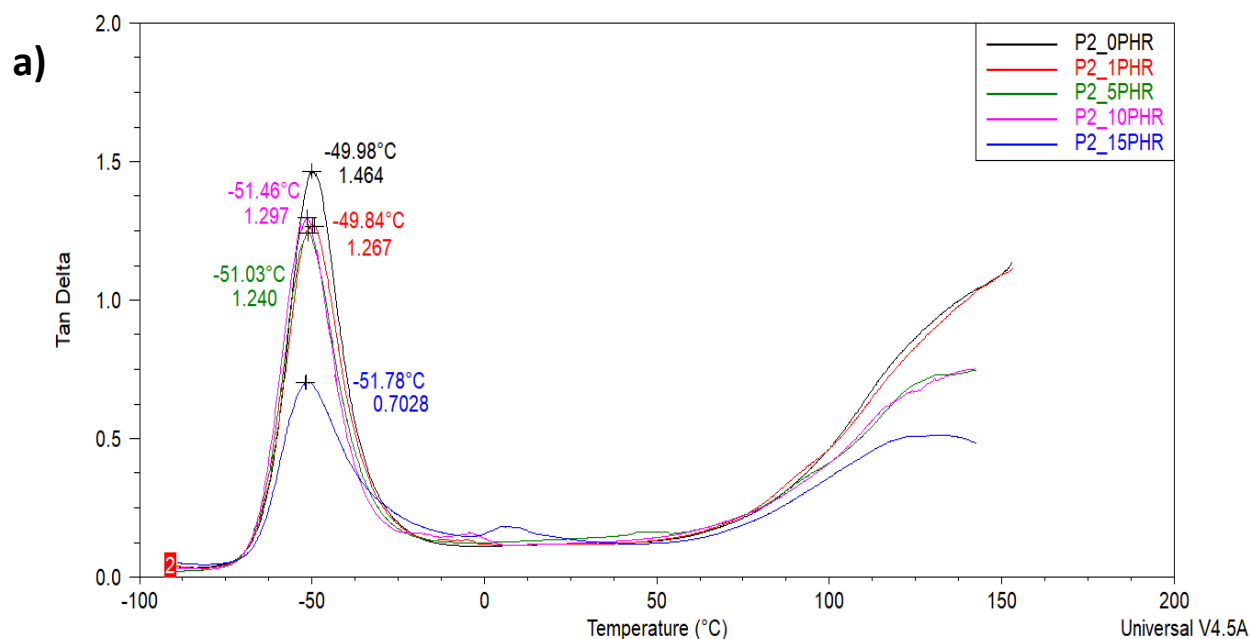


Figura 3.6 Resultados DMA para P1 (bajo contenido de vinilos), a) Tan  $\delta$  vs Temperatura  
 b) Módulo de almacenamiento vs Temperatura

En la figura 36b, se puede observar cómo el módulo de almacenamiento ( $E'$ ) disminuye a medida que aumenta la temperatura, lo que indica una disminución en la rigidez del material. Un valor alto de  $E'$  indica que el material es más rígido debido

a la adición de las PS. Se puede apreciar que con la adición de 1phr de las PS, hay un cambio significativo en el valor de E' (250%) en comparación con la referencia. Este cambio es particularmente evidente en la región del plateau (-50 a 75°C). Además, se observa una segunda transición que indica una relajación térmica del compuesto a temperaturas más altas. [38]

Asimismo, la figura 3.7a y b, muestra los resultados para Tan  $\delta$  y modulo elástico vs Temperatura respectivamente, para los compuestos P2 de alto contenido de vinilos.



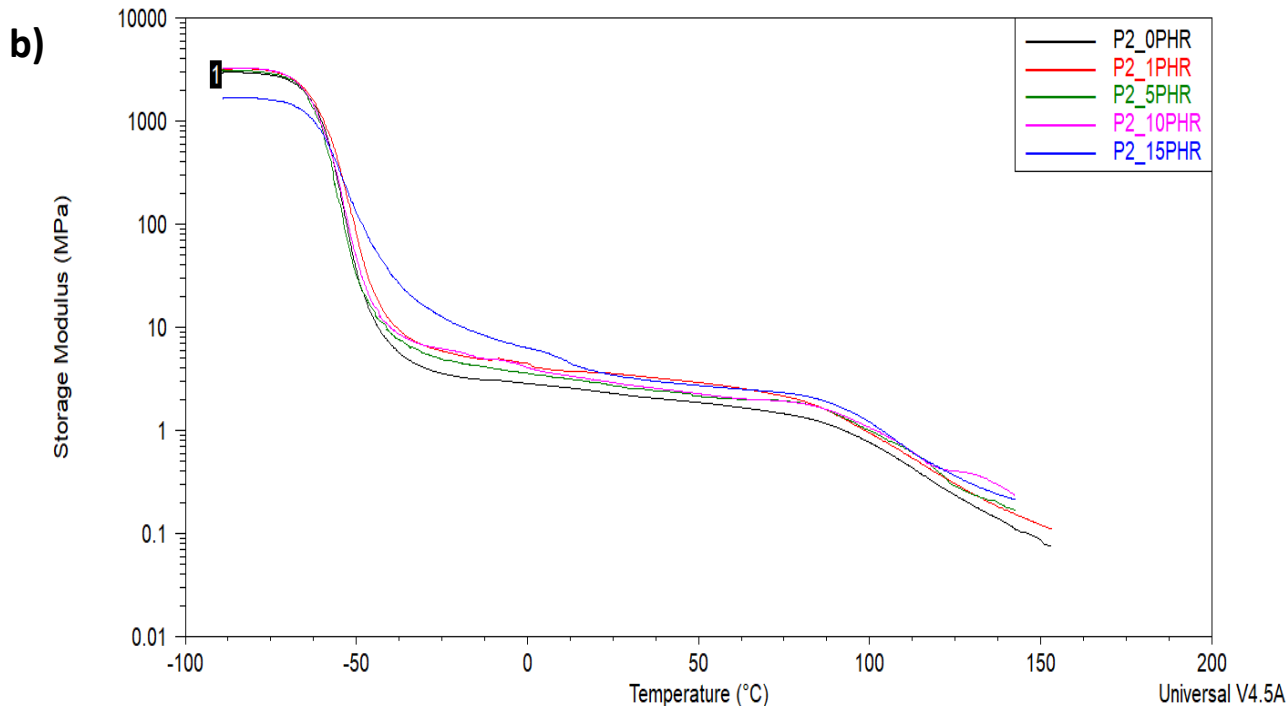


Figura 3.7 Resultados DMA para P2 (alto contenido de vinilos), a)  $\tan \delta$  vs Temperatura  
 b) Módulo de almacenamiento vs Temperatura.

El parámetro de  $\tan \delta$ , relaciona directamente los movimientos moleculares de las cadenas constituyentes del material a medir. La  $\tan \delta$  también es útil para determinar el punto de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). [39]

En la figura 3.7 a) donde se analiza la  $\tan \delta$  de los compuestos SBS/PS con alto contenido de vinilos y se observa que en todos los casos la  $T_g$  aumenta ligeramente conforme se adiciona mayor contenido de PS.

Otra característica importante del parámetro  $\tan \delta$  es que su forma (anchura y alto) proporciona información referente al grado de dispersión de las partículas en la matriz, un pico ancho y de poca altura es señal de una menor homogeneidad del compuesto. En el caso de los compuestos con menor cantidad de contenido de vinilos se observa que la formulación con mejor homogeneidad es la de 5PHR mientras que para los compuestos con alto contenido de vinilos el mejor resultado es para la formulación de 10 PHR. Para ambos compuestos P1 y P2, la formulación que mostró una peor dispersión de partículas en la matriz es para 15PHR.



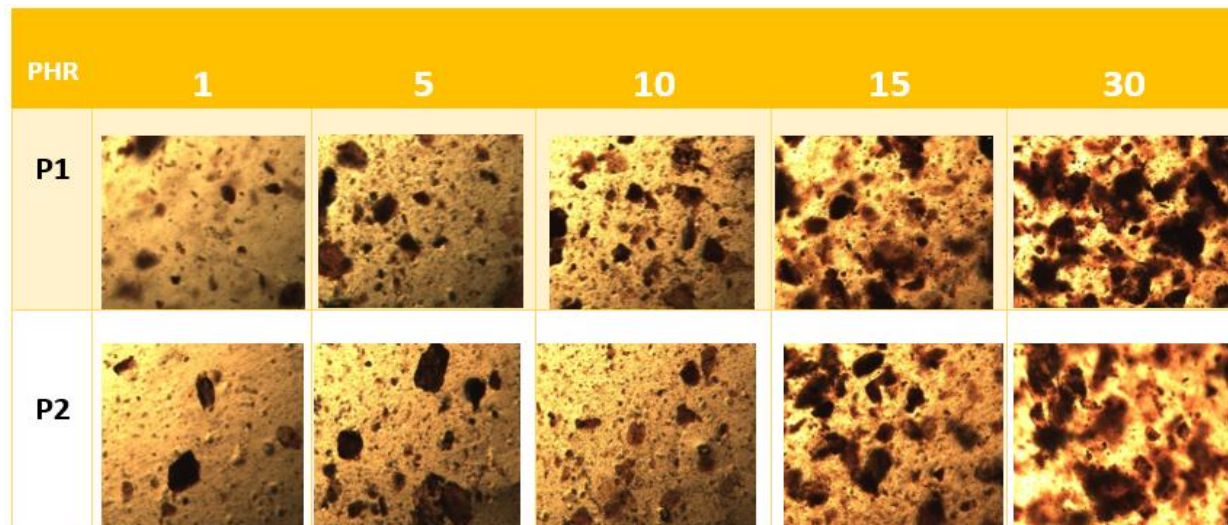
Este comportamiento es similar al reportado por Castillo-Castillo y colaboradores, en su investigación de refuerzo de SBS con partículas de queratina, donde se menciona que a mayor concentración de partículas la homogeneidad de los compuestos disminuía. [38]

### 3.5 Microscopías

#### 3.5.1 Microscopía óptica

La morfología de la superficie de los compuestos SBS/PS se muestran en la Tabla 3.8. La fase continua representada por la matriz polimérica SBS resalta en comparación a la fase discontinua la cual se visualiza oscura y es correspondiente a las PS.

Tabla 3.8 Resultados de microscopía óptica de los compuestos SBS/PS



Es notorio que la dispersión de partículas de sargazo en la matriz polimérica no es homogénea y que se presenta una morfología y un tamaño irregular en las mismas; además se observa que a mayor adición de PS a la matriz hay una tendencia de las partículas a formar aglomeraciones, observándose una sobresaturación de partículas en la matriz notoria para las altas concentraciones. Esto se relaciona con los resultados de los ensayos mecánicos y mecánicos dinámicos y corrobora el motivo por el cual la adherencia superficial es más deficiente a mayores concentraciones de refuerzo.

Sin embargo, a menores concentraciones aun con una dispersión irregular se logra un acoplamiento entre las PS y la matriz SBS capaz de reforzarla eficientemente.

### 3.5.2 Microscopía SEM

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestran los resultados de la microscopia electrónica de barrido para la concentración de 15phr en los compuestos SBS/PS de bajo y alto contenido de vinilos respectivamente

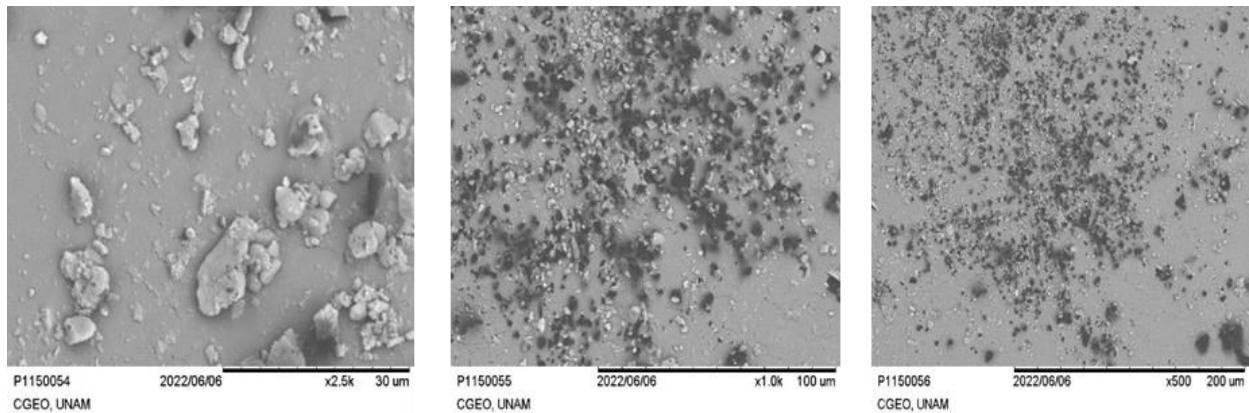


Figura 3.8 Microscopías SEM para compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos.  
a) 30 μm b) 100 μm c) 200 μm

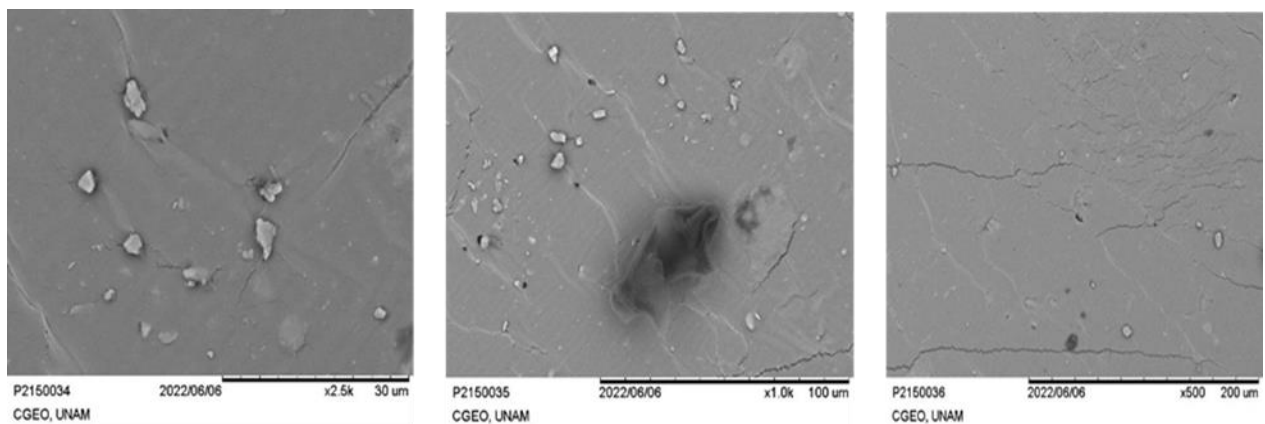


Figura 3.9 Microscopías SEM para compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos  
a) 30 μm b) 100 μm c) 200 μm

Se tomó como muestra representativa la concentración de 15phr de PS dado a que se obtuvo una mejor visión en las imágenes en dicha concentración. Las microscopías SEM de los compuestos con bajo contenido de vinilos confirman los resultados obtenidos en la microscopía óptica. Se observa que el refuerzo se encuentra adherido a la matriz de forma, tamaño y dispersión irregular lo que genera puntos de falla en el material que son significativos en las pruebas mecánicas de tensión. En el caso de los compuestos con alto contenido de vinilos además es posible observar grietas en el material.

### 3.6 Pruebas de envejecimiento

#### 3.6.2 Hidro envejecimiento

La figura 3.10 se muestran los resultados del experimento para el material con bajo contenido de vinilos y los compuestos P1\_15PHR y P1\_30PHR.

En la prueba de cuantificación de peso se observa que para los compuestos con bajo contenido de vinilos el comportamiento es similar entre las diferentes concentraciones. El material sin reforzar aumenta su peso conforme pasan las horas sin embargo este aumento de peso es mayor en los compuestos. Se observa que conforme aumenta la concentración de PS los materiales tienden a absorber mayor cantidad de humedad y por ende aumentar su peso.

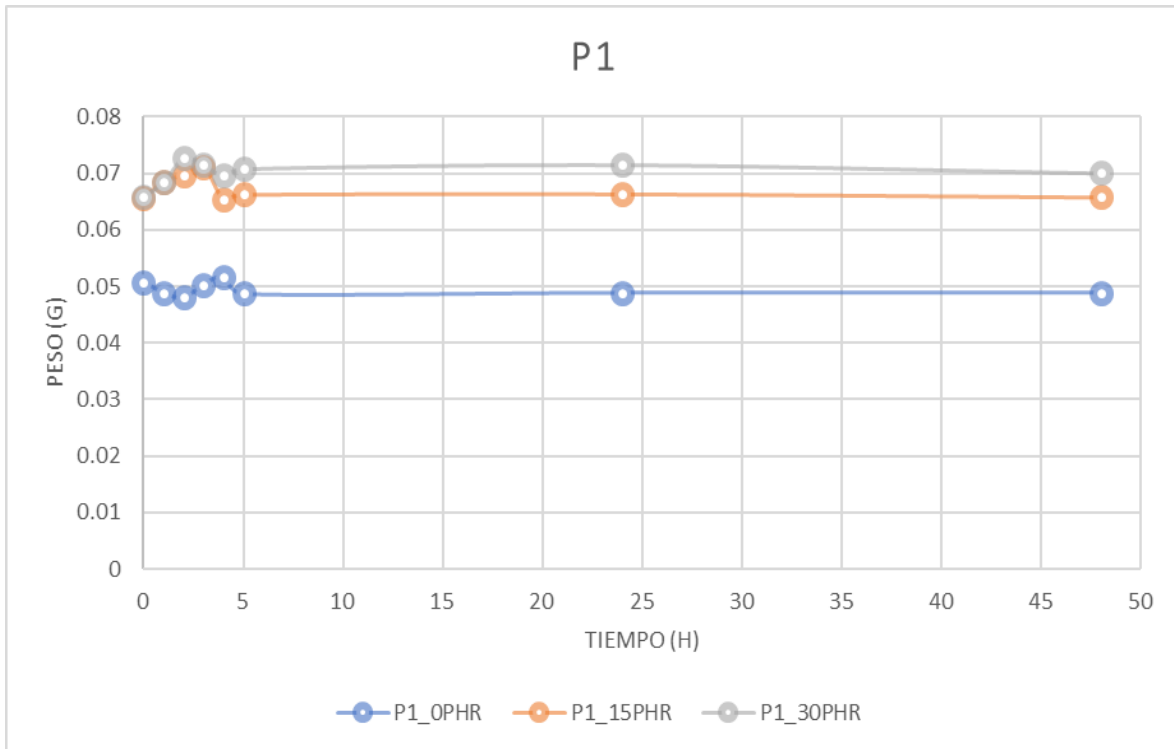


Figura 3.10 Resultados de diferencias de peso respecto al tiempo de los compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos.

En la figura 3.11 se muestran los resultados del experimento para el material con alto contenido de vinilos y los compuestos P2\_15PHR y P2\_30PHR.

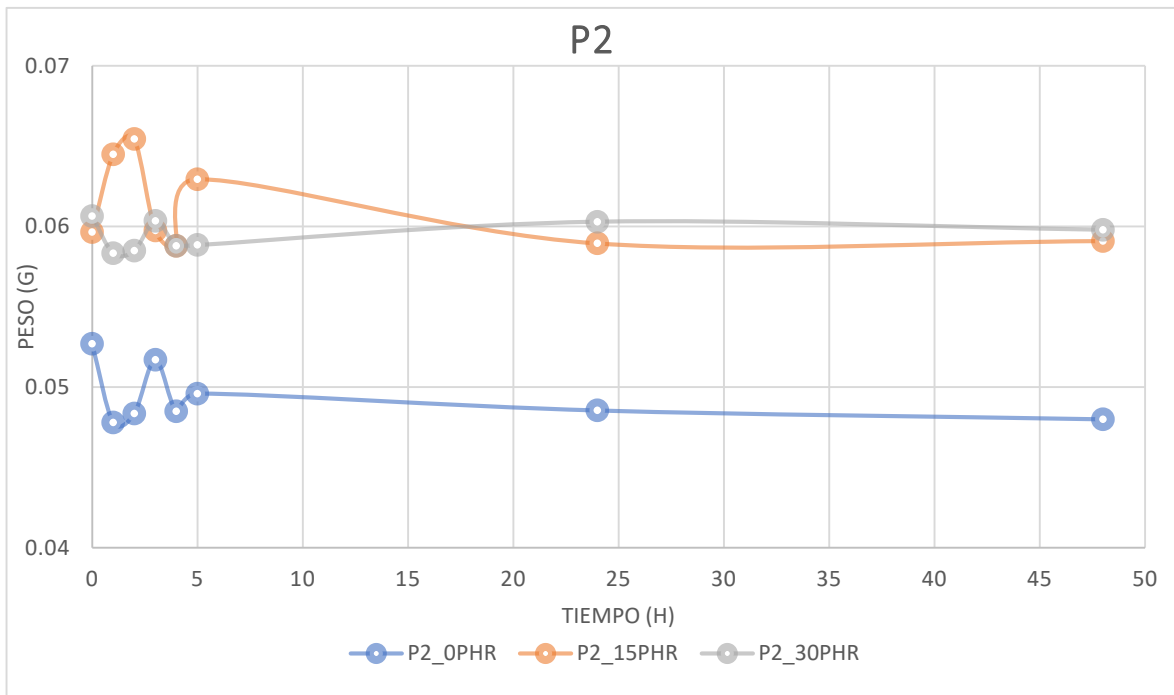


Figura 3.11 Resultados de diferencias de peso respecto al tiempo de los compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos.

El patrón de comportamiento en este caso se observa sin homogeneidad entre la pérdida y ganancia de peso. Durante las primeras horas en los compuestos se visualiza una ganancia de peso, probablemente causada a la capacidad de retención de humedad de las partículas de sargazo. Posteriormente hay una disminución del peso que se mantiene constante hasta las 48 h, contrario a el comportamiento del material sin reforzar el cual si muestra una disminución del peso. Se puede interpretar que las partículas de sargazo mejoran la hidrodegradación del material.

### 3.6.3 Foto envejecimiento

La figura 3.12 muestran los resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilos respectivamente sometidos a la prueba de foto envejecimiento hasta 48 hrs

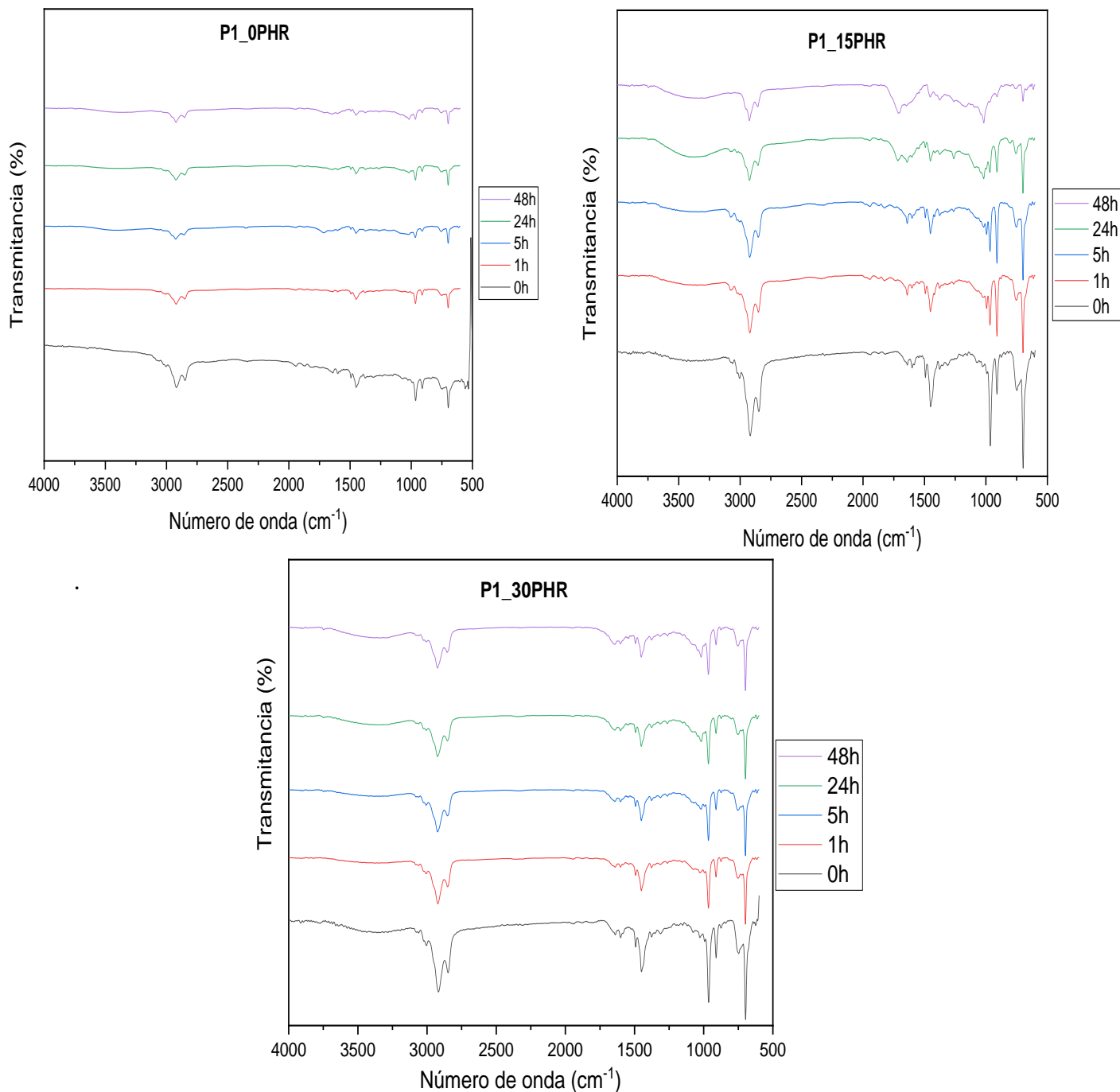


Figura 3.12 Resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de bajo contenido de vinilo sometidos a foto envejecimiento. a) 0 PHR b) 15 PHR c) 30 PHR

La formulación donde se observa un cambio más evidente fue la de 15PHR donde las primeras 5 horas solo se disminuyen en intensidad las bandas, después de las

24h es cuando se nota un cambio más evidente en el espectro donde es evidente que existe una degradación en el material.

La figura 3.13 muestra los resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilos respectivamente sometidos a la prueba de foto envejecimiento hasta 48 hrs.

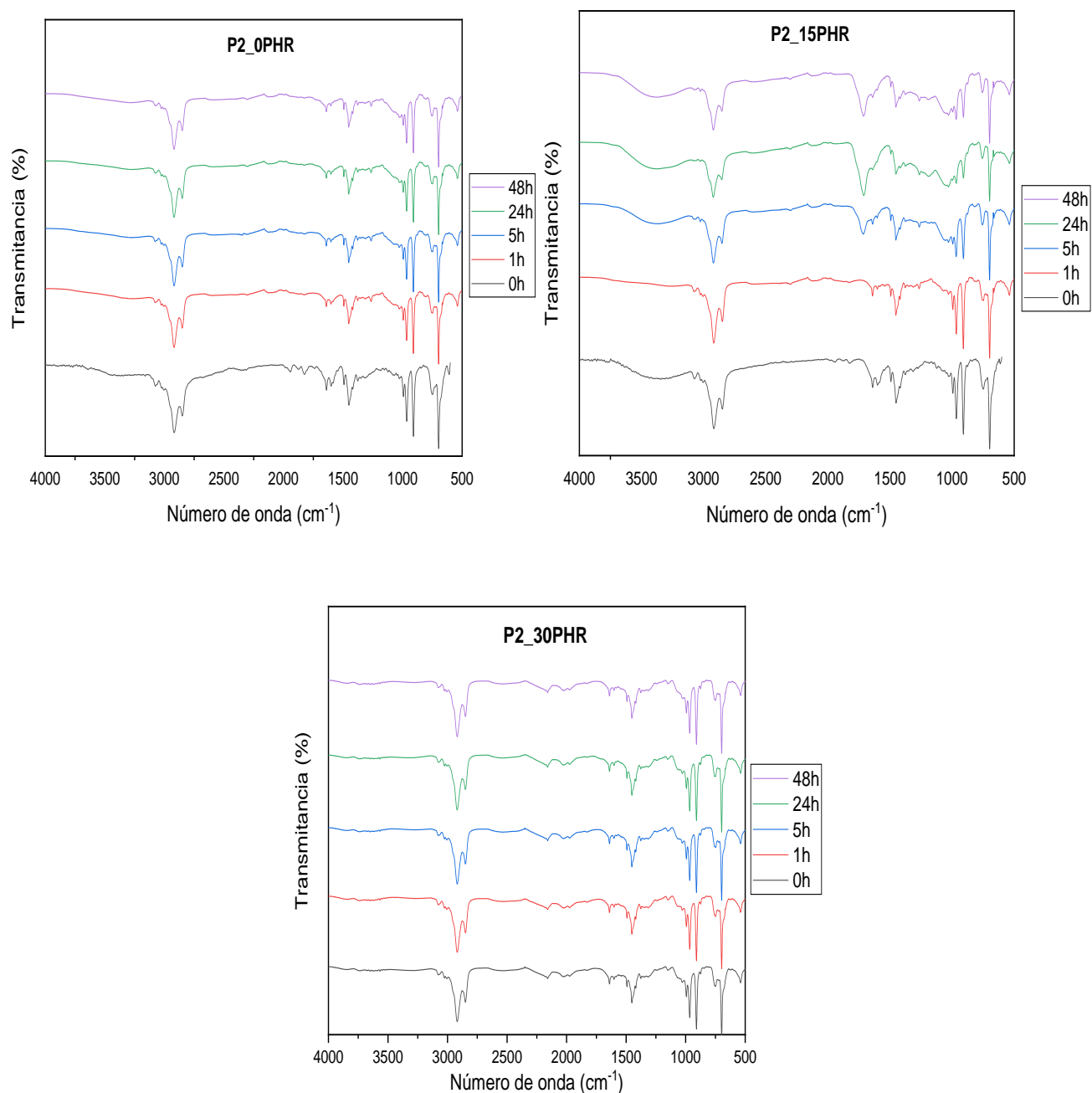


Figura 3.13 Resultados FTIR de los compuestos SBS/PS de alto contenido de vinilo sometidos a foto envejecimiento. a) 0 PHR b) 15 PHR c) 30 PHR

El espectro del polímero sin reforzar no muestra cambios significativos ante la radiación, mismo comportamiento sucede con el polímero reforzado con 30PHR de PS. Este comportamiento no es igual en los compuestos reforzados con bajas concentraciones de PS donde a partir de las 24 h de exposición a la radiación hay cambios en el espectro. Los materiales reforzados en bajas concentraciones aceleran la foto degradación del material.

### 3.7 Índice de Fluidez

La figura 3.14 resume las composiciones de los diferentes compuestos y su cambio de MFI, para esta evaluación se utilizó la norma ASTM D1238 a condiciones de 200°C y 5Kg, para evitar degradación del material. El contenido de PS en los compuestos P1\_PS y P2\_PS afecta linealmente el índice de fluidez. En el caso de los compuestos P1\_PS, se observa una reducción del índice de fluidez a partir de 1phr de PS, mientras que en los compuestos P2\_PS, esta reducción ocurre a partir de 5phr de PS. Esta disminución en el índice de fluidez se debe a la adición de las PS a la matriz polimérica, debido a que aumenta la densidad del material y genera una menor fluidez en el compuesto.

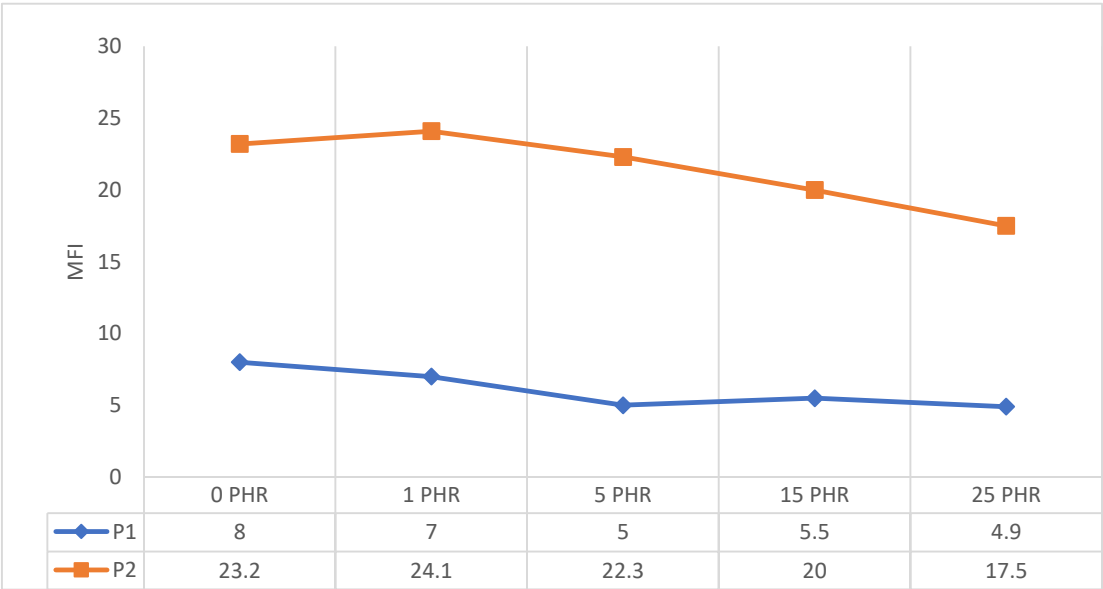


Figura 3.14 Resultados del índice de fluidez para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos



En el caso de los compuestos de bajo contenido de vinilos (P1) con diferentes concentraciones de PS, presenta una disminución del MFI con respecto al valor del compuesto sin reforzar. En los compuestos de alto contenido de vinilos (P2) y PS el MFI incrementa un 4% de su valor para el compuesto con 1phr de concentración de PS con respecto a la referencia y disminuye para todas las concentraciones posteriores a estas. de partículas de sargazo. <sup>[40]</sup>

### 3.8 Abrasión

La finalidad de este ensayo es obtener el grado de desgaste del material compuesto cuando éste se somete en condiciones estandarizadas de abrasión con otra superficie.

La superficie del material, al ser un elastómero termoplástico, y ser sometido a la abrasión comienza por generar pequeñas grietas en dirección perpendicular a donde se está sometiendo el lijado. A medida que los ciclos de lijado se repiten dichas grietas van aumentando hasta que se generan los llamados patrones de abrasión. Estos patrones van aumentando en tamaño y separación hasta mantener una configuración. La figura 3.15 muestra los resultados de la prueba de abrasión con referencia en la norma DIN 53516 que se realizaron a los compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos. En la figura 3.15 se presenta una mejora en la prueba de la resistencia a la abrasión, presentando un incremento del valor de esta propiedad al aumentar la concentración de PS, con respecto a la matriz de referencia.

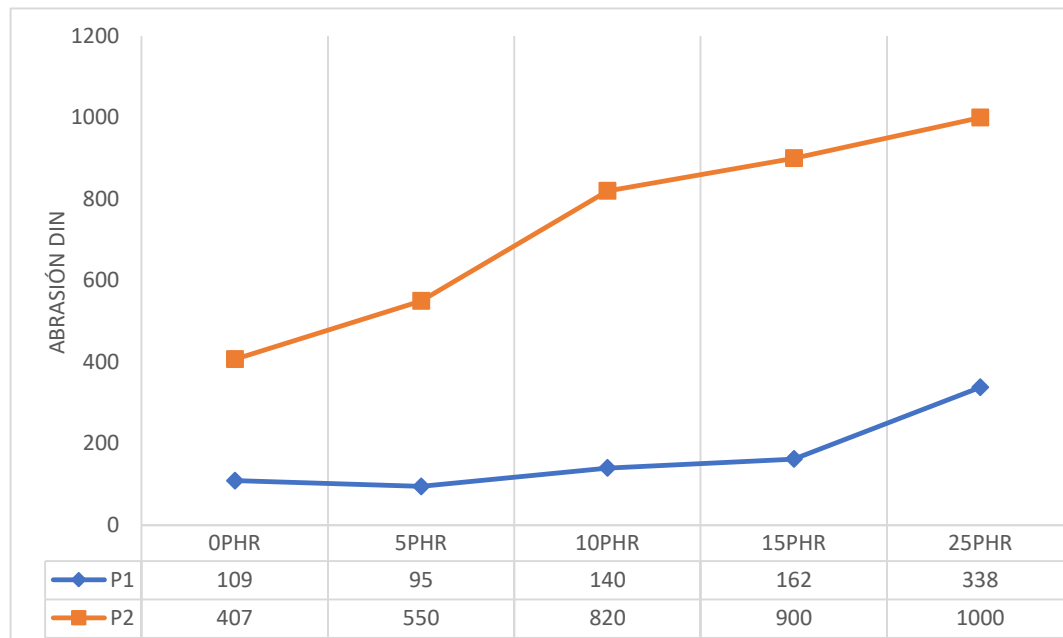


Figura 3.15 Resultados del ensayo de abrasión DIN para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos.

Excepto por la concentración de 5PHR que muestra una ligera disminución del índice de abrasión y con ello una mejora en la propiedad, todas las formulaciones exhiben cifras más altas que representan una mayor pérdida de caucho, lo que significa que hay una menor resistencia a la abrasión <sup>[41]</sup>. Maya J. y col, concluyeron que la variación de la resistencia a la abrasión disminuye con la carga. También se observa que los materiales compuestos modificados químicamente son menos propensos al desgaste. <sup>[42]</sup>

### 3.9 Dureza Shore A

La figura 3.16 exhibe los resultados para el ensayo de dureza shore A realizados a los compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos.

En los compuestos con bajo contenido de vinilos (P1\_PS) la prueba de Dureza Shore A presenta valores superiores con respecto al del material sin refuerzo, lo que indica que los materiales reforzados son más duros que el material original. Esto se infiere, porque se

presenta un incremento del valor de Dureza shore A con el incremento de la concentración de las PS. Sin embargo, el cambio de los valores de la dureza Shore A no presenta cambios significativos con respecto a la concentración de las PS en el compuesto.

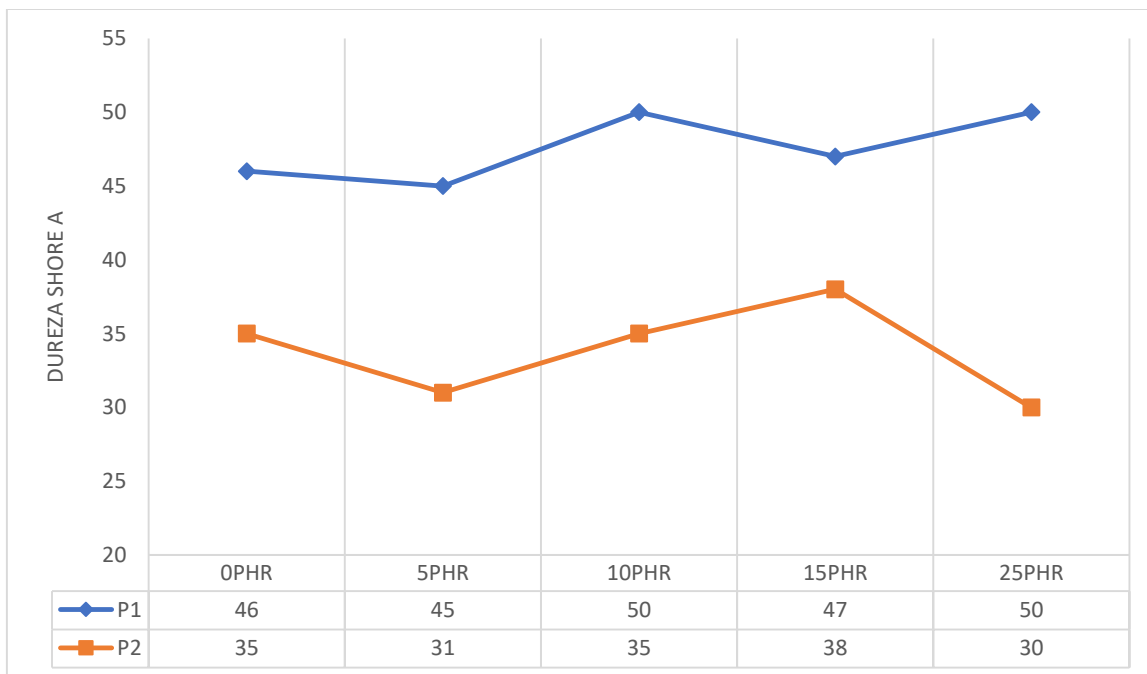


Figura 3.16 Resultados del ensayo de Dureza Shore A para compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos.

Respecto a los compuestos con alto contenido de vinilos (P2\_PS), los compuestos reforzados con 5PHR y 25PHR de partículas de sargazo, disminuyen la dureza Shore A con respecto al material original, lo que indica que son materiales más blandos, caso contrario a las formulaciones con los compuestos P1\_PS a 10PHR y 15 PHR que respectivamente iguala y aumenta la dureza del material sin reforzar. Es importante mencionar que, los valores presentados en esta investigación no son significativos debido a que la norma DIN 53505 permite una variación hasta de  $\pm 5$  puntos de dureza. Este parámetro al aumentar la concentración de PS, presenta una variación considerada como estable, dando seguridad en la aplicación del material, debido a que no implicaría cambios en la formulación.

Nelson Castaño en el 2012, estudio el efecto de los vulcanizados de EPDM reciclado en EPDM puro presenta la misma tendencia en el valor de la dureza Shore

A manteniendo estable el valor todas las mezclas, no presentando una variación mayor de  $\pm 5$  puntos como lo marca la norma DIN 53505, por lo que se considera que la dureza Shore A también se mantuvo constante <sup>[42]</sup>. Los compuestos de hule natural con 4% de fibras de sisal presenta un máximo de la propiedad esto es atribuido al tratamiento de la superficie de las fibras con silanos<sup>[42]</sup>.



# **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Con base en los resultados obtenidos de las diferentes caracterizaciones realizadas a los compuestos SBS/PS con bajo y alto contenido de vinilos se puede concluir que el análisis FTIR al material sin reforzar y a los compuestos permitió identificar la señal atribuida a la molécula de vinilo correspondiente al polibutadieno constituyente del SBS para poder dar énfasis en la variación de estos y observar cómo afecta en el comportamiento viscoelástico de los materiales compuestos.

La caracterización por TGA denota que hay una mejora en la estabilidad térmica de los materiales compuestos en relación a la matriz sin reforzar, siendo los compuestos P1\_1PHR Y P1\_15PHR los que obtienen una mejor respuesta ante la degradación térmica. Además, el DTGA muestra que la banda de temperatura máxima de degradación térmica del material sin reforzar es superada por la temperatura máxima de degradación de todos los compuestos sin importar la variación en la cantidad de vinilos en las matrices poliméricas, lo que confirma que la adición de PS al SBS mejora la estabilidad térmica del SBS.

El ensayo de tracción mostró que todos los compuestos SBS/PS de alto y bajo contenido de vinilos mejoran la resistencia mecánica en comparación a los materiales SBS sin reforzar, a pesar de esto se observaron mejores resultados mecánicos en los compuestos con bajo contenido de vinilos, probablemente esto se deba al efecto estérico de la molécula de vinilo.

Los resultados en DMA resaltan que hay un aumento en el módulo de almacenamiento y un incremento en la temperatura de transición vítrea que es más notable en los compuestos de bajo contenido de vinilo. Además, la anchura y alto del pico de la Tan Delta da una referencia de la dispersión de las partículas en la matriz polimérica dando como resultado que la peor dispersión se da a partir de la concentración de 15PHR sin importar la variación del contenido de vinilos en las matrices, lo que confirma que a mayor concentración de partículas la homogeneidad en la dispersión de las mismas disminuye.

Lo anterior se comprueba en las microscopías óptica y SEM realizadas a los compuestos, donde fue posible observar que a mayores concentraciones de partículas en la matriz se generaban aglomeraciones lo que representa una

debilidad en la adherencia superficial y puede actuar como puntos de falla que afectaron en los resultados de las pruebas mecánicas.

Los resultados de las pruebas de envejecimiento no arrojaron información significativa respecto a la degradación del material cuando se expone a condiciones medio ambientales, sin embargo, la realización de esta prueba dejó ver que el material compuesto mantiene propiedades de degradación similares a la del material original, lo cual es favorable para sus posibles aplicaciones industriales.

Las pruebas de abrasión evidencian que el material más resistente es y el análisis de dureza shore A señala que los compuestos más blandos son los de alto contenido de vinilos.

Todos los resultados llevan a la conclusión de que es posible reforzar una matriz SBS con partículas de sargazo eficientemente para mejorar sus propiedades termo mecánicas siempre y cuando las concentraciones de partículas sean bajas para evitar sobre saturaciones. La diferencia en el contenido de vinilos de las matrices involucradas en esta investigación si afectó ya que todos los resultados son mejores en los compuestos de bajo contenido de vinilos a pesar de que los compuestos de alto contenido de vinilos también muestran mejores resultados en comparación al SBS sin reforzar.

Se recomienda continuar con la investigación realizando variaciones en la matriz experimental, disminuyendo concentraciones de partículas de sargazo o de aceite nafténico, así como probar la aplicación de estos nuevos compuestos principalmente orientados a la industria del calzado y adhesivos.



# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



1] Balam-Cocom, R. J.; Duarte-Aranda, S.; Canché-Escamilla, G; 2006. Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la "piña" de henequén. Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 5, núm. 1, pp. 39-44.

[2] Mendez-Hernandez Maria Leonor, Salazar-Cruz Beatriz Adriana, Rivera-Armenta José Luis, Estrada-Moreno Ivan Alziri y Chavez-Cinco Maria Yolanda; 2018. Preparation and characterization of composites from copolymer styrene-butadiene and chicken feathers. Polímeros, vol. 28(4), pp. 368-372.

DOI: 10.1590/0104-1428.08217

[3] Adefisan Olufemi O. y McDonald Armando. 2019; Evaluation of the strength, sorption and thermal properties of bamboo plastic composites. Maderas, Ciencia y tecnología vol.21 No.1.

DOI: 10.4067/S0718-221X2019005000101

[4] Bartos András, Kocs Judit, Anggono Juliana, Móczó János, Pukánszky Béla. 2021; Effect of fiber attrition, particle characteristics and interfacial adhesion on the properties of PP/sugarcane bagasse fiber composites. Polymer Testing vol. 98.

DOI: 10.1016/j.polymeresting.2021.107189

[5] Salazar-Cruz, Zapien-Castillo, Hernández-Zamora, Rivera-Armenta. 2020; Investigation of the performance of asphalt binder modified by Sargassum; Construction and Building Materials 271.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121876

[6] Cruz-Estrada R., Capul-Manzano C., Hernández-Rodríguez I., 2020; Obtención de un compuesto con sargazo y plástico recuperado, con aplicación potencial como material de construcción. Encuentro de Expertos en Residuos Sólidos, año 11, No.1.

[7] Escobar-Medina Francisco Javier, Rivera-Armenta José Luis, Hernández-Zamora Gabriel, Salazar-Cruz Beatriz Adriana, Zapién-Castillo Samuel y Flores-Hernández Cynthia Graciela; 2021. Sargassum-Modified Asphalt: Effect of Particle Size on Its Physicochemical, Rheological, and Morphological Properties 2021; Sustainability 13.

DOI: 10.3390/su132111734

[8] Martínez Reyes E., Salazar Cruz B. 2022. Efecto de la adición de partículas de coco modificadas químicamente sobre las propiedades termo mecánicas en matriz polimérica con SBS. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

[9] Kushwanth Theja K., Bharathiraja G., Sakthi Murugan V., A. Muniappan. 2021; Evaluation of mechanical properties of tea dust filler reinforced polymer composite. Materials Today: Proceedings vol. 47 part 19.

DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.213

[10] AIMPLAS; 2019. Tipos de materiales compuestos. Sitio web <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>

[11] Lees JK; 1968. A study of the tensile strength of short fiber reinforced plastics. Polymer Engineering & Science 8: 195-201

DOI: 10.1002/PEN.760080304

[12] Osswald, Tim A., Aquite, William, Ramírez, Daniel, López, Luisa, Puentes, John, Pérez, Camilo, García Rodríguez, Sylvana; 2012. Retos en la industria de procesamiento de plásticos y compuestos. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624956005>

[13] Billmeyer Jr. F. W; 1975. Ciencia de los polímeros. Barcelona, Editorial Reverté. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/tecnmcdmadero/117588>

[14] Mexpolimeros. ¿Qué son los polímeros y cómo se clasifican? Sitio web: <https://www.mexpolimeros.com/qu%C3%A9%20son%20los%20pol%C3%ADmeros%20y%20c%C3%B3mo%20se%20clasifican.html>

[15] Universidad Politécnica de Valencia; 2020. Materiales Poliméricos y Compuestos. Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales. Sitio web: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_1.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_1.html)

[16] Young, R J y P A Lovell; 2011. Introduction to Polymers, Third Edition. Polymer Science. Taylor & Francis. <https://books.google.com.mx/books?id=ImQg2MK8NtkC>.

[17] López Serrano Francisco, Mendizábal Eduardo; 2015. Introducción a la ciencia de los polímeros, primera edición. Universidad de Guadalajara, México.

[18] Helmenstine, Anne Marie, Ph.D ;2020. Block Copolymer Definition (Chemistry). Recuperado de <https://www.thoughtco.com/definition-of-block-copolymer-604834>

[19] Celanese So.F.TER. Elástomeros Termoplásticos. Sitio web, [http://www.softergroup.com/es/elast%C3%B3meros\\_termopl%C3%A1sticos](http://www.softergroup.com/es/elast%C3%B3meros_termopl%C3%A1sticos)

[20] Universidad del Sur de Mississippi; 1995. "Anionic Vinyl Polymerization", Departamento de Ciencias de Polímeros. Sitio web: <http://pslc.ws/spanish/anionic.htm>

[21] Rodríguez Ellen, Villegas Ernesto; 2012. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. Métodos y Materiales, volumen 2, noviembre 2012. pp. 25-26.

[22] Juárez David, Balart Rafael, Ferrándiz Santiago, García David; 2013. Estudio y análisis de los polímeros derivados del estireno-butadieno. 3 ciencias, revista de investigación

[23] Synthelast S, A. Compuestos SBS. Sitio web <http://www.synthelast.es/es/productos/17-materiales-para-el-calzado/compuestos-sbs>

[24] Bellas García Rosa María; 2012. Formulación y caracterización de materiales compuestos integrados por una matriz de caucho Estireno-Butadieno (SBR) reforzada con nanoarcilla. Tesis Doctoral. Universidad Da Coruña, España.

[25] Bocchini, S., Fukushima, K., Di Blasio, A., Fina, A., Frache, A., & Geobaldo, F.; 2010. Polylactic Acid and Polylactic Acid-Based Nanocomposite Photooxidation. Biomacromolecules, 11, 2919–2926.

[26] Caballero Vázquez J. Adán, Acosta González Gilberto y Hernández Zepeda Cecilia. El sargazo, un fenómeno complejo; 2020. Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencia: México ante el Sargazo, volumen 71 número 4. Pp 14-19. Recuperado de <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/>

[27] Torres Beristain Beatriz; 2019. El sargazo en las costas mexicanas. La Ciencia y el Hombre, Vol. XXXII, número 1 de enero-abril 2019. Recuperado de: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/el-sargazo-en-las-costa-mexicanas/>

[28] ¿Sabes qué es el sargazo? ;2018 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Gobierno de México [sitio web]. [Consultado el 20 de octubre de 2021] Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/sabes-que-es-el-sargazo?idiom=es>

[29] Pérez Reyes C. 1997. Composición química de sargassum spp. Colectado en la bahía de La Paz, B.C.S., y la factibilidad de su aprovechamiento en forma directa como fuente de alginato. Instituto Politécnico Nacional. Tesis de grado.

[30] Munteanua B, C. Vasile. 2005. Spectral and thermal characterization of styrene-butadiene copolymers with different architectures. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 7, No. 6, December, p. 3135 - 3148

[31] Holden G; 1987. Thermoplastic Elastomers. In: Morton M. (eds) Rubber Technology. Springer, Boston, MA.

DOI: 10.1007/978-1-4615-7823-9\_16

[32] Garzón E., Ortiz I. Ma., Castillo J., Rojano A., Sánchez-Soto P; 2017. Modelización del proceso de envejecimiento natural de un material polimérico utilizable como cubierta de invernaderos. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, vol.37 N°.1.

[33] Orozco Espinoza Daniel; 2007. Diseño y construcción de una cámara de envejecimiento acelerado por temperatura para polímeros. Tesis de grado. Instituto politécnico nacional.

[34] Industrial Physics, 2023. Página web: <https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/explicacion-de-la-escala-de-dureza-shore/>

[35] Schädler K. Introducción al microscopio óptico, técnicas y aplicaciones de microscopía óptica; 2021. Análisis y separaciones. Recuperado de: <https://www.news-courier.com/analysis/articles/an-introduction-to-the-light-microscope-light-microscopy-techniques-and-applications-351924>

[36] Mujal-Rosas, R.; Marín-Genescà, M.; García-Amorós, J.; Salueña-Berna, X.; Colom-Fajula, X. "Influencia en las propiedades mecánicas de varios compuestos poliméricos reforzados con partículas de GTR". Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, 2019, Vol. 76, Num. 588.

[37] S. Kannan; 2014. FT-IR and EDS analysis of the seaweeds Sargassum wightii (brown algae) and Gracilaria corticata (red algae). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, ISSN: 2319-7706 Volumen 3 Number 4 (2014) pp. 341-351.

[38] Víctor A. Gómez C.; CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS MANUFACTURADOS FUERA DE AUTOCLAVE; PICYT – CIDESI; Querétaro; 2017.

[39] Castillo Castillo Carolina. 2018. Preparación de un material compuesto a partir de un copolímero estireno-butadieno (sbs) y pluma de pollo. Tesis de grado. Tecnológico Nacional de México.

[40] Navas Echenique Cintia; 2019. Compuestos poliméricos reforzados con desechos agroindustriales regionales. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan.

[41] Ibarra, L., Macias, A., & Palma, E; 1995. Viscoelastic properties of short carbon fiber thermoplastic (SBS) elastomer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 57(7), 831–842.

[42] Motta Barros Laura Victoria y Rodríguez Zorro Sofía; 2020. Evaluación del potencial del uso de las algas de arribazón conocidas como sargazo (*sargassum spp*). Tesis de grado. Fundación universidad de américa facultad de ingenierías programa de ingeniería química Bogotá D.C.

[43] Castro-González María Isabel, Carrillo-Domínguez S, Pérez-Gil F; 1993. Composición química de *Macrocystis Pyrifera* (sargazo gigante) recolectada en verano e invierno y su posible empleo en alimentación animal. *Ciencias Marinas* (1994), 20(1), pág.: 33-40.

DOI: 10.7773/cm.v20i1.955

[44] Conesa Ferrer Juan A; 2000. Curso básico de análisis térmico. Universidad de Alicante. Editorial Club Universitario. pp. 11-22. Recuperado de <http://www.editorial-club-universitario.es/pdf/174.pdf>.

[45] Fraga Grueiro Libertad; 2001. Estudio cinético, dinamo mecánico y termogravimétrico del sistema epoxídico BADGE mediante las técnicas de análisis térmico: DSC, DMA y TGA. Construcción de un diagrama TTT. Tesis de Doctorado. Universidad de Santiago de Compostela. pp. 88-89.

[46] ATRIA INNOVATION; 2020. [Sitio Web]. Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿para qué me sirve? Recuperado de <https://www.atriainnovation.com/microscopia-electronica-de-barrido-sem>.

[47] Piñón Balderrama Claudia Ivonne; 2013. Funcionalización Mediante Grupos Sulfónicos de Copolímeros en Bloque y Radiales de Poli (estireno-butadieno-estireno) SBS. Tesis de grado. Centro de Investigación en Materiales Avanzados Unidad Monterrey.

[48] Sánchez Ojeda Josué Alejandro; 2018. Nanopartículas de sílice pirogénica modificada con POSS para refuerzo de un copolímero SBS.

[49] R.R. ;2020. Sargazo masivo amenaza con prolongarse en el Caribe mexicano. Reportur mx. Sitio web: <https://www.reportur.com/mexico/2020/07/20/sargazo-masivo-amenaza-prolongarse-caribe-mexicano/>

[50] Saldaña Fabela María Del Pilar; 2019. Diagnóstico de calidad del agua y caracterización de las dos especies de sargazo que arriban a las costas de Cancún, Puerto Morelos y Playa del Carmen. Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

[51] Kim, SK., and Wijesekara; 2010. Development and biological activities of marine derived bioactive peptides: A review. J Funct Foods

DOI: 10.1016/j.jff.2010.01.003

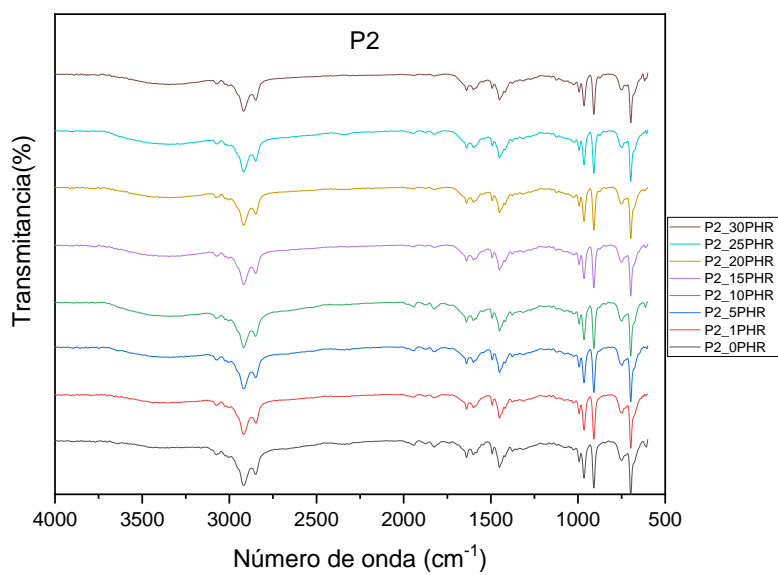
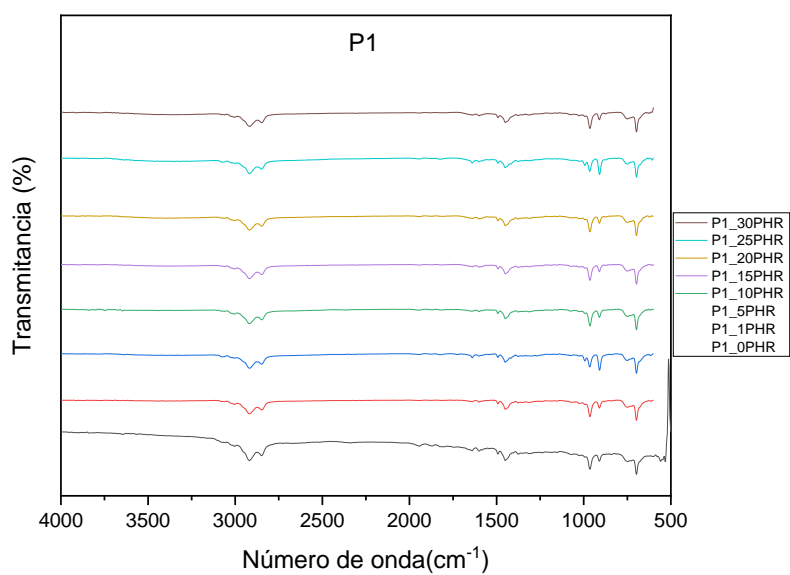
[52] Mexpolímeros. XPRENE B - SBS - Copolímero-estireno-butadieno estireno. Sitio web <https://www.mexpolimeros.com/eng/estireno%20butileno%20estireno.html>

[53] Ayala del Toro Y., Delgado Alamilla H., Cuellar Pérez V., Salazar Rivera A; 2019. Manual de ensayos para laboratorio agregados (AG) para mezclas asfálticas. Secretaría de Comunicaciones y transporte. Recuperado de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>

[54] Moral Borque A., Nogueira López M; 2007. Materiales de última generación y materiales eficientes: materiales compuestos – composites. UAH. Recuperado de: [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20%28Alberto%20Moral%20%2B%20Marar%20Nogueira%29.pdf)

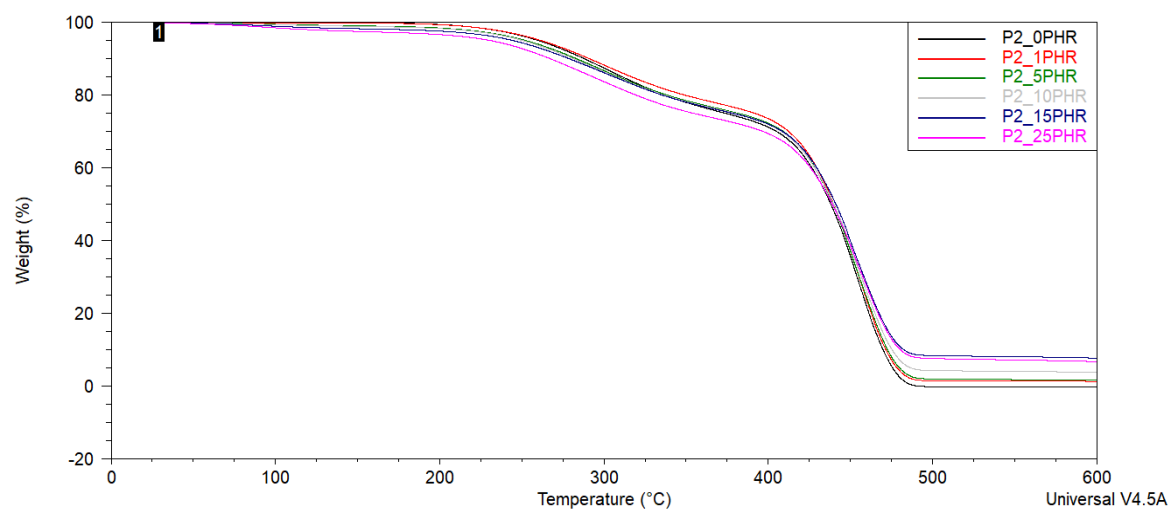
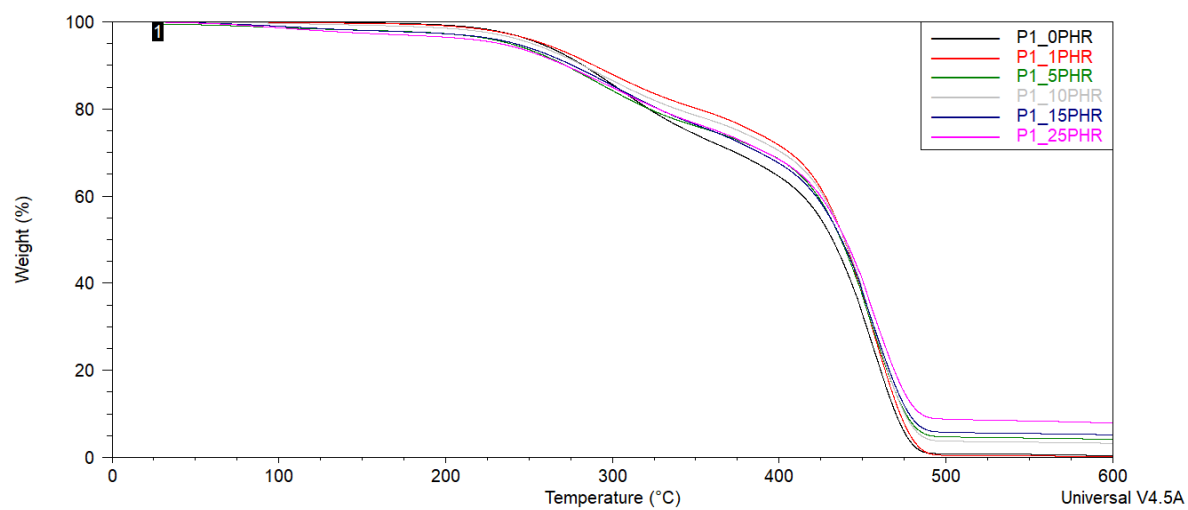
# ANEXOS

**Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)**

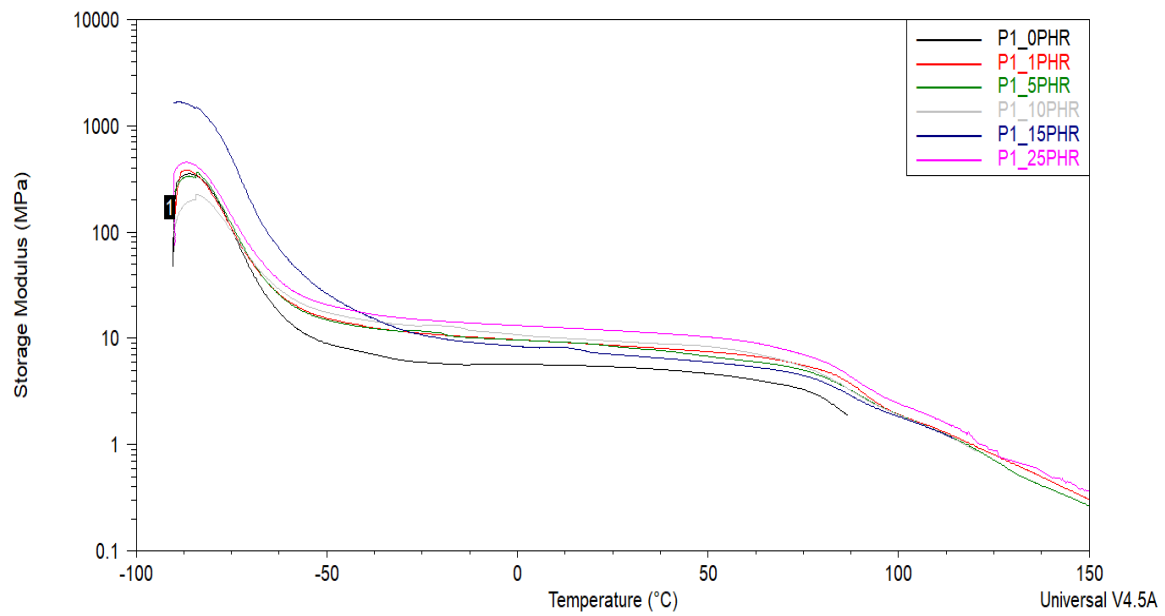
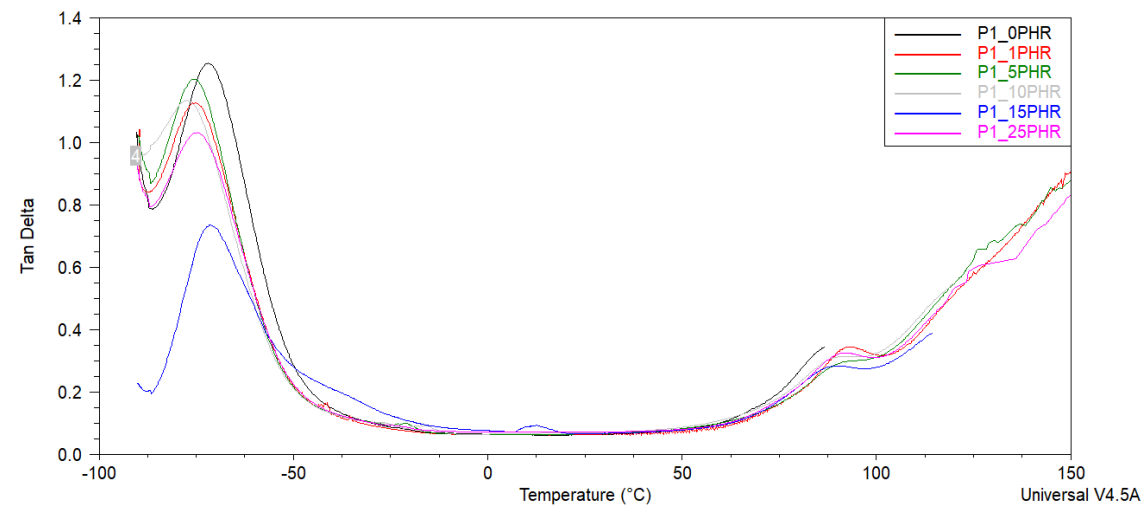


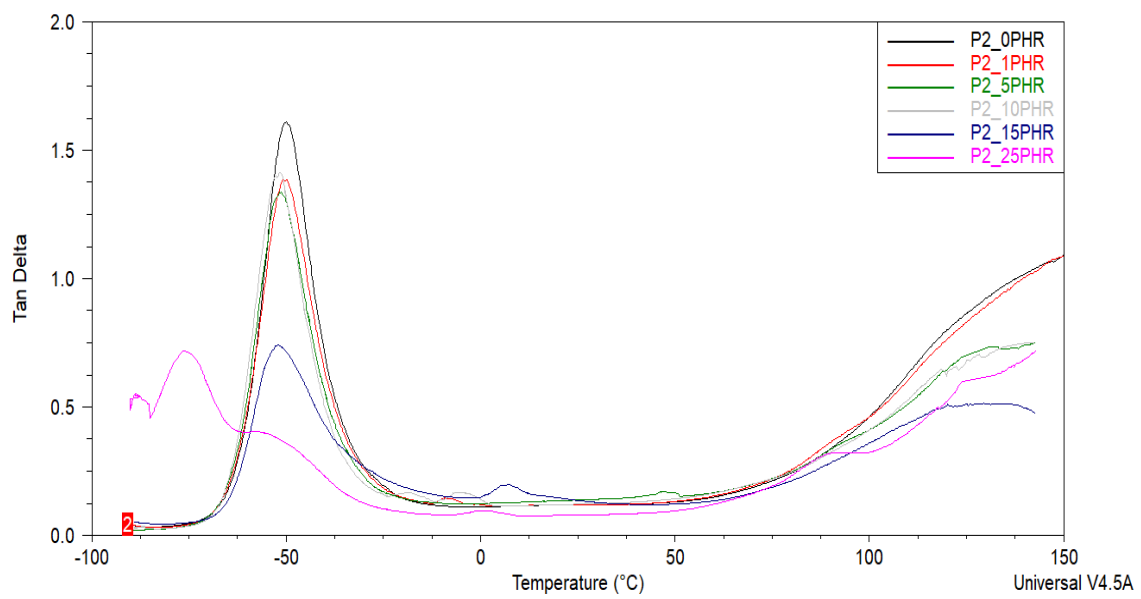
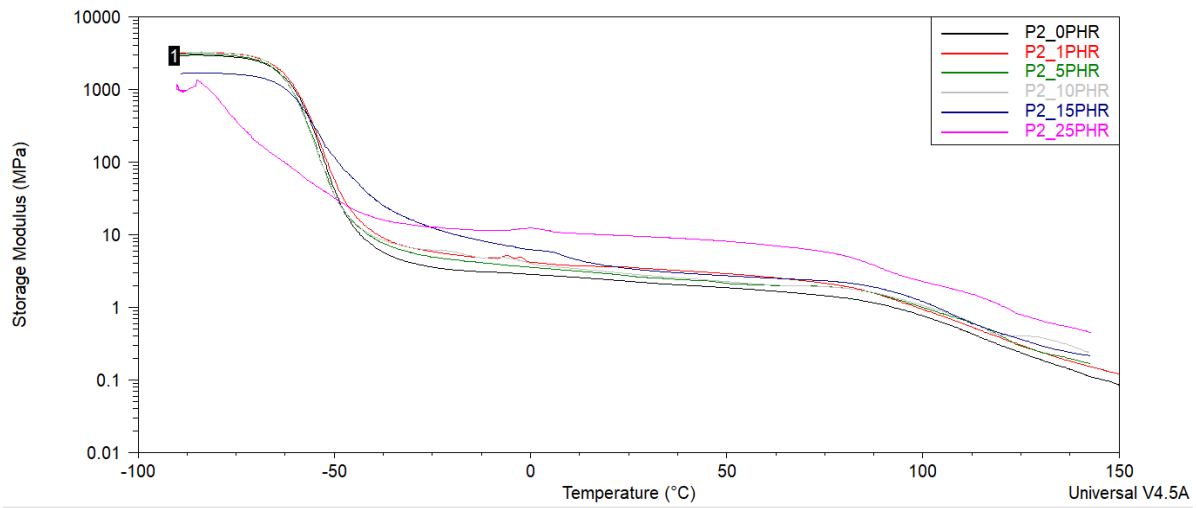
## Análisis Termogravimétrico





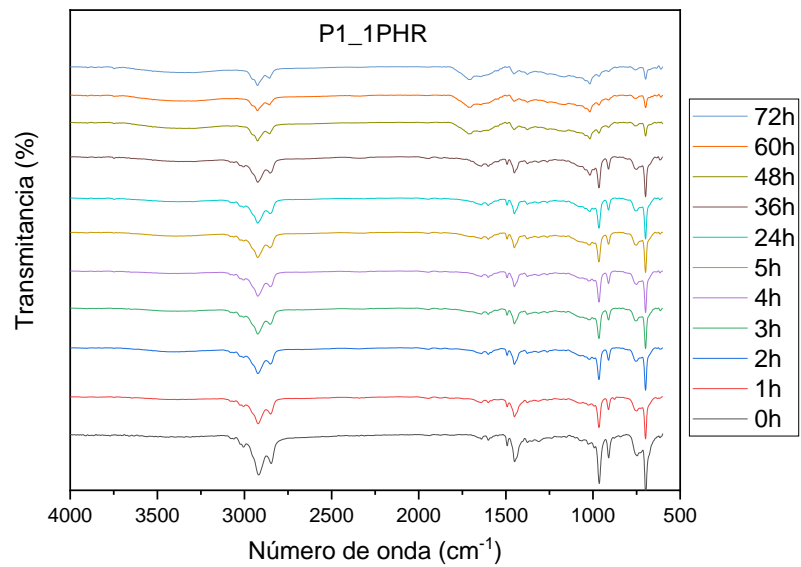
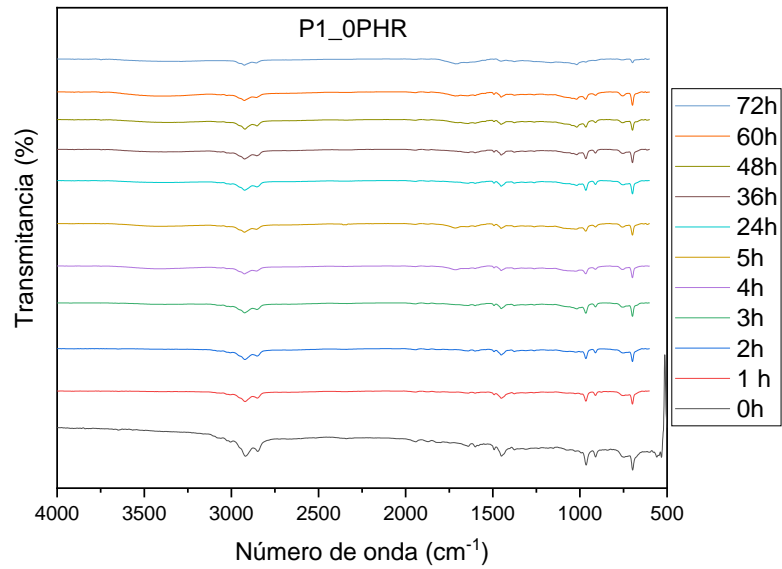
## Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

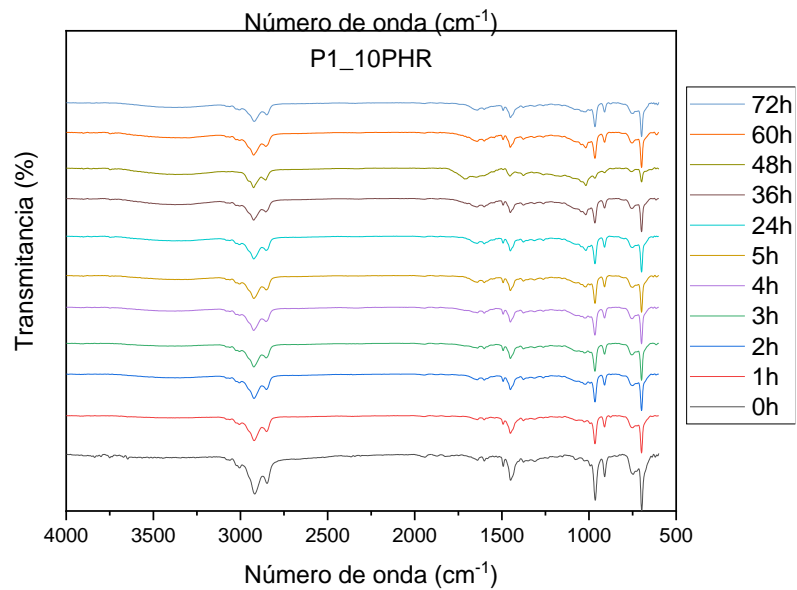
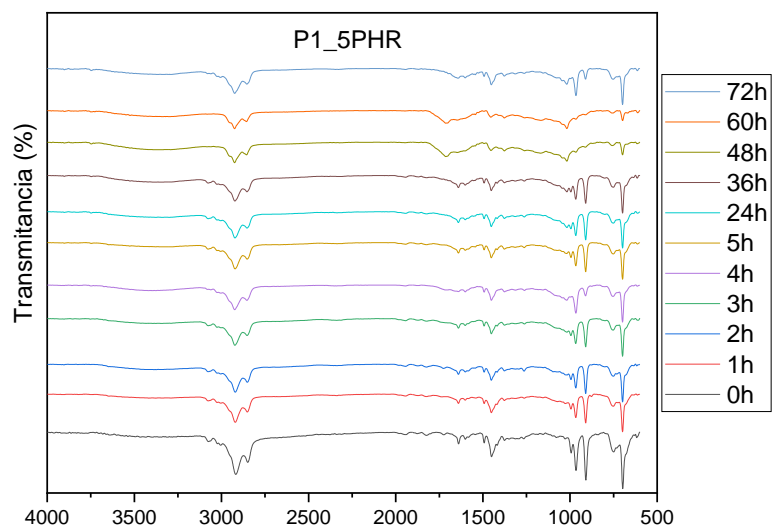


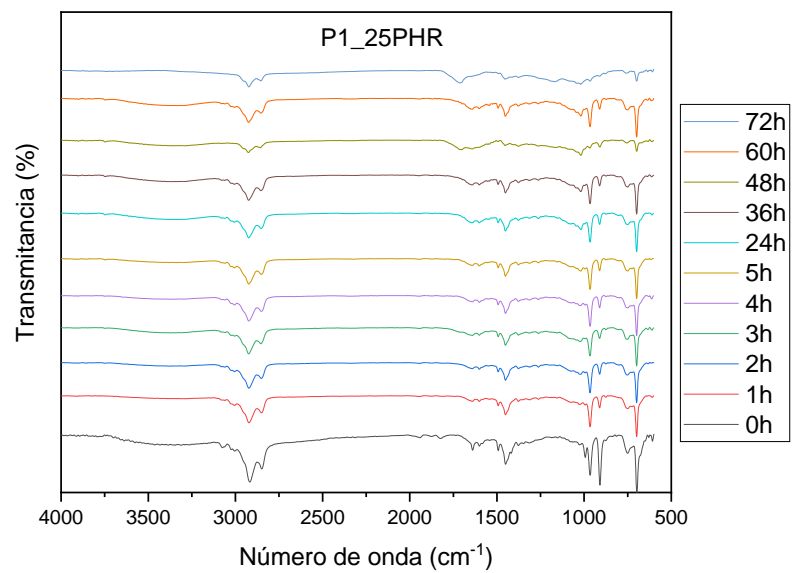
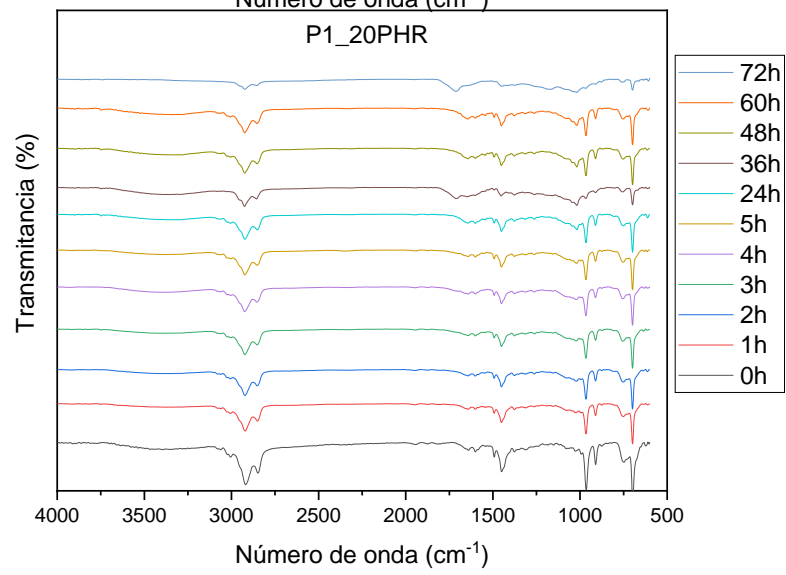
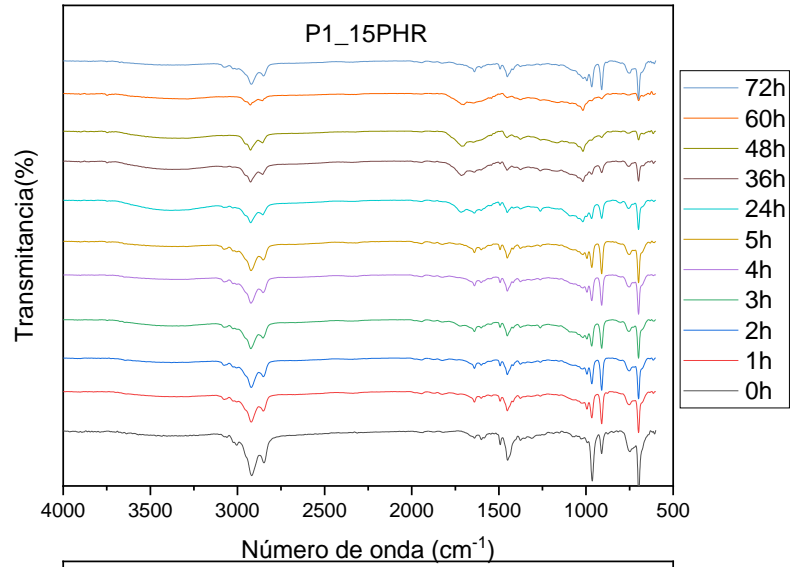


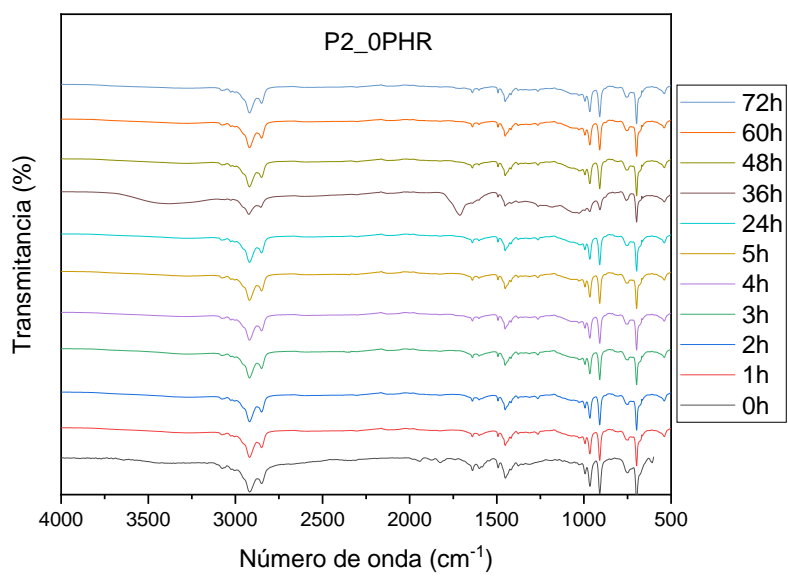
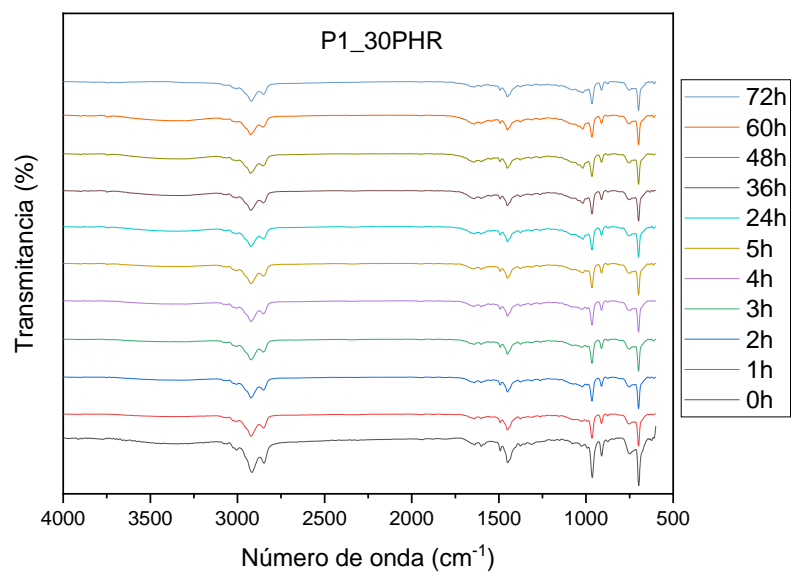
## Pruebas de envejecimiento

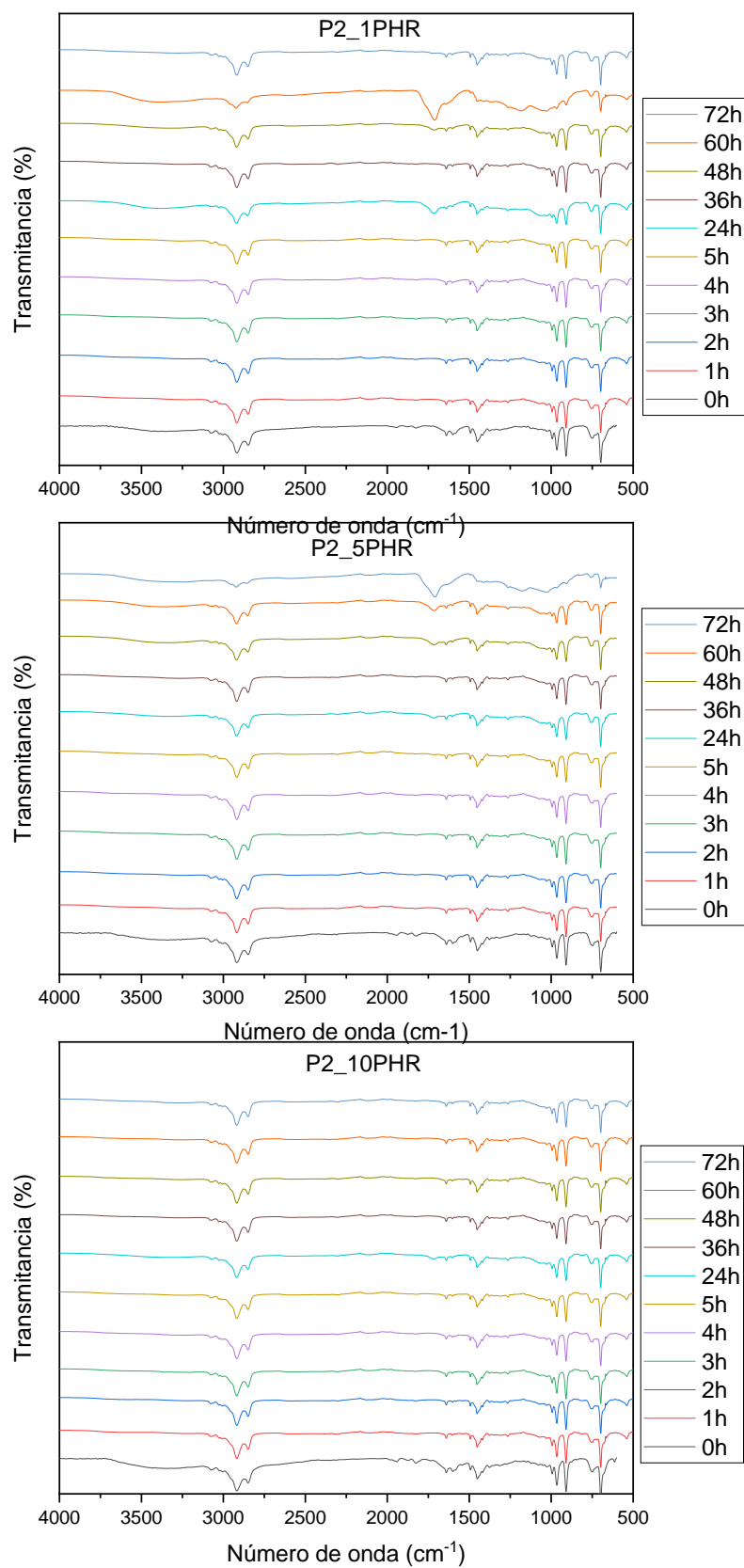
### Hidro envejecimiento



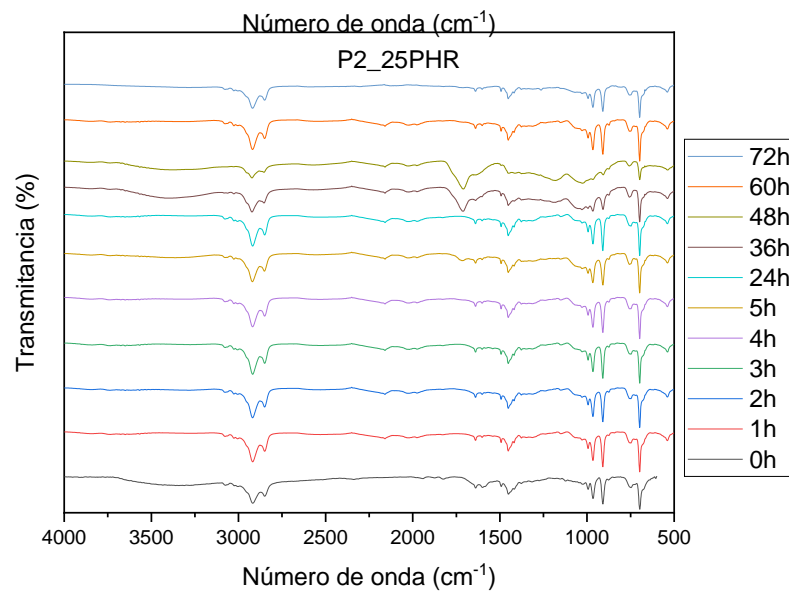
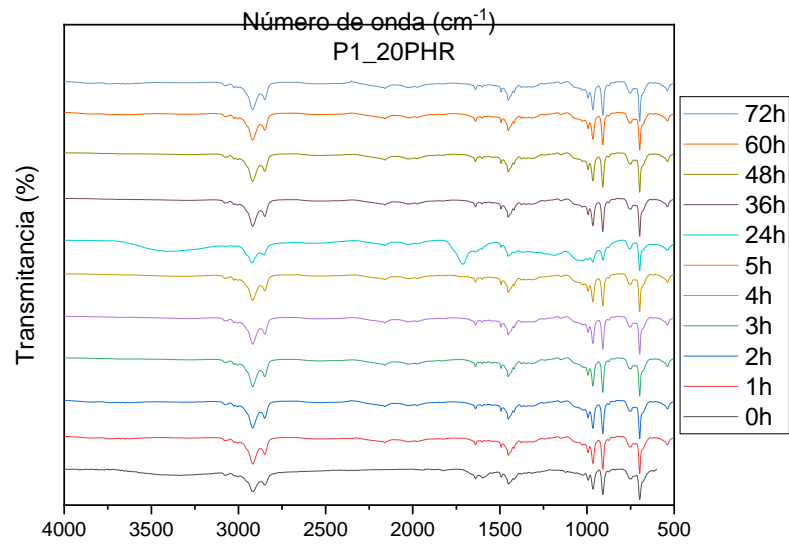
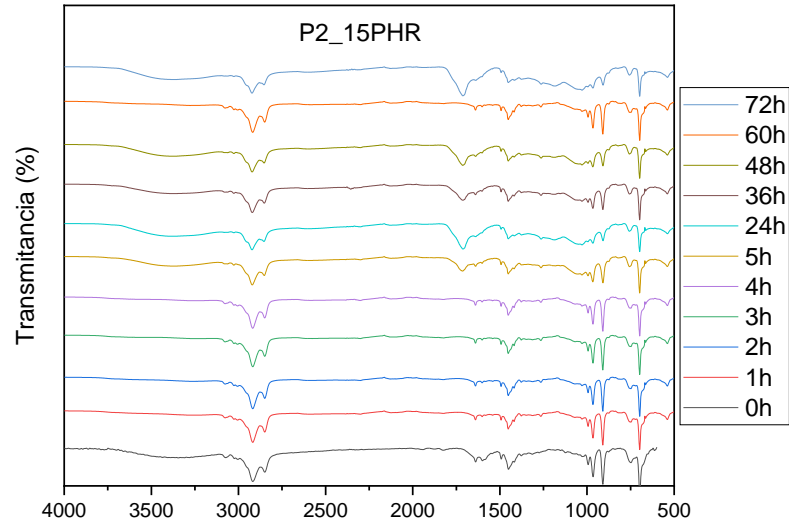


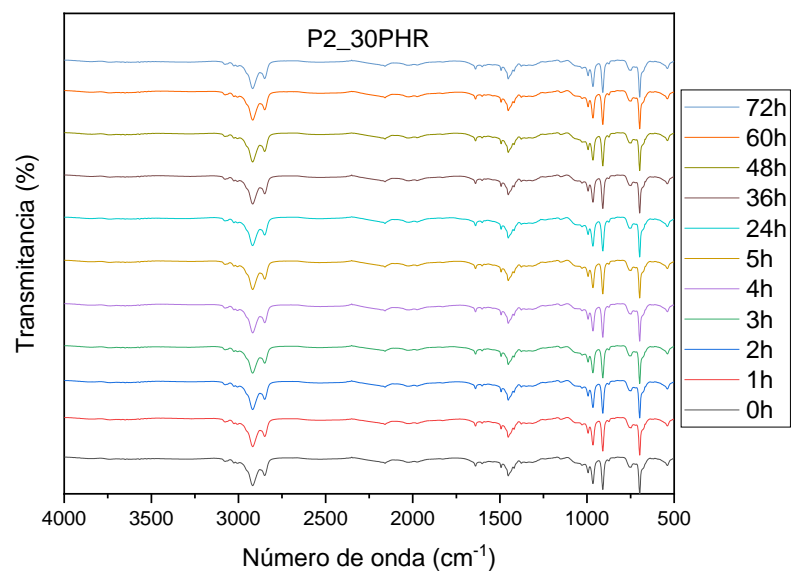












## Índice de Fluidiez

### INDICE DE FLUIDEZ (200°C/5 KG) (REF. ASTM 1238)

| MUESTRA  | INDICE DE FLUIDEZ (200°C/5 KG)<br>(REF. ASTM 1238) |
|----------|--|
| P1_0PHR  | 8.0  |
| P1_5PHR  | 7.0  |
| P1_10PHR | 5.0  |
| P1_15PHR | 5.5  |
| P1_25PHR | 4.9  |
| P2_0PHR  | 23.2   |
| P2_5PHR  | 24.1   |
| P2_10PHR | 22.3   |
| P2_15PHR | 20.0   |
| P2_25PHR | 17.5   |

## Abrasión

| <b>MUESTRA</b> | <b>ABRASIÓN DIN<br/>(REF. DIN 53516)</b> |
|----------------|--|
| P1_0PHR        | 109                                      |
| P1_5PHR        | 95                                       |
| P1_10PHR       | 140                                      |
| P1_15PHR       | 162                                      |
| P1_25PHR       | 338                                      |
| P2_0PHR        | 407                                      |
| P2_5PHR        | 550                                      |
| P2_10PHR       | 820                                      |
| P2_15PHR       | >900                                     |
| P2_25PHR       | >1000                                    |

### Dureza Shore A

| <b>MUESTRA</b> | <b>DUREZA SHORE A<br/>(REF. DIN 53505)</b> |
|----------------|--|
| P1_0PHR        | 46   |
| P1_5PHR        | 45   |
| P1_10PHR       | 50   |
| P1_15PHR       | 47   |
| P1_25PHR       | 50   |
| P2_0PHR        | 35   |
| P2_5PHR        | 31   |
| P2_10PHR       | 35   |
| P2_15PHR       | 38   |
| P2_25PHR       | 30   |