

Evaluación del ataque fúngico como mecanismo de daño en tuberías de polietileno
utilizadas en distribución de gas en Colombia

María Isabel Gómez Suárez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo

Magíster en Ingeniería de Materiales

Codirector

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

María Andrea Reyes Reyes

Microbióloga y Bioanalista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi mamá, la mujer más fuerte que conozco

Agradecimientos

Le agradezco a mis papás, por permitirme llegar hasta donde estoy, por no rendirse nunca y enseñarme el verdadero significado del esfuerzo, por apoyarme en cada paso sin cuestionar ninguna de mis decisiones confiando plenamente en mí.

A mis hermanos, por asumir ese rol paternal en muchas circunstancias, haciéndolo con el mayor amor y protección posible, siempre guiándome con su ejemplo.

A mi director, Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo, por abrirme las puertas a un nuevo mundo laboral y darme la oportunidad de explorar el área favorita de mi carrera, análisis de falla, por asumir el reto de ser el responsable de mi desempeño durante la última etapa de mis estudios universitarios.

A María Andrea Reyes Reyes, quien me mostró un mundo desconocido en mi área de aprendizaje, por guiarme en cada paso y dedicarme su tiempo y conocimiento con la mayor gentileza. Sin duda, una de las personas con la mayor bondad que he conocido y a quien le deseo los mayores éxitos en su vida profesional.

A Ana María Pérez Ceballos, mi coordinadora y una de las profesoras a quienes más he admirado en todo mi transcurso por la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, que, sin saberlo, desde primer semestre me motivó a aprender cada vez más sobre el análisis de falla y ha sido una inspiración para mí al conocer su transcurso en el mundo laboral.

A la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC) por confiar en mí y confiar en este proyecto, por financiar cada proceso requerido y prestarme sus instalaciones para aprender cada día más.

Finalmente, quiero agradecer a Jhon Sebastián Fiallo Correa, mi mejor amigo, mi pareja. La persona que me ha visto en mis peores momentos y no ha dudado en apoyarme, escucharme y acompañarme en cada proceso, quien desde el inicio de nuestra relación ha buscado mi bienestar. No sé qué nos deparará el futuro, pero, en cada escenario te deseo la mayor felicidad.

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos específicos.....	16
2. Fundamentación teórica.....	16
2.1 Polímeros	16
2.1.1 Según su origen	17
2.1.1.1 Naturales.....	17
2.1.1.2 Sintéticos	17
2.1.2 Según su estructura molecular	17
2.1.2.1 Lineales.....	17
2.1.2.2 Ramificados	17
2.1.2.3 Reticulados	17
2.1.3 Según su comportamiento térmico	18
2.1.3.1 Termoplásticos	18
2.1.3.2 Termoestables.....	18
2.1.3.3 Elastómeros	18
2.2 Tuberías de Polietileno	18
2.3 Mecanismos de daño	20

2.3.1 Agrietamiento	21
2.3.2 Fatiga	21
2.3.3 Ataque fúngico	21
3. Metodología.....	21
3.1 Revisión bibliográfica relacionada con mecanismos de daño de ataque fúngico en materiales poliméricos.....	22
3.2 Exposición de tuberías de polietileno al ataque fúngico mediante biorreactores.....	22
3.2.1 Materiales	22
3.2.1.2 Limpieza de las muestras.....	22
3.2.1.2.1 Limpieza previa a la exposición	23
3.2.1.2.2 Limpieza posterior a la exposición.....	24
3.2.2 Biorreactor de exposición a ataque fúngico	24
3.2.3 Monitoreo de colonización fúngica	25
3.3 Caracterización de las propiedades mecánicas y químicas de las tuberías de polietileno.	25
4. Resultados y análisis.....	25
4.1 Revisión bibliográfica de mecanismos de ataque fúngico en polietileno.....	25
4.2 Evaluación de tubería de polietileno	26
4.2.1 Ensayos ópticos	27
4.2.1.1 Monitoreo de colonización	27

4.2.1.2 Inspección visual y levantamiento metrológico	28
4.2.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).....	28
4.2.2 Ensayos químicos	30
4.2.2.1 Análisis termogravimétrico – TGA	30
4.2.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	31
4.2.2.3 Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	32
4.2.3 Ensayos mecánicos	33
4.2.3.1 Dureza shore	33
4.2.3.2 Impacto Charpy	34
4.2.3.3 Módulo de elasticidad.....	36
5. Conclusiones.....	39
6. Recomendaciones	40
Referencias bibliográficas	41
Apéndices	43

Lista de tablas

Tabla 1. Norma y dimensiones para cada muestra	22
Tabla 2. Registro fotográfico de muestras expuestas al ataque fúngico.....	27
Tabla 3. Variación del peso en función del tiempo de exposición	28
Tabla 4. Imágenes para el ensayo SEM-EDS para muestras en distintos tiempos de exposición.....	28
Tabla 5. Resultados para el ensayo TGA	30
Tabla 6. Resultados para el ensayo DSC.....	31
Tabla 7. Absorbancia para ensayo FTI.....	32
Tabla 8. Resultados para el ensayo de dureza shore.....	33
Tabla 9. Resultados para el ensayo de impacto Charpy	34
Tabla 10. Resultados para el ensayo de módulo de elasticidad.....	36

Lista de figuras

Figura 1. Tomas de dureza a diferentes tiempos de exposición	34
Figura 2. Energía absorbida por las muestras a diferentes tiempos de exposición	35
Figura 3. Módulo de elasticidad para muestra en blanco	36
Figura 4. Módulo de elasticidad para muestras expuestas durante 2 (AF-050-23) y 4 (AF-050-23. Ataque Fúngico) meses	37
Figura 5. Deformación a la rotura a diferentes tiempos de exposición	38
Figura 6. Comparativa entre ensayos mecánicos.....	39

Lista de Apéndices

Apéndice A. Resultados de los ensayos SEM	43
Apéndice B. Apéndice A. Resultados de los ensayos TGA	44
Apéndice C. Resultados de los ensayos DSC.....	46
Apéndice D. Resultados de los ensayos FTIR.....	48
Apéndice E. Resultados de los ensayos impacto charpy	49
Apéndice F. Equipo utilizado para cada ensayo	50

Glosario

Biorreactor: Equipo diseñado para llevar a cabo procesos biológicos y bioquímicos utilizando organismos vivos, proporcionando un entorno controlado donde es posible conservar los microorganismos con fines analíticos.

Polietileno PE80: Material perteneciente al grupo de los polímeros termoplásticos producidos mediante la polimerización de etileno.

Propiedades mecánicas: Características físicas de un material que indica cómo se comporta bajo la influencia de cargas externas, permitiendo comprender el rendimiento de los materiales para distintas aplicaciones.

Propiedades químicas: Características de un material relacionadas con su comportamiento e interacción con otras sustancias. Estas propiedades son fundamentales para comprender la reacción del material en diversos entornos.

Resumen

Título: Evaluación del ataque fúngico como mecanismo de daño en tuberías de polietileno utilizadas en la distribución de gas en Colombia*

Autor: María Isabel Gómez Suárez**

Palabras Clave: Biodegradación, polietileno, polímero, propiedades.

Descripción:

La biodegradación polimérica es una problemática que afecta a las tuberías de polietileno usadas para la distribución de gas domiciliario en Colombia. En este proyecto se investigó el impacto del ataque fúngico realizado por microorganismos presentes en los suelos del territorio nacional en tuberías de polietileno de media densidad PE80, a fin de identificar las afectaciones en las propiedades del material.

El estudio se realizó teniendo en cuenta ensayos visuales, químicos y mecánicos en muestras en estado de manufactura y expuestas durante 2 y 4 meses en un biorreactor con las condiciones aptas para el crecimiento de los hongos. Los resultados indicaron que, pese a no presentarse cambios en la apariencia del material, la exposición al ataque fúngico genera cambios a nivel químico y mecánico siendo estos últimos los de mayor impacto en las propiedades del material relacionados con una pérdida de masa en las muestras. Los resultados obtenidos sugieren que a una mayor exposición del material a los microorganismos existe una mayor degradación en sus propiedades lo cual disminuye la confiabilidad de las tuberías en servicio.

Se recomienda continuar con el estudio de las afectaciones para un tiempo más prolongado de exposición, así como hacer uso de estos microorganismos para realizar una degradación controlada del material a fin de disminuir la contaminación generada por los residuos de este tipo de material.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Jeferson Oswaldo Ruiz Lizarazo. M.Sc. Ing. De Materiales e Ing. Metalúrgico. Codirector: Ana María Pérez Ceballos. Doctora en Ingeniería. María Andrea Reyes Reyes. Microbióloga y Bioanalista.

Abstract

Title: Evaluation of fungal attack as a damage mechanism in polyethylene pipes used in gas distribution in Colombia*

Author(s): María Isabel Gómez Suárez¹

Key Words: Biodegradation, polyethylene, polymer, properties.

Description:

Polymeric biodegradation is a problem that affects polyethylene pipes used for home gas distribution in Colombia. This project investigated the impact of fungal attack by microorganisms present in the soils of the national territory on medium density PE80 polyethylene pipes, to identify the effects on the properties of the material.

The study was carried out considering visual, chemical, and mechanical tests on samples in the manufacturing state and samples exposed for two and four months in a bioreactor with conditions suitable for the growth of fungi. The results indicated that, despite there being no changes in the appearance of the material, exposure to fungal attack does generate changes at a chemical and mechanical level, the latter being the one with the greatest impact on the properties of the material related to a loss of mass in the samples.

The findings suggest that prolonged exposure of the material to microorganisms leads to an increase in the degradation of properties, posing a risk to the pipeline service. It is recommended to continue studying the effects for a longer exposure time, as well as using these microorganisms for controlled degradation of the material to reduce the pollution generated by the waste of this type of material.

* Degree Work

¹Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Jeferson Oswaldo Ruiz Lizarazo. M.Sc. Material Engineer and Metallurgical Engineer. Co-director: Ana Maria Perez Ceballos. Doctor in Engineering. Maria Andrea Reyes Reyes. Microbiologist and Bioanalyst.

Introducción

En la industria de oil & gas en Colombia se ha implementado el uso de tuberías poliméricas, especialmente de polietileno para distribución de gas domiciliario siguiendo lo establecido por la norma NTC 1746 donde se especifica que las tuberías para conducción de gas deben ser de polietileno PE80 color amarillo o polietileno PE100 color naranja (NTC 1746, 2016). La implementación de este material es debido a su resistencia, eficiencia, flexibilidad y fácil instalación, lo que permite un gran rendimiento a bajos costos (Pavco Wavin, 2020); sin embargo, en los últimos años se ha detectado en diferentes municipios de Colombia, tramos de tubería afectadas por el ataque de microorganismos, especialmente hongos filamentosos, endémicos de la zona. Este hallazgo ha sorprendido a las empresas de gas, dado que por su naturaleza sintética se asume que los materiales poliméricos son resistentes al ataque microbiológico.

Tras el ataque fúngico, las tuberías pueden perder su funcionalidad, por lo que es necesario su reemplazo. Debido al bajo costo del material se opta por retirar los tramos afectados e instalar tramos nuevos del mismo material. Los daños en las tuberías pueden provocar accidentes durante la distribución del gas, generando afectaciones en las zonas aledañas, produciendo cambios en el ecosistema como contaminación de efluentes hídricos. El trabajo de los ingenieros es buscar el avance constante de la sociedad sin perder de vista la conservación del medio; razón por la cual, no se debe simplemente cambiar las estructuras afectadas, sino también conocer el nivel de daño que esto puede generar, minimizando los riesgos de accidentes que involucren daños a la flora y fauna de la región, así como percances que atenten contra la vida humana.

Durante esta investigación se buscó identificar los mecanismos de daños causados por hongos nativos de Colombia en las tuberías de polietileno de media densidad PE80. El objetivo fue evaluar los cambios en las propiedades mecánicas y químicas del material después del ataque fúngico. Se consideró diferentes escenarios como pérdida de resistencia mecánica, alteraciones en la dureza, cambios en la composición química, entre otros.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el ataque fúngico como mecanismo de daño en tuberías de polietileno utilizadas en distribución de gas en Colombia.

1.2 Objetivos específicos

Recopilar información relacionada con mecanismos de daño que involucran ataques fúngicos en tuberías de polietileno de media densidad mediante revisión bibliográfica.

Exponer tuberías de polietileno al ataque fúngico en biorreactores experimentales.

Determinar la afectación en propiedades mecánicas y químicas del deterioro sobre el material polimérico.

2. Fundamentación teórica

2.1 Polímeros

Los polímeros son un tipo de material formado por la unión repetitiva de monómeros, por sus propiedades termoplásticas, flexibilidad, resistencia y especialmente su bajo costo, se utilizan principalmente en la fabricación de envases, tuberías y revestimiento de cables (Universidad de Sevilla, 2006). Otro de sus múltiples beneficios es la facilidad para reciclados y reutilizados, permitiendo una alta sostenibilidad medioambiental. La polimerización es el proceso mediante el cual se obtienen este tipo de materiales, pequeñas unidades conocidas como monómeros se unen químicamente mediante enlaces covalentes para generar moléculas grandes llamadas macromoléculas (Askeland & Wright, 2016), estas a su vez forman largas cadenas que pueden tener estructuras lineales, ramificadas o

entrecruzadas; la estructura formada será quien determine las propiedades físicas y químicas de cada polímero. De acuerdo con sus propiedades y características los materiales poliméricos se pueden clasificar tal como se muestra a continuación:

2.1.1 Según su origen

Los materiales plásticos se encuentran compuestos principalmente por polímeros de origen natural y sintéticos que pueden contener fibras, rellenos y pigmentos (Askeland & Wright, 2016).

2.1.1.1 Naturales. Polímeros presentes en la naturaleza producidos por organismos vivos, dentro de esta clasificación se encuentran el algodón, lana, seda y caucho (Carragher & Seymour, 2003).

2.1.1.2 Sintéticos. Fabricados por el ser humano mediante procesos químicos a partir de materias primas o fuentes naturales. El primer polímero sintético fue la baquelita, dentro de esta categoría se tienen otros materiales tales como policloruro de vinilo y poliuretano.

2.1.2 Según su estructura molecular

2.1.2.1 Lineales. Se encuentran formados por cadenas moleculares. Como ejemplo de este grupo se encuentran el polietileno y nylon 6,6 (Askeland & Wright, 2016).

2.1.2.2 Ramificados. En este polímero hay cadenas primarias y secundarias más pequeñas (ramales) que nacen de las cadenas principales (Askeland & Wright, 2016).

2.1.2.3 Reticulados. En este grupo las cadenas poliméricas se unen entre sí formando una estructura tridimensional.

2.1.3 Según su comportamiento térmico

2.1.3.1 Termoplásticos. Su estructura puede ser lineal o ramificada, su principal característica es que pueden modificar su forma una o más veces en función de un aumento de presión o temperatura; reblandecen y se funden al aumentar su temperatura y endurecen al disminuirla (Askeland & Wright, 2016). El polietileno es un polímero termoplástico lineal que representa aproximadamente el 38% del mercado (Zhang et al., 2023).

2.1.3.2 Termoestables. Igual que en los termoplásticos, los polímeros termoestables pueden tener sus largas cadenas lineales o ramificadas entrelazadas para formar estructuras tridimensionales, son más débiles que los termoplásticos y, en lugar de fundirse, se descomponen cuando son sometidos a altas temperaturas (Askeland & Wright, 2016).

2.1.3.3 Elastómeros. Su cadena polimérica tiene forma de espiral, su deformación elástica es del 200% por lo cual son capaces de recuperar su forma y tamaño original cuando se les deja de aplicar algún tipo de fuerza. Existe una subclase llamada elastómeros termoplásticos cuyo procesamiento es sencillo como el de los termoplásticos y su comportamiento elástico es semejante al de los elastómeros (Askeland & Wright, 2016).

2.2 Tuberías de Polietileno

En todos los países se establecen normas que permitan regular la calidad de productos y servicios brindados en dicha zona, en Colombia se cuenta con la Norma Técnica Colombiana (NTC) que promueve la mejora de calidad y el desempeño de los servicios ofrecidos por las entidades. Para el caso de las tuberías de distribución de gas en Colombia se debe cumplir con lo establecido por la norma NTC 2505 que regula las instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales (NTC 2505, 2006) en esta norma se indican las condiciones de diseño teniendo en cuenta el tipo de gas

suministrado, las variables del medio que puedan afectar la integridad de las instalaciones, el material y los accesorios. Estos últimos deben permitir un suministro de gas en condiciones herméticas compatibles con el tipo de tubería utilizado.

Debe tenerse en cuenta también la norma NTC 3728 para líneas de transporte y redes de distribución de gas (NTC 3728, 2001) que especifica las condiciones de seguridad para las tuberías, dentro de estas se encuentra que deben ser construidas con materiales que no se deterioren por la corrosión como en el caso del polietileno, así como planes de contingencia mediante odorización del gas y llevar un registro de las entidades que puedan llevar a cabo actividades de excavación en el área de instalación de las tuberías.

La norma NTC 2505 (NTC 2505, 2006) indica que para el caso de las tuberías plásticas se debe cumplir con todo lo establecido por la norma NTC 1746, la cual se enfoca en tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión (NTC 1746, 2016) e indica que tanto la tubería como los accesorios deben ser de un material virgen o reprocesado de la misma designación comercial, siempre y cuando las piezas cumplan con la norma. Estas tuberías plásticas deben emplearse exclusivamente en instalaciones enterradas. Se indica también que la tubería y sus accesorios deben ser homogéneos en todo su espesor, libres de todo tipo de discontinuidades, así como su color, que debe ser amarillo ocre en señal de seguridad.

La siguiente norma para tener en cuenta es la NTC 3742 que habla sobre la práctica normalizada para instalación subterránea de tubos termoplásticos de presión (NTC 3742, 1999), se indica que la anchura de la zanja debe ser tal que permita la unión del tubo dentro de esta de ser necesario, así como el llenado de los rellenos laterales, el fondo debe ser libre de piedras y en caso de no evitarse esto el paso a seguir es acondicionar el fondo de la zanja con una base de mínimo 100 mm de material fino compactado como por ejemplo, arcilla. Es

importante que tras la instalación se coloque una cinta preventiva a una distancia que abarque entre 20 y 30 cm por encima de la superficie de la tubería que indique la presencia de esta, así como el fluido que conduce. Finalmente, la norma NTC 3410 habla sobre los plásticos, accesorios de polietileno tipo campana para tuberías de polietileno con diámetro exterior controlado (NTC 3410, 1994), se incluyen los requisitos para la fabricación y dimensiones, así como su desempeño bajo presión.

Se asume que las empresas de distribución de gas cumplen con toda la reglamentación dada, por lo tanto, sorprende a la industria que se encuentren tuberías de polietileno de media densidad y alta densidad, con daños en su estructura, por esta razón se establecen 2 hipótesis, deterioro provocado por procesos de corrosión exterior y deterioro provocado por procesos de manufactura. Dentro del primer caso se deben realizar distintos estudios como lo son el análisis fisicoquímico del suelo, análisis microbiológico del suelo, análisis fúngico de la superficie de la tubería, inspección visual y ensayo de dureza; para el segundo caso lo más apropiado es realizar inspección visual, ensayo de dureza, inspección por microscopía de barrido y caracterización del material mediante espectroscopia infrarroja. Los ensayos físicos se hacen a fin de cuantificar el deterioro generado por los microorganismos y poder determinar el grado de amenaza.

2.3 Mecanismos de daño

Los mecanismos de daño son procesos que llevan al deterioro de un material, los cuales pueden ser físicos o químicos como consecuencia de la exposición a condiciones ambientales prolongadas o cargas mecánicas constantes. A continuación, se presentan los mecanismos de daño más comúnmente presentados en materiales poliméricos.

2.3.1 Agrietamiento

Se produce por una combinación de factores que incluyen la tenacidad y solubilidad del polímero. Al agrietarse el material, se generan concentradores de falla para el agrietamiento por tensión (ASM International., 2003).

2.3.2 Fatiga

Surge de una aplicación repetida y constante de cargas o tensiones, las grietas se desarrollan gradualmente propagándose hasta lograr la falla del material (ASM International., 2003).

2.3.3 Ataque fúngico

Se inicia con la colonización del hongo en la superficie del polímero produciendo enzimas capaces de reaccionar con polímeros sintéticos y naturales inducida por la necesidad del microorganismo por obtener alimento al degradar el material hasta llevarlo sustancias más sencillas como dióxido de carbono, biomasa y agua (Labeaga et al., 2018). La biodegradación generada por el ataque fúngico puede ser parcial alterando su estructura química y física afectando así sus propiedades o total, produciendo una mineralización completa del material.

3. Metodología

El desarrollo de este proyecto se realizó en 3 etapas que abarcan los procedimientos necesarios para una correcta investigación; estas se enumeran a continuación.

3.1 Revisión bibliográfica relacionada con mecanismos de daño de ataque fúngico en materiales poliméricos

Para lograr una visión general del problema se realizó una revisión detallada de la información referente a los últimos años de estudio, para esto se investigaron distintas fuentes bibliográficas donde se documentaron mecanismos de daño que afectan a los materiales poliméricos tales como el manual de pruebas para plásticos y análisis de falla (Shah, 2007), incluyendo documentación normativa como la norma ASTM G21-15 (Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi, 2021).

3.2 Exposición de tuberías de polietileno al ataque fúngico mediante biorreactores

3.2.1 Materiales

El material utilizado para exposición al ataque fúngico es un polietileno de media densidad (PEMD) PE80 amarillo que no ha estado en servicio con un diámetro interno de 26,7 mm y un espesor de 3 mm. Se tomaron probetas con distintas geometrías según el ensayo requerido, en la **Tabla 1** se especifican los ensayos, dimensiones y normas utilizadas.

Tabla 1

Norma y dimensiones para cada muestra

			Dimensiones (mm)			
Ensayo	Norma	Geometría	Largo	Ancho	Diámetro	
Visuales	Inspección Visual y Levantamiento metrológico	N/A	Cilíndrico	30	N/A	20,7
	Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)	ASTM E986-04	Cúbico	10	10	N/A

Químicos	Análisis termogravimétrico (TGA)	ASTM E1131-20	Cilíndrico	96,485	N/A	20,7
	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	ASTM D3418-21	Cilíndrico	96,485	N/A	20,7
	Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	ASTM E1252-98	Cúbico	15	15	N/A
Mecánicos	Dureza shore	ASTM D2240-04	Cilíndrico	40	N/A	20,7
	Impacto charpy	ASTM F2231-02	Cuboide	80	10	N/A
	Módulo de elasticidad	ASTM D638-22	Dumbbell	63,5	9,53	N/A

3.2.1.2 Limpieza de las muestras.

3.2.1.2.1 Limpieza previa a la exposición. Es importante realizar una limpieza exhaustiva de las muestras antes de ser introducidas en los montajes a fin de eliminar rastros de suciedad que puedan interferir con los resultados. Para esto se hizo uso de un sonicador que permite realizar limpieza mediante ultrasonido; inicialmente se realizaron 3 lavados con agua destilada de 10 min de duración con agua limpia cada vez, posteriormente se realiza in lavados con el mismo tiempo de duración usando esta vez etanol al 70% para desinfectar.

3.2.1.2.2 Limpieza posterior a la exposición. Posterior a los tiempos de exposición de las muestras, estas fueron limpiadas para retirar la biomasa adherida, este proceso es similar al realizado en las muestras previas a la exposición con el diferencial de no hacer uso del etanol. Para el caso de las probetas destinadas al ensayo SEM el objetivo es realizar una fijación de la biopelícula que se forma, en este proceso no se realizaron lavados con agua destilada, en su lugar inicialmente se sumergió la muestra en una solución de glutaraldehído al 2,5% con sorenson durante 3 min. Se procedió a hacer uso de etanol en distintas concentraciones (20%, 35%, 40%, 50%, 70%, 80%, 90% y 100%), la muestra se sumergió en el etanol de menor concentración durante 10 min en un refrigerador para mantener una baja temperatura y posteriormente se dejó secar al aire libre, se continuó el proceso pasando de la menor a la mayor concentración hasta llegar al etanol de 100%, en este caso se realizó el mismo procedimiento 3 veces con la misma concentración (100%).

3.2.2 Biorreactor de exposición a ataque fúngico

El biorreactor fue por la Corporación para la Investigación para la Corrosión (CIC), utilizando un recipiente de vidrio, en oscuridad, a una temperatura promedio de $24 \pm 5^\circ\text{C}$ y oxigenación mediante burbujeo (Spina et al., 2021).

Se trabajó para este caso una solución de 12 L conformada por una mezcla de sales inorgánicas compuesta por agua destilada junto a 8,4 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4), 4,2 g de fosfato dipotásico (K_2HPO_4), 8,4 g de sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 12 g de nitrato de amonio (NH_4NO_3) y 0,06 g de cloruro de sodio (NaCl), se adicionó una concentración de 1×10^6 esporas/mL de hongos filamentosos nativos de Colombia potencialmente degradadores de polietileno, causantes de fallas en tuberías de PEMD.

3.2.3 Monitoreo de colonización fúngica

A fin de mantener un control visual de los cambios se tomaron registros fotográficos de las muestras con intervalos de 7 a 15 días entre cada toma.

3.3 Caracterización de las propiedades mecánicas y químicas de las tuberías de polietileno

Se realizaron ensayos visuales, químicos y mecánicos para conocer la degradación del material a los 2 y 4 meses de iniciado el ataque fúngico. Los resultados se compararon con los datos obtenidos tras realizar los mismos ensayos en muestras que no fueron expuestas a ningún tipo de servicio. En el **Apéndice F** se indica el equipo con el cual se ha realizado cada ensayo.

4. Resultados y análisis

4.1 Revisión bibliográfica de mecanismos de ataque fúngico en polietileno

ASM en su volumen para caracterización y análisis de falla de materiales plásticos (ASM International, 2003) menciona que la adición de plastificantes a polímeros aumenta la susceptibilidad del material al ataque por hongos. En este ataque microbiológico son los aditivos tales como plastificantes, lubricantes, estabilizadores y colorantes aquellos susceptibles a este mecanismo de daño, dado que estos aditivos no se encuentran distribuidos de manera uniforme en el material y, por lo tanto, proporcionan áreas de crecimiento preferencial para los microorganismos. A algunos materiales poliméricos se les añaden conservantes, también conocidos como fungicidas o biocidas a fin de prevenir la proliferación de microorganismos, sin embargo, estos aditivos no suelen ser nocivos para

organismos de mayor complejidad (Shah, 2007). Estos fungicidas pueden disminuir su efecto debido a la exposición a climas cálidos, luz ultravioleta y lluvia.

Los efectos esperados de la biodegradación por ataque fúngico son ataque superficial, pérdida de decoloración y pérdida de transmisión óptica (ASTM G21-15, 2021). Teniendo esto en cuenta es común suponer que la solución para evitar estas consecuencias es eliminar los aditivos susceptibles o agregar un material preventivo, sin embargo, esto acarrea cambios en las propiedades del material, tales como, acelerar el deterioro de las propiedades eléctricas donde se encuentran resistencia al aislamiento, constante dieléctrica, factor de potencia y resistencia dieléctrica (ASM International, 2003).

La degradación en el material se debe a las enzimas secretadas por los microorganismos que poseen la capacidad de hidrolizar macromoléculas y polímeros carbonados, originando así compuestos más sencillos a fin de ser transportados a través de sus membranas celulares estableciendo así su principal fuente de carbono (Delgado Fernández, 2020).

4.2 Evaluación de tubería de polietileno

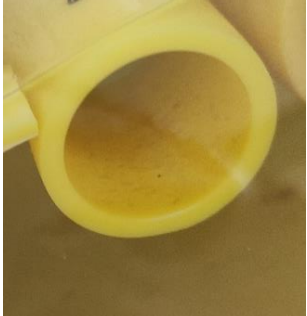
Los resultados cuantitativos son evaluados mediante un rango establecido a través de una desviación estándar del 5%, aquellos valores que no se encuentren dentro de este rango establecido son considerados como cambios significativos en las muestras.

4.2.1 Ensayos ópticos

4.2.1.1 Monitoreo de colonización. Se evidencia de forma macroscópica, colonización por parte de las cepas fúngicas nativas al interior de algunas probetas del material. Se resalta la presencia de estructuras fúngicas de color naranja y marrón adheridas a las piezas poliméricas. En la Tabla 2 se aprecia la deposición de estructuras fúngicas en la parte interna de las muestras.

Tabla 2

Registro fotográfico de muestras expuestas al ataque fúngico

Muestra	Fecha de toma
	Día 1 – 29/06/2023
	Día 9 – 01/09/2023
	Día 17 – 03/11/2023

4.2.1.2 Inspección visual y levantamiento metrológico. Durante los tiempos de exposición evaluados, las muestras cilíndricas de PEMD no presentaron variaciones en las medidas de longitud, diámetro y espesor. Con respecto al peso, se evidencia una disminución de 0,3467 g a los dos meses de exposición y de 0.491 g a los cuatro meses, en comparación con la muestra inicial (blanco) tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3

Variación del peso en función del tiempo de exposición

Muestra	Blanco	2 meses	4 meses
Peso (g)	6,2	5,9	5,7

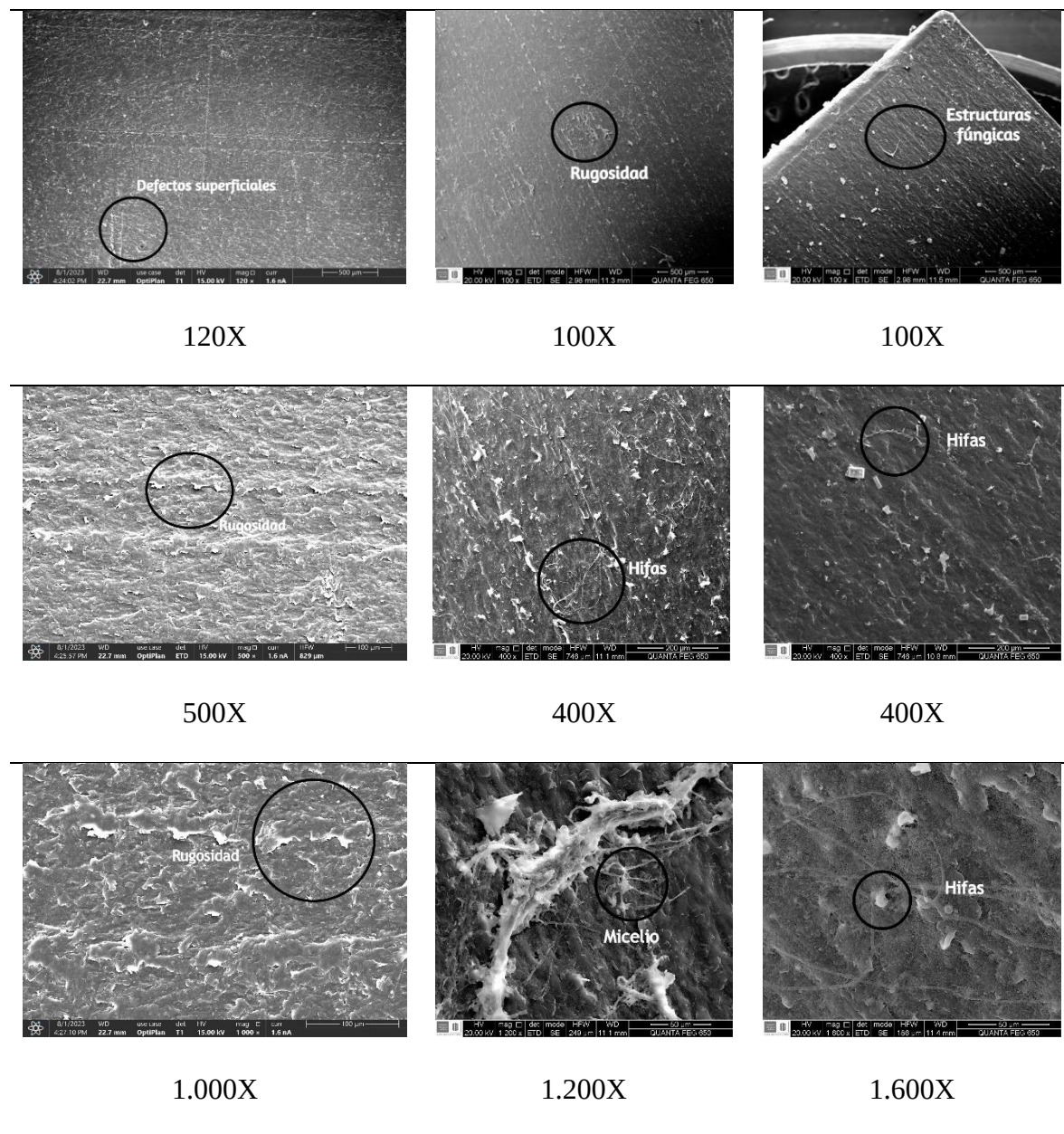
El ensayo de inspección visual no reveló presencia de grietas, abolladuras y ralladuras en ninguna probeta, asimismo, se presentó uniformidad del color inicial a lo largo de las muestras. Los cilindros utilizados no presentaban etiquetas de ningún tipo a fin de tener muestras iniciales con las mayores similitudes posibles.

4.2.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS). Este ensayo visual es utilizado en ciencia de materiales para los campos de análisis de falla debido a que proporciona imágenes detalladas de la morfología de las muestras analizadas. En la Tabla 4 se presentan imágenes a diversas magnitudes en diferentes zonas de la muestra.

Tabla 4

Imágenes para el ensayo SEM-EDS para muestras en distintos tiempos de exposición

Muestra en blanco	2 meses de exposición	4 meses de exposición
--------------------------	------------------------------	------------------------------



Para el ensayo realizado a las muestras en estado de manufactura (blanco) se proporcionan imágenes de la superficie del polímero, es posible apreciar características morfológicas del material tales como rugosidades y porosidad del polímero.

Las imágenes obtenidas tras el ensayo de las muestras expuestas al ataque fúngico durante 2 meses permiten confirmar la colonización fúngica, con la identificación de estructuras compatibles con hongos como hifas distribuidas en diferentes zonas del

material. Estas estructuras son tubulares y constituyen el cuerpo principal del hongo (Correa Restrepo et al., 2021).

En algunas zonas se encuentran micelios (conjunto de hifas) dando origen a colonias de hongos, esta red compleja sobrevive principalmente a rangos de temperaturas de entre -5 a 45°C en contacto con superficies húmedas (Correa Restrepo et al, 2021) lo cual es consistente con las características ambientales que le fueron dadas a los montajes experimentales. En las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico de barrido es posible observar que la rugosidad del material disminuye a medida que aumenta la exposición del material al medio fúngico en comparación al mismo material en estado de manufactura (blanco).

4.2.2 Ensayos químicos

4.2.2.1 Análisis termogravimétrico – TGA. Este ensayo mide la variación de la masa al ser sometida a una temperatura controlada brindando información respecto a la temperatura en la que ocurren las transformaciones térmicas (ASM International, 2003). Los datos numéricos son registrados en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados para el ensayo TGA

Pérdida de masa	Temperatura (°C)			Promedio	Desviación	Rango
	En blanco	2 meses	4 meses			
5%	388,7	380,2	392,5	387,2	9,7	377,5 - 396,8
10%	409,7	402,1	414,1	408,6	10,2	398,4 - 418,8
20%	431,6	425,1	429,6	428,8	10,7	418,1 - 439,5
30%	445,5	438,2	440,0	441,2	11,0	430,2 - 453,3
50%	461,2	456,3	453,9	457,1	11,4	445,7 - 468,6
70%	475,0	471,1	467,2	471,1	11,8	459,3 - 482,9

En la **Tabla 5** se observa que los datos de temperatura en cada porcentaje (%) de pérdida de masa no poseen una dispersión superior al 5% de la desviación estándar, por ende, es posible afirmar que no existe una variación significativa en esta propiedad debido al ataque fúngico. En el **Apéndice B** se observa gráficamente este comportamiento, así como la representación de velocidad de pérdida de masa.

4.2.2.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Esta es una técnica de análisis térmico utilizada para control de calidad y evaluación de estabilidad térmica de productos (ASM International, 2003). Se realiza mediante la medición de la diferencia de calor absorbido o liberado por la muestra a medida que la temperatura varía. Los datos numéricos son registrados en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados para el ensayo DSC

Muestra	Barrido 1 (°C)		Barrido 2 (°C)	Barrido 3 (°C)	Barrido 4 (°C)
	1er evento exotérmico	2do evento endotérmico	1er evento endotérmico	1er evento exotérmico	1er evento endotérmico
En blanco	128,9	261,2	116,6	128,9	118,4
2 meses	128,2	259,0	116,0	128,3	116,0
4 meses	130,2	259,1	116,4	128,0	116,3
Promedio	129,1	259,8	116,3	128,4	116,9
Desviación	3,2	6,5	2,9	3,2	2,9
Rango	125,9 - 132,3	253,3 - 266,3	113,4 - 119,2	125,2 - 131,6	114,0 - 119,8

Dados los resultados registrados en la **Tabla 6** es posible determinar que los eventos exotérmicos ocurridos en el blanco y los dos tiempos de exposición, en el rango de 128 y 130°C están relacionados con el proceso de cristalización del polietileno PE80 analizado, donde las cadenas del material inicialmente amorfas comienzan a organizarse en una estructura cristalina más ordenada (Askeland & Wright, 2016). Los eventos endotérmicos

ocurridos en el rango de 115 a 118°C indican la absorción de calor asociada con la fusión de cristales del polímero.

Se observa que los resultados son consistentes entre los ensayos realizados a distintos tiempos de exposición sin presentar cambios significativos de absorción y liberación de temperatura.

4.2.2.3 Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier – FTIR. Este ensayo estudia la estructura molecular del material mediante la medición de absorción de radiación infrarroja en diferentes longitudes de onda (ASM International, 2003). En el Apéndice D es posible observar las gráficas de absorción de las moléculas en la muestra para las frecuencias correspondientes a las vibraciones moleculares. Los datos son registrados en la Tabla 7.

Tabla 7

Absorbancia para ensayo FTIR

	Blanco	2 meses	4 meses	Promedio	Desviación	Rango
Pico 1	2918,2	2917,1	2914,0	2916,4	72,9	2843,5 - 2989,3
Pico 2	2849,9	2848,7	2847,1	2848,6	71,2	2777,3 - 2919,8
Pico 3	1471,0	1465,2	1464,0	1466,7	36,7	1430,0 - 1503,4
Pico 4	718,6	715,5	719,56	717,9	17,9	699,9 - 735,8

La magnitud de absorción se representa con la altura e intensidad de los picos mostrados en el espectro, se observa que la muestra analizada en estado de manufactura presenta una mayor absorción de energía la cual disminuye en función del tiempo de exposición de las muestras tal como se evidencia en la **Tabla 7**. La disminución de la magnitud de los picos indica una disminución en la absorción de energía en las frecuencias correspondientes, esta magnitud es asociada con la presencia de grupos funcionales o enlaces químicos de la muestra.

Para el caso de la muestra expuesta durante 4 meses, en el **Apéndice D** se observa un incremento en la cantidad de picos, esto puede implicar cambios en el estado o composición de la muestra, tales como reacciones químicas y degradación (ASM International, 2003). Los resultados del ensayo sugieren que el material presenta una naturaleza alifática con presencia de grupos funcionales oxigenados y baja proporción de enlaces C=C tipo alqueno.

4.2.3 Ensayos mecánicos

4.2.3.1 Dureza shore. La prueba de dureza mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro, brindando una medida de la resistencia del material (Askeland & Wright, 2016). El ensayo de dureza shore es utilizado especialmente para materiales poliméricos; los datos se registran en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados para el ensayo de dureza shore

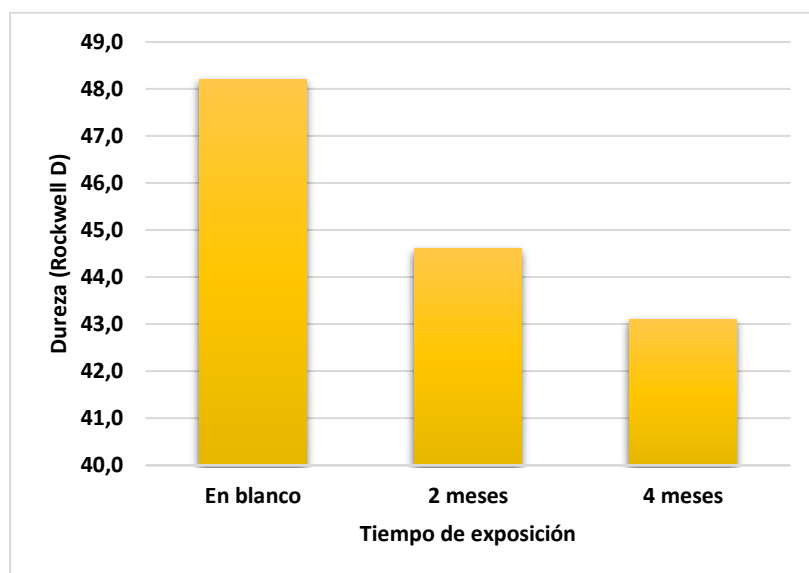
Toma	Muestra		
	En blanco	2 meses	4 meses
1	46	51	45
2	44	42	48
3	45	43	41
4	56	45	50
5	57	49	48
6	60	46	41
7	42	45	41
8	44	36	46
9	40	45	33
10	48	44	38
Promedio	48,2	44,6	43,1
Desviación	1,2	1,1	1,1
Rango	47,0 – 49,4	43,5 - 45,7	42,0 - 44,2

Los resultados de este ensayo arrojan valores en un rango de 40 a 60 escala tipo D, dado que se tomaron 10 mediciones en diversas zonas de la muestra, se obtuvo un valor

promedio para cada muestra, tal como se aprecia en la **Figura 1**, la medida de dureza que indica la resistencia del material a ser penetrado disminuye con el aumento en el tiempo de exposición. La variación en los valores de cada toma para cada una de las muestras indica heterogeneidad en la estructura del material.

Figura 1

Tomas de dureza a diferentes tiempos de exposición



4.2.3.2 Impacto Charpy. El ensayo de impacto Charpy es utilizado para evaluar la fragilidad de un material y así determinar su comportamiento frente a impactos repentinos, siendo crucial para establecer su resistencia a la fractura por impacto. Los valores son registrados en la Tabla 9.

Tabla 9

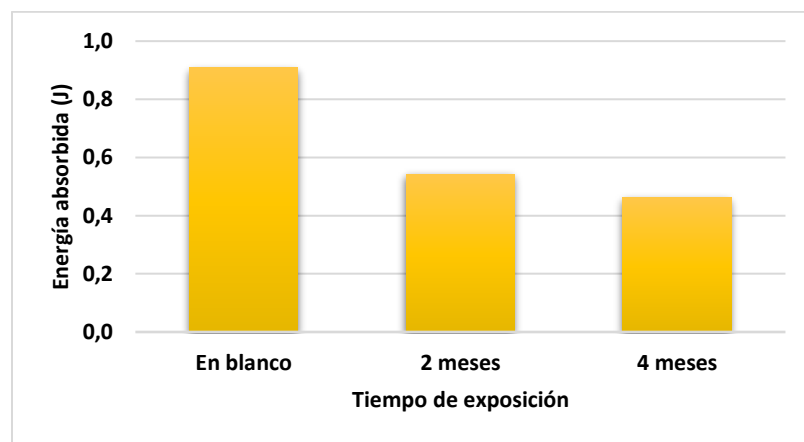
Resultados para el ensayo de impacto Charpy

Muestra	Medidas (mm)				Energía absorbida (J)	Temperatura (°C)
	Largo	Ancho	Espesor	Longitud entalla		
En blanco	80,8	10,4	2,7	2,0	0,9	24,0
2 meses	80,7	9,2	2,8	2,0	0,5	24,0
4 meses	80,7	9,7	2,7	2,0	0,5	24,0

Los resultados del ensayo permiten conocer la cantidad de energía absorbida por el material, esta es, la cantidad de energía que puede soportar el material antes de fracturarse. Tal como se muestra en la **Figura 2**, a mayor tiempo de exposición, la energía absorbida por la muestra disminuye. Se observa que el mayor cambio en la energía absorbida se presenta entre el estado de manufactura (blanco) y los 2 meses de exposición.

Figura 2

Energía absorbida por las muestras a diferentes tiempos de exposición



Con base en lo descrito en el párrafo anterior, es posible afirmar que la mayor afectación del material respecto a la energía absorbida ocurre en los primeros 2 meses de exposición, posteriormente, entre los 2 y 4 meses, la energía absorbida disminuye en menor medida, dando a entender, que la pérdida de esta propiedad por unidad de tiempo es menor.

4.2.3.3 Módulo de elasticidad. En este ensayo se mide la resistencia de un material a una fuerza de tensión aplicada permitiendo determinar propiedades mecánicas tales como el límite elástico y resistencia a la tensión, asimismo proporciona información respecto a la ductilidad del material. Los valores obtenidos en este ensayo se registran en la Tabla 10, en las Figura 3 y 4 se observan las gráficas obtenidas para la muestra sin exposición, la muestra expuesta durante 2 meses en color rojo y la muestra expuesta durante 4 meses.

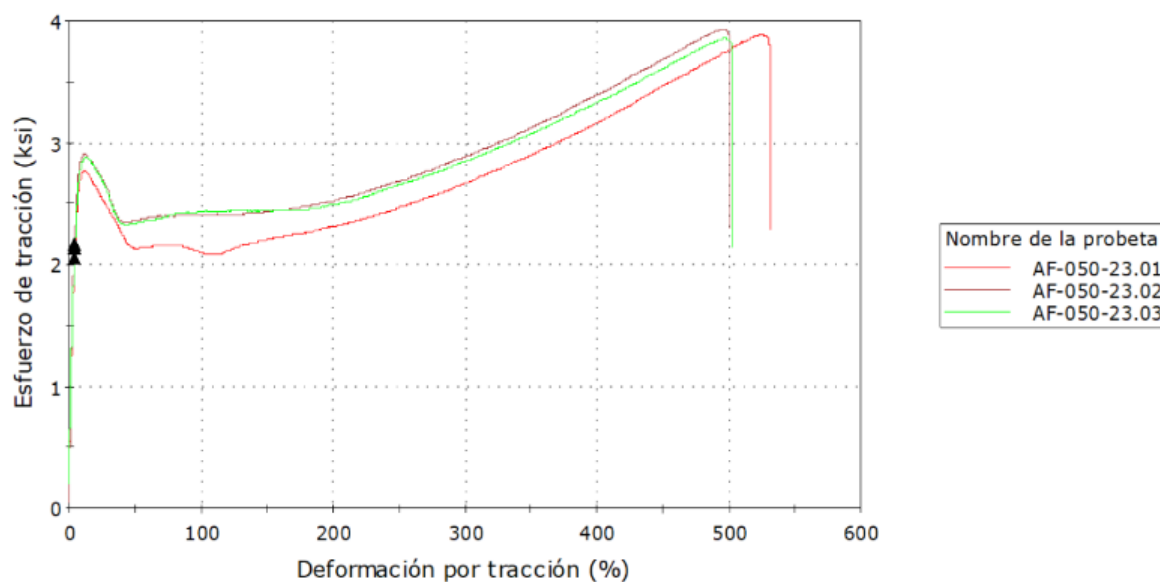
Tabla 10

Resultados para el ensayo de módulo de elasticidad

Muestra	Deformación a la rotura (%)	Esfuerzo a fluencia (psi)	Esfuerzo máximo (psi)	Esfuerzo a rotura (psi)
En blanco	512,0	2122,8	3888,4	3568,1
2 meses	560,0	2070,1	4140,9	3830,3
4 meses	548,2	2023,2	3801,6	3635,5
Promedio	540,1	20720	3943,6	3678,0

Figura 3

Módulo de elasticidad para muestra en blanco

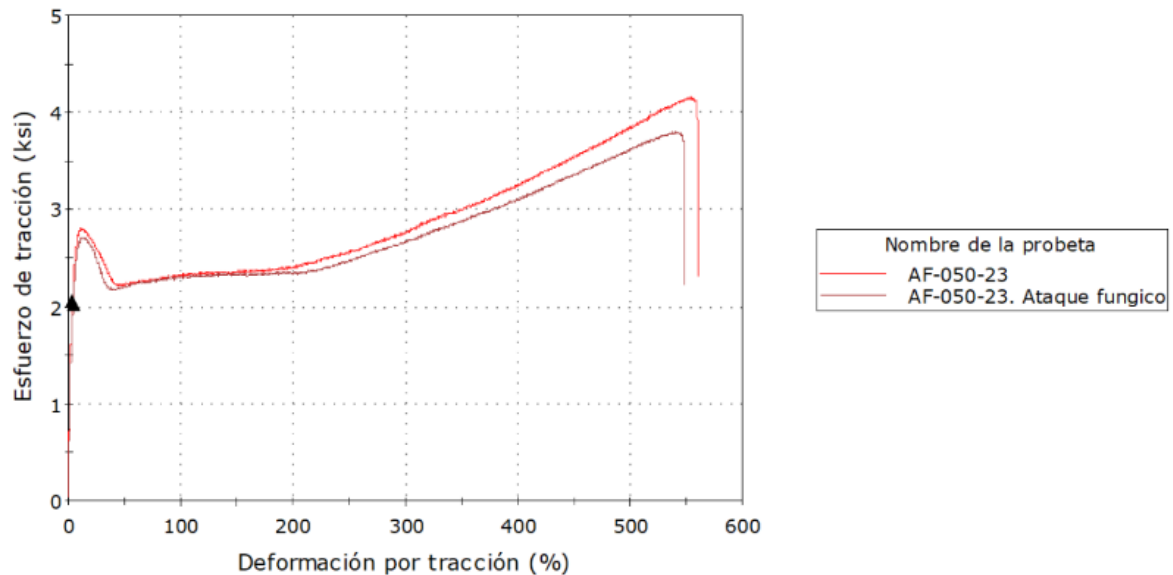


*Nota. * Las 3 gráficas corresponden a muestras sin ataque fúngico.*

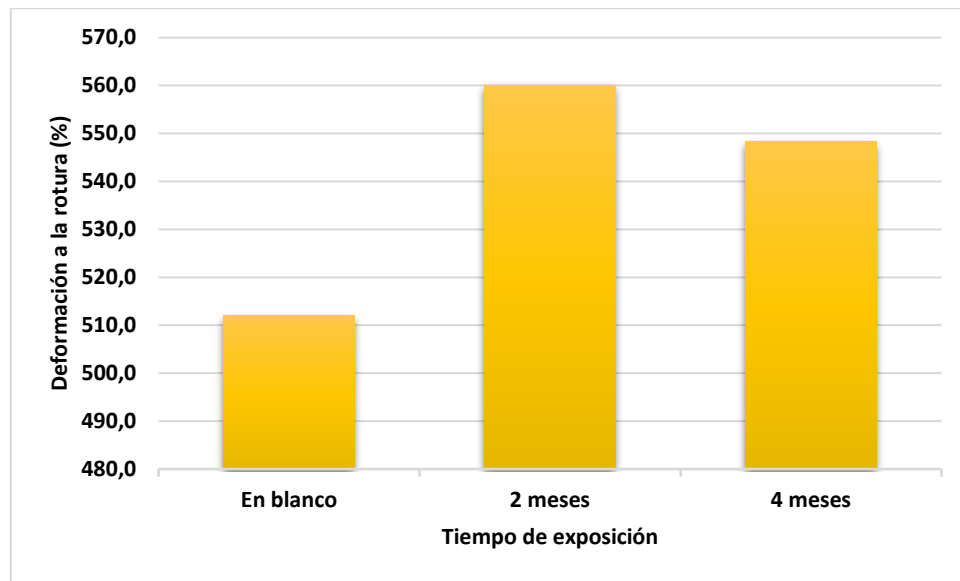
Figura 4

Módulo de elasticidad para muestras expuestas durante 2 (AF-050-23) y 4 (AF-050-23.

Ataque Fúngico) meses



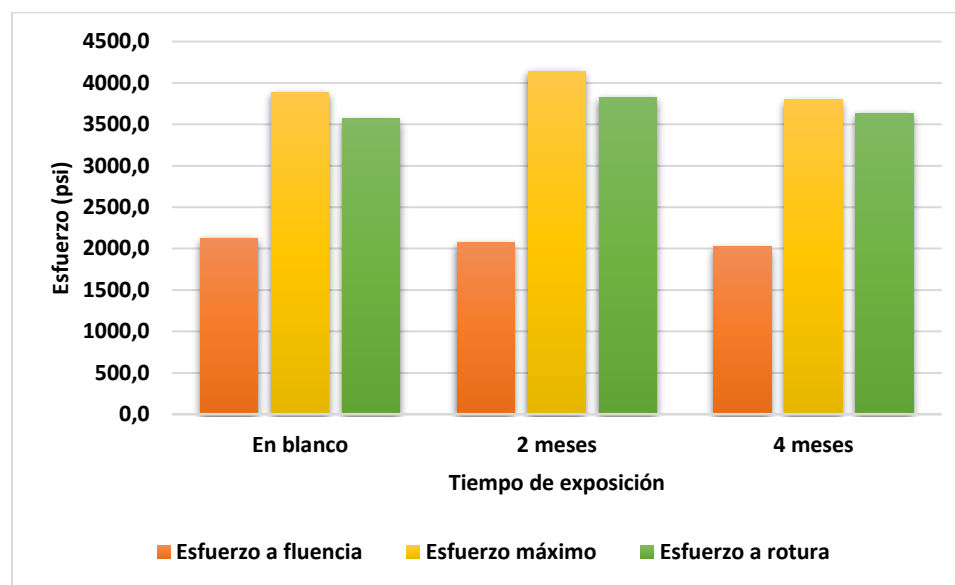
El porcentaje de deformación a la rotura indica cuánto puede deformarse un material antes de fracturarse, en la **Tabla 10** se evidencia que la muestra expuesta durante 2 meses exhibe un incremento en este porcentaje en comparación con la muestra en estado de manufactura, mientras que, la muestra expuesta durante 4 meses experimenta una reducción. Este incremento en la capacidad de deformación puede sugerir una mayor ductilidad del material. En la **Figura 5** se observa este cambio de manera gráfica.

Figura 5*Deformación a la rotura a diferentes tiempos de exposición*

El esfuerzo a fluencia marca el límite entre la región elástica y región plástica del material, es decir, donde este comienza a deformarse de manera permanente. En la **Figura 5** se aprecia que este esfuerzo a la fluencia disminuye con el aumento en el tiempo de exposición, lo cual indica que el material soporta un menor esfuerzo antes de llegar a la deformación plástica.

El esfuerzo máximo indica el límite de carga que puede soportar el material antes de llegar al punto de ruptura, evidenciando el límite de resistencia del material. Igual que para el caso de la deformación a la rotura, el esfuerzo máximo entre las 3 muestras es mayor en aquella expuesta durante 2 meses al ataque fúngico.

Finalmente, el esfuerzo a rotura es el esfuerzo en el cual el material fractura determinando la resistencia máxima del material antes de fallar. Esta propiedad denota el mismo comportamiento que la deformación a la ruptura y el esfuerzo máximo. En la **Figura 6** se muestra de manera gráfica la comparativa entre los ensayos.

Figura 6*Comparativa entre ensayos mecánicos*

5. Conclusiones

Los mecanismos de daño asociados al ataque fúngico en los materiales poliméricos se asocian a cambios físicos, químicos y mecánicos. En el presente estudio a nivel físico se identificó disminución de la rugosidad con pérdida de masa, luego de la exposición de tuberías de polietileno a cepas fúngicas nativas de Colombia durante 2 y 4 meses. A nivel químico se observó alteraciones en la estructura con apariciones de enlaces asociados a procesos de oxidación relacionado con biodegradación.

En las propiedades mecánicas se encontró alteraciones en la disminución de la dureza y energía absorbida, así como variaciones en el módulo de elasticidad, factores que repercuten en la integridad de la tubería y su confiabilidad, dado que no garantiza las condiciones requeridas para las operaciones de servicio.

6. Recomendaciones

Se sugiere continuar con el estudio durante mayores tiempos de exposición a fin de evaluar el comportamiento del material y realizar ensayos químicos más especializados que permitan una identificación más apropiada de los componentes de las muestras, tales como resonancia magnética nuclear. Asimismo, se recomienda realizar ensayos de medición de rugosidad con el fin de cuantificar este parámetro y ensayo de espectroscopía fotoeléctrica de rayos X (ESCA) que permite analizar la composición cualitativa y cuantitativa que además permite determinar el estado químico de los elementos en la superficie de un material.

Se recomienda hacer uso de esta biodegradación para posteriores estudios que permitan evaluar la eficacia de los microorganismos a fin de disminuir los desechos generados por el polietileno.

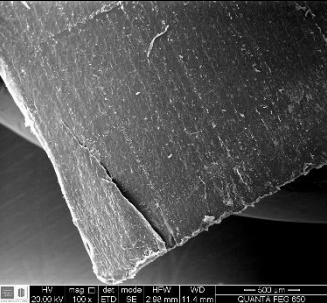
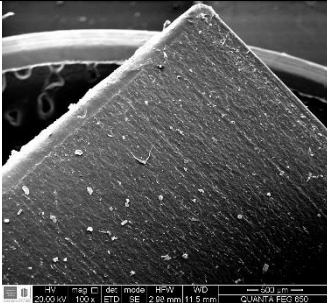
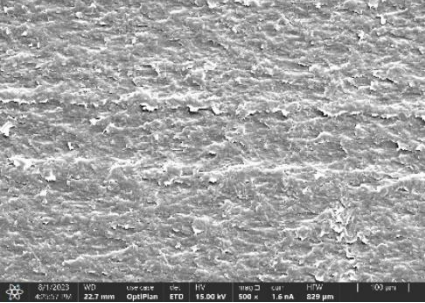
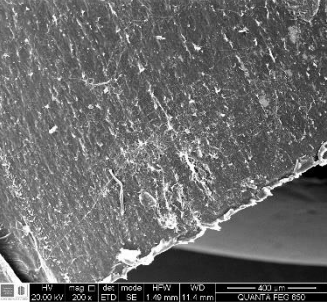
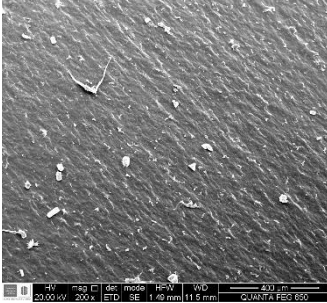
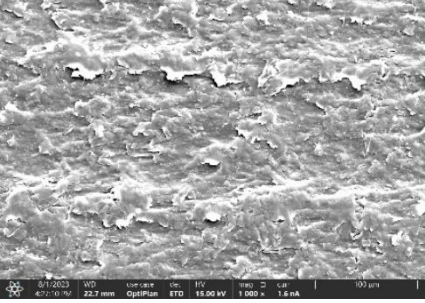
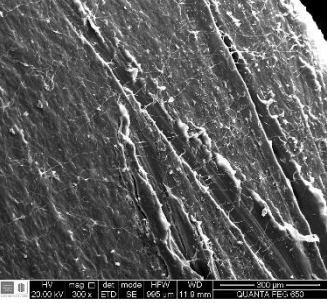
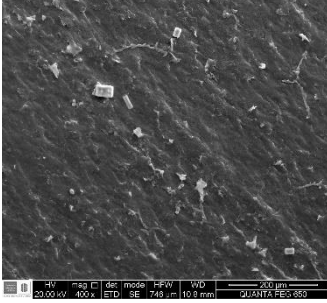
Referencias bibliográficas

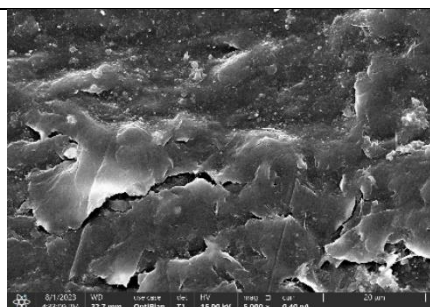
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales 7ª edición*.
<http://latinoamerica.cengage.com>
- ASM International. (2003). *Characterization and failure analysis of plastics*. ASM International.
- ASTM G21-15. (2021). Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi. *ASTM International*.
<https://doi.org/10.1520/G0021-15R21E01>
- Carraher, C. E., & Seymour, R. B. (Raymond B. (2003). *Polymer Chemistry*. M. Dekker.
- Correa Restrepo, M. DE, COBA GUTIERREZ Microbióloga, B. DE, & CRISTINA ZAPATA Bióloga, A. L. (2021). *Morfología y clasificación de los hongos*.
- Delgado Fernández, M. E. (2020). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL*.
- Labeaga, A., Tutor, V., De Dios, J., Ruiz, C., & De Ciencias, F. (2018). *TRABAJO DE FIN DE MÁSTER MÓDULO DE QUÍMICA INORGÁNICA E INGENIERÍA QUÍMICA Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA*.
- NTC 1746. (2016). Plásticos. Tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión. *NTC 1746*.
- NTC 2505. (2006). *Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales*.

- NTC 3410. (1994). *Plásticos. Accesorios de polietileno tipo campana para tubería de polietileno con diámetro exterior controlado tipo IPS o CTS.*
- NTC 3728. (2001). *Gasoductos. Líneas de transporte y redes de distribución de gas.*
- NTC 3742. (1999). *Práctica normalizada para instalación subterránea de tubos termoplásticos de presión.*
- Pavco Wavin. (2020). *Tipos de tuberías para la conducción de gas.* Pavco Wavin .
- Shah, V. (2007). *Handbook of plastics testing and failure analysis.*
- Spina, F., Tummino, M. L., Poli, A., Prigione, V., Ilieva, V., Cocconcelli, P., Puglisi, E., Bracco, P., Zanetti, M., & Varese, G. C. (2021). Low density polyethylene degradation by filamentous fungi. *Environmental Pollution*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116548>
- Universidad de Sevilla. (2006). *Materiales poliméricos: índice general.*
- Zhang, C., Mu, Y., Li, T., Jin, F.-J., Jin, C.-Z., Oh, H.-M., Lee, H.-G., & Jin, L. (2023). Assembly strategies for polyethylene-degrading microbial consortia based on the combination of omics tools and the “Plastisphere”. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1181967>

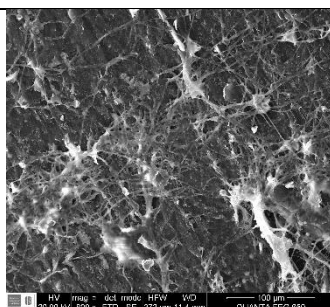
Apéndices

Apéndice A. Resultados de los ensayos SEM

En blanco	2 meses	4 meses
 5/1/2023 WFO User:carla Ver: RTV mag:2 cat: 120x 1.6 nA 500 µm	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 100x ETD SE 2.68 mm 11.4 mm QUANTA FEG 650	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 100x ETD SE 2.68 mm 11.5 mm QUANTA FEG 650
120X	100X	100X
 5/1/2023 WFO User:carla Ver: RTV mag:2 cat: 500 µm	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 200x ETD SE 1.49 mm 11.4 mm QUANTA FEG 650	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 200x ETD SE 1.49 mm 11.5 mm QUANTA FEG 650
500X	200X	200X
 5/1/2023 WFO User:carla Ver: RTV mag:2 cat: 100 µm	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 300x ETD SE 1.65 mm 11.5 mm QUANTA FEG 650	 4/1/2023 mag: C det: mode: HV-W VFO 23.00 kV 400x ETD SE 1.49 mm 10.5 mm QUANTA FEG 650
1.000X	300X	400X



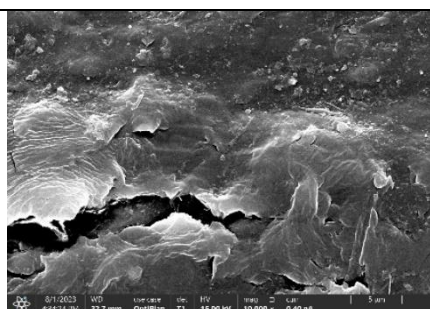
5.000X



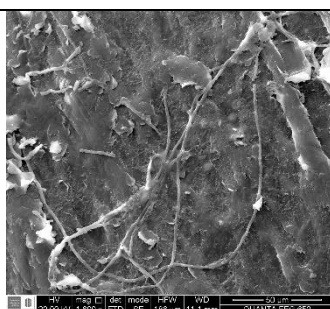
800X



800X



10.000X

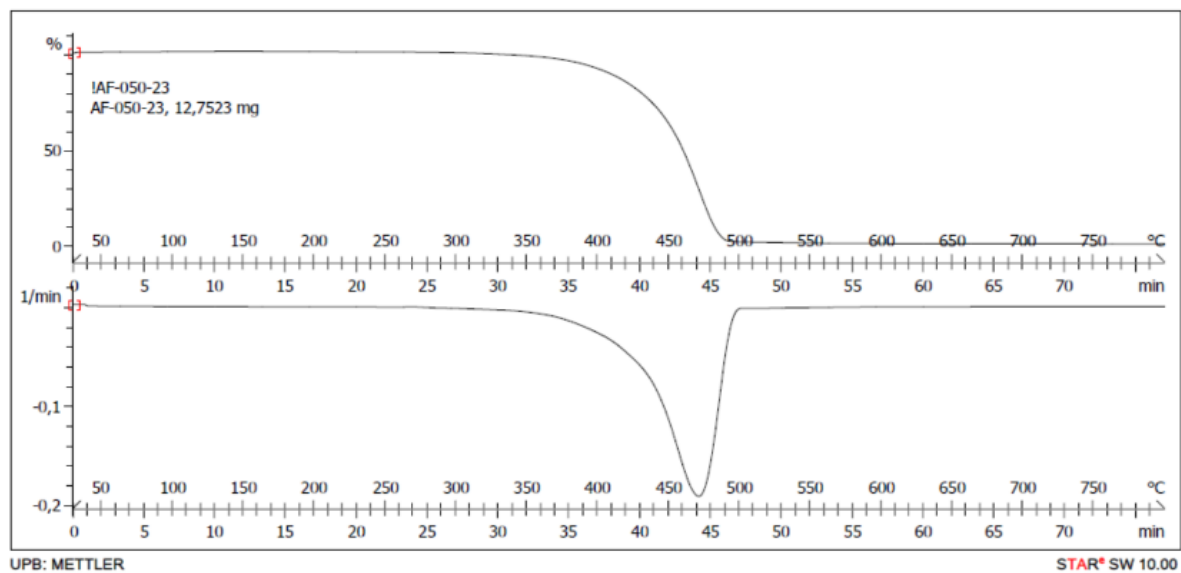


1.600X

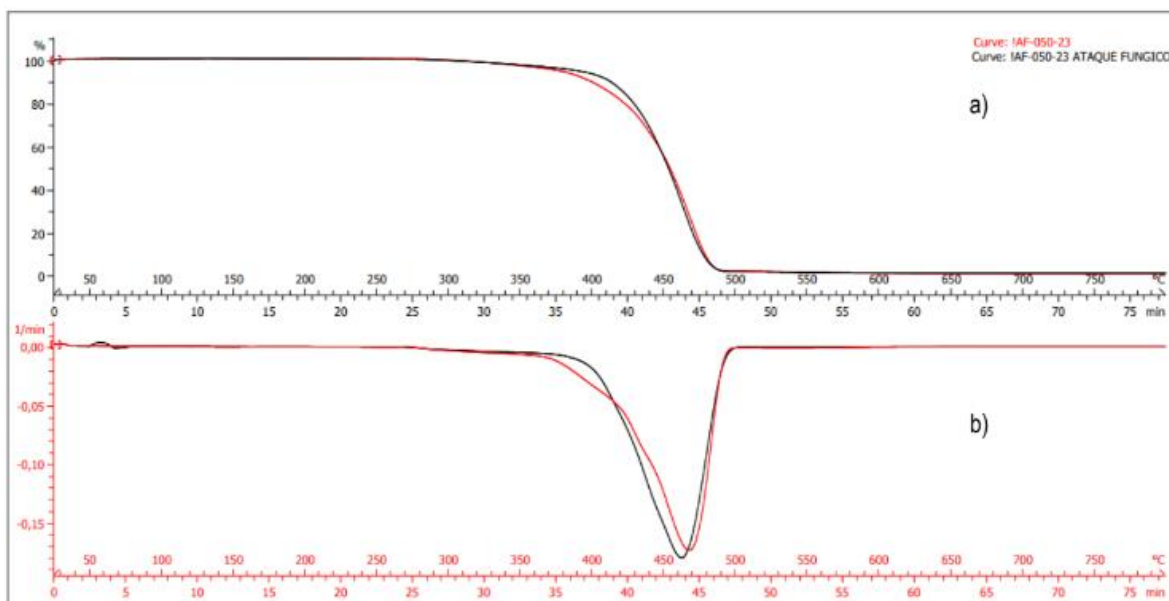


1.600X

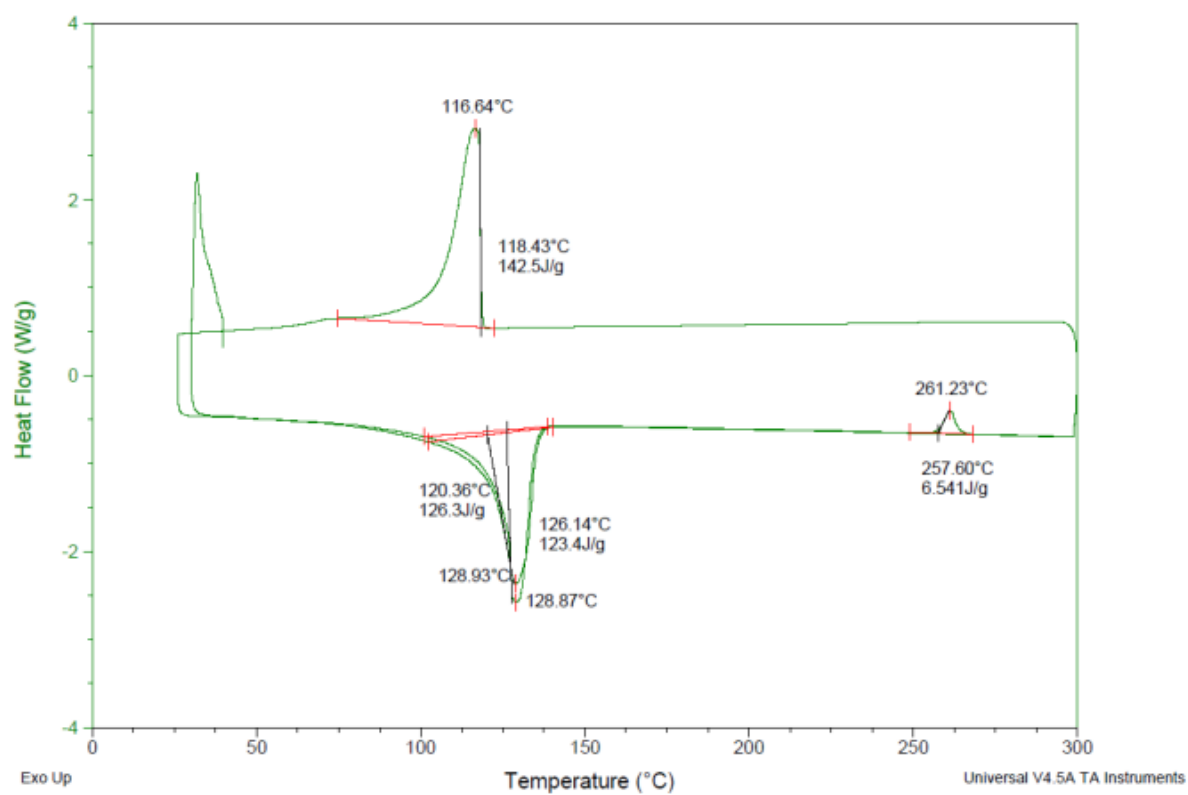
Apéndice B. Apéndice A. Resultados de los ensayos TGA



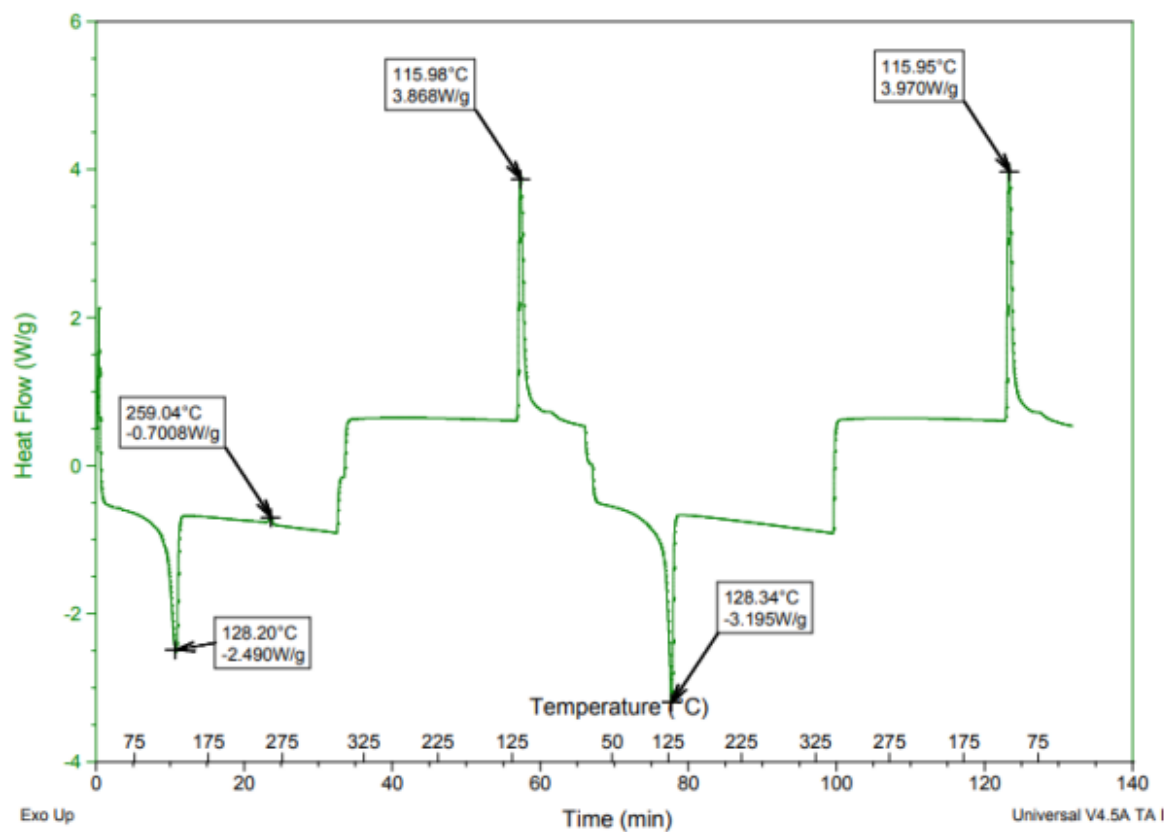
*Nota. * Resultados TGA para muestra sin ataque fúngico. La gráfica superior corresponde al porcentaje de masa, la gráfica inferior corresponde a la velocidad de pérdida de masa.*



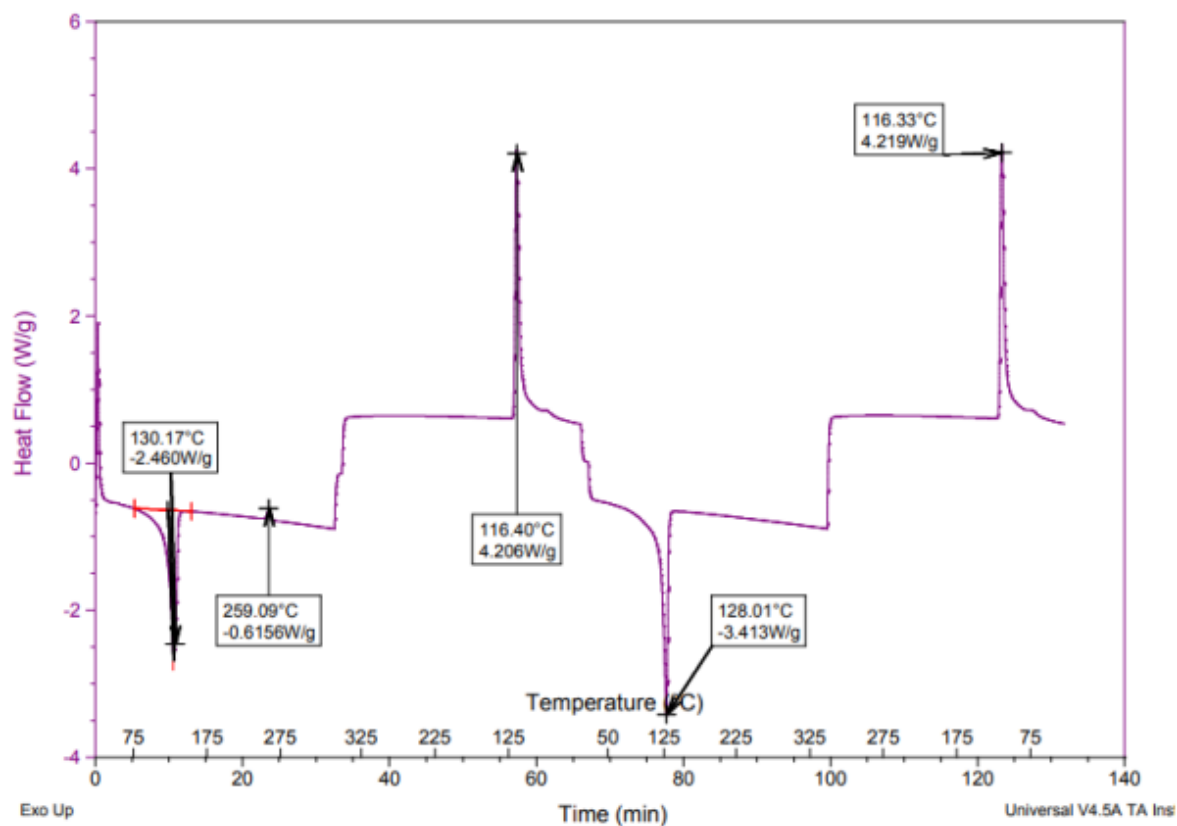
*Nota. * Resultados TGA para muestra expuesta durante 2 meses “AF-050-23” y muestra expuesta durante 4 meses “AF-050-23 ATAQUE FÚNGICO”. La gráfica superior corresponde al porcentaje de masa, la gráfica inferior corresponde a la velocidad de pérdida de masa.*

Apéndice C. Resultados de los ensayos DSC

*Nota. * Resultados DSC para muestra sin ataque fúngico. La gráfica corresponde a 4 barridos mostrados de manera cíclica.*

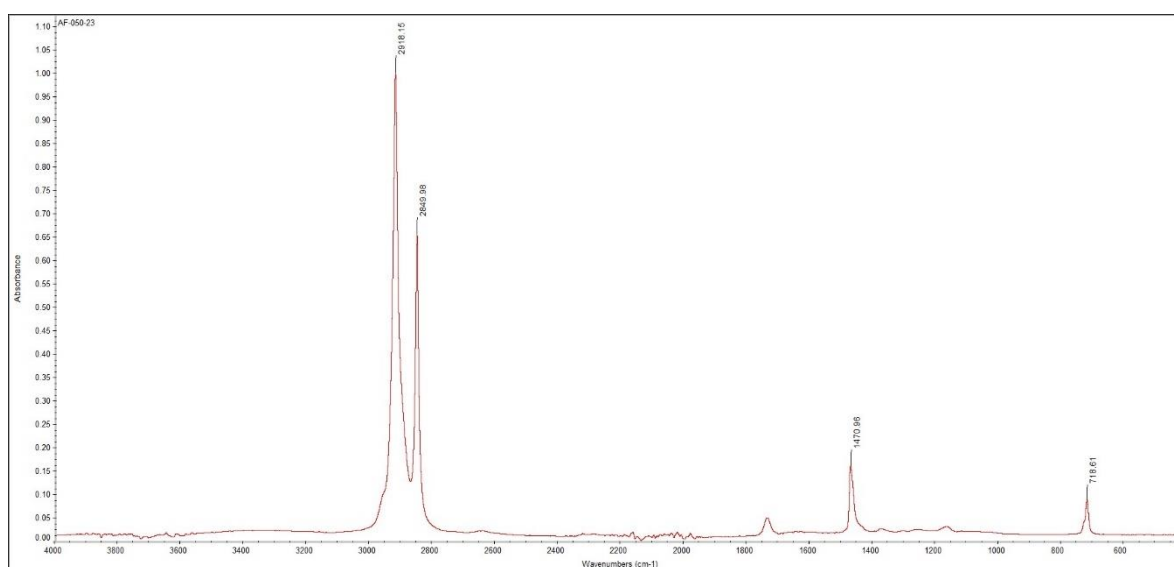


Nota. * Resultados DSC para muestra expuesta durante 2 meses. La gráfica corresponde a 4 barridos.

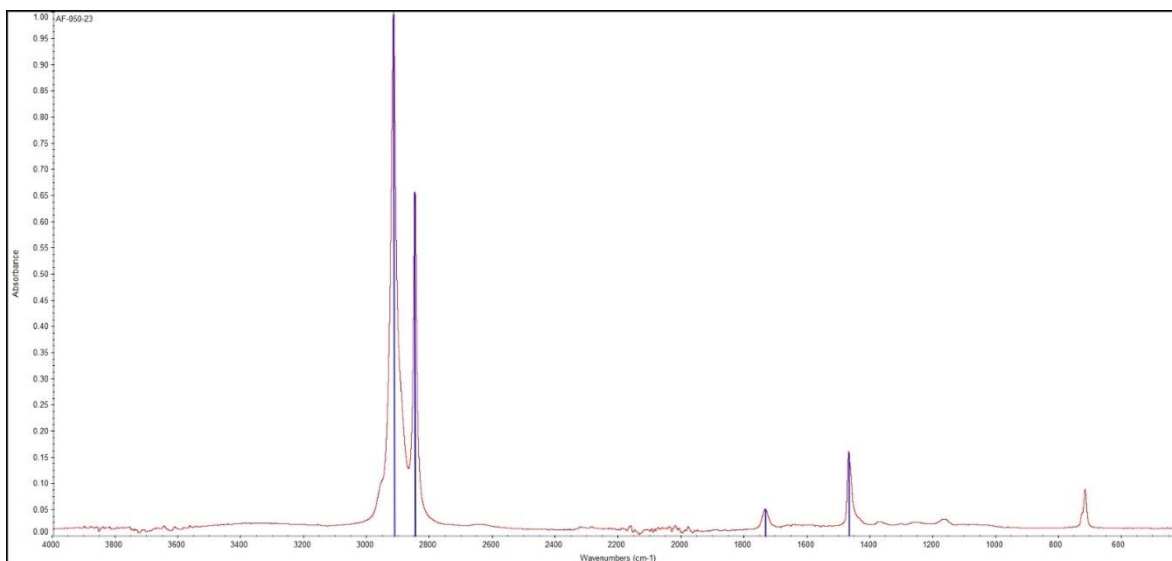


Nota. * Resultados DSC para muestra expuesta durante 4 meses. La gráfica corresponde a 4 barridos.

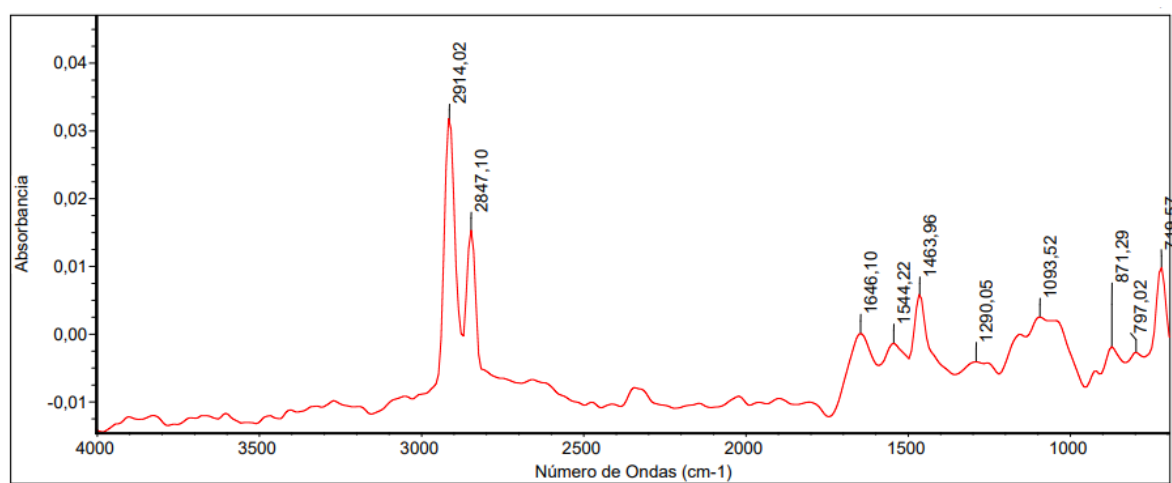
Apéndice D. Resultados de los ensayos FTIR



Nota. * Resultados FTIR para muestra sin ataque fúngico.

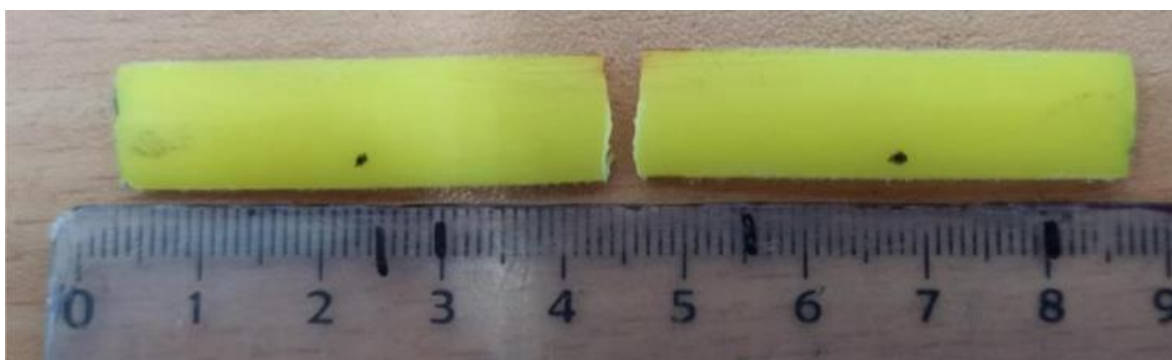


Nota. * Resultados FTIR para muestra expuesta durante 2 meses.



Nota. * Resultados FTIR para muestra expuesta durante 4 meses.

Apéndice E. Resultados de los ensayos impacto charpy



*Nota. * Muestra sin ataque fúngico después del ensayo de impacto charpy.*



*Nota. * Muestra expuesta durante 2 meses después del ensayo de impacto charpy.*



*Nota. * Muestra expuesta durante 4 meses después del ensayo de impacto charpy.*

Apéndice F. Equipo utilizado para cada ensayo

Ensayo	Equipo
Análisis termogravimétrico (TGA)	Tga/sdta851e mettler toledo
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	Calorímetro diferencial de barrido marca: TA Instrument. Modelo: Q2000-Q2001-Q2002

Dureza shore	Durómetro PTC modelo 409 en escala tipo D
Espectrometría infrarroja (FTIR)	Espectrometro FT-IR. Marca: Thermo scientific. Modelo: is50 FT-IR.
Impacto charpy	Péndulo de impacto SATEC. Termómetro de contacto Easy View 10, EXTECH Instruments
Inspección visual y levantamiento metrológico	Pie de rey, flexómetro
Microscopía electrónica de barrido (SEM)	Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650
Módulo de elasticidad	Máquina universal de Ensayos mecánicos, marca: Instron, modelo:5582. Pie de rey, marca: Mitutoyo, Modelo 530-118B-10