



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

**Obtención por extrusión térmica de filamento a base de un
termoplástico de poliuretano (TPU) y residuos de madera (aserrín)
para inyección aditiva**

Tesis presentada al **Colegio de Física**

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciatura

Licenciado en Física

Presenta

Fernando López Soriano

Directores De Tesis

Dr. Ricardo Agustín Serrano

Dr. Marco Antonio Morales Sánchez

Puebla, Pue.

Noviembre, 2024

Título: “Obtención por extrusión térmica de filamento a base de un termoplástico de poliuretano (TPU) y residuos de madera (aserrín) para inyección aditiva.”

Estudiante: Fernando López Soriano

COMITÉ

Dr. Moreno Barbosa Eduardo

Presidente

Dr. Lozada Morales Rosendo Leovigildo

Secretario

Ing. Rendón Delgado Luis Alberto

Vocal

Dr. Rojas Rodríguez José Fernando

Suplente

Dr. Ricardo Agustín Serrano

Asesor

Dr. Morales Sánchez Marco Antonio

Co-Asesor

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA:

INDICE GENERAL

INDICE

RESUMEN	8
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
Capítulo 1	11
INTRODUCCIÓN	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Caso de estudio.....	12
Capítulo 2	14
MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 El Poliuretano Termoplástico	14
2.2 Estructura y composición.....	14
2.3 Propiedades del TPU	15
2.3.1 Aplicaciones del TPU	16
2.3.2 Aplicaciones enfocadas en la impresión 3D	17
2.3.3 Procesabilidad del TPU.....	18
2.4 Impacto Ambiental y Reciclabilidad	19
2.4.1 Impacto en el medio ambiente.....	19
2.4.2 Reciclabilidad del TPU	19
2.4.3 Comportamiento en condiciones extremas	20
2.5 La madera.....	21
2.5.2 Procesamiento de la Madera y Aserrín como Subproducto	22
2.5.3 Características del Aserrín	23

2.5.3.1	Impacto Ambiental del Aserrín	23
2.5.3.2	Reciclabilidad del Aserrín.....	24
2.5.4	Innovación en Materiales.....	24
2.6	Economía Circular.....	25
2.6.1	Principios de la economía circular.....	25
2.6.2	Beneficios de la economía circular.....	26
2.7	Análisis Termogravimétrico TGA.....	27
2.7.1	Fundamentos del TGA.....	27
	Procedimiento para la elaboración del TGA.....	28
2.7.2	Procedimiento para la elaboración del TGA.....	28
2.7.3	Interpretación de la Curva TGA.....	28
2.7.4	Aplicaciones del TGA	29
2.8	FTIR.....	29
2.8.1	Principios básicos de la espectroscopía FTIR.....	29
2.8.2	Aplicaciones de FTIR.....	30
2.8.3	Procedimiento de un análisis FTIR	30
2.8.4	Análisis FTIR en TPU/Madera.....	31
2.9	Espectros característicos	32
2.9.1	Ventajas del análisis FTIR en compuestos TPU/madera.....	32
2.10	Esfuerzo y deformación.....	33
2.10.1	Comportamiento mecánico de materiales compuestos	34
Capítulo 3		35
METODOLOGÍA.....		35
3	Materiales.....	35
3.2	Preparación del Equipo y Materiales.....	35

3.2.1	Configuración del Extrusor	36
3.2.2	Proceso de Extrusión	36
3.2.3	Limpieza y Mantenimiento	36
3.2.4	Repetición del Proceso.....	36
Capítulo 4		38
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.2	Resultado de proceso de TGA.....	40
4.3	Resultado de estudios de FTIR	41
4.4	Resultados de Deformación	45
4.5	ANALISIS TGA.....	49
4.6	Análisis de FTIR	52
4.7	Análisis de Deformación	54
4.8	Comparación de las formulaciones	55
	Comportamiento mecánico	57
	Conclusión.....	78
	Bibliografía.....	81

RESUMEN

El trabajo presente se enfoca en la creación y desarrollo de un material compuesto innovador que combine TPU (Poliuretano Termoplástico) con aserrín de madera con modelado de hilo, buscando crear un material sostenible y económicamente viable con aplicación a la tecnología de impresión 3D por inyección aditiva.

La creciente preocupación por el impacto ambiental de los plásticos y la necesidad de desarrollar materiales sostenibles ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras en la industria de los polímeros. El poliuretano termoplástico (TPU) es un material ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a su flexibilidad, durabilidad y procesabilidad. Sin embargo, su producción y desecho contribuyen significativamente a la contaminación ambiental.

Se utilizaron herramientas mecánicas específicas, como los tamices ASTM (American Society for Testing and Materials), que desempeñaron un papel fundamental en el proceso de filtrado y separación del aserrín para obtener el tamaño de partícula deseado. El tamaño de las partículas de aserrín fue un factor determinante en la producción de diversos tipos de filamentos resultantes de las mezclas de TPU y aserrín. Estos tamices ASTM permitieron una clasificación precisa del aserrín, asegurando que cada mezcla tuviera las propiedades físicas adecuadas para cumplir con los estándares de calidad necesarios para su aplicación final.

Además, se empleó un extrusor de polímeros para procesar diversas mezclas de aserrín y TPU en diferentes proporciones. Durante la extrusión, se ajustaron tanto las velocidades como las temperaturas para optimizar el proceso y obtener las características deseadas en el material final. Tras la extrusión, el material resultante fue sometido a procesos adicionales, incluyendo enfriamiento inmediato y secado, para asegurar su estabilidad y calidad. Estos pasos fueron cruciales para garantizar que las propiedades físicas y mecánicas del material extruido cumplieran con los estándares requeridos para su aplicación específica.

El Análisis Termogravimétrico (TGA) se utilizó para analizar el nuevo material con el fin de evaluar su estabilidad térmica y composición. Durante el experimento, se sometió el material a un aumento controlado de temperatura mientras se medía la pérdida de masa. El termograma

resultante mostró varias etapas de descomposición, lo que permitió identificar las temperaturas a las que diferentes componentes del material se descomponen o volatilizan. Esto proporcionó información clave sobre la composición del material, su resistencia al calor, y su idoneidad para aplicaciones en entornos de alta temperatura.

La obtención de estos nuevos materiales tiene el potencial de ofrecer una alternativa innovadora y sostenible para la impresión en 3D, que además resulta ser más económica y eficiente. Este enfoque no solo promueve la conservación del medio ambiente, sino que también amplía las posibilidades creativas y funcionales en la fabricación aditiva. La versatilidad y utilidad de estos materiales permiten la creación de objetos personalizados y de diseño a medida, satisfaciendo las demandas específicas de diversos sectores industriales y creativos. Esto representa un avance significativo en la tecnología de impresión en 3D, proporcionando una opción más accesible y respetuosa con el entorno.

Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un material compuesto innovador que combine TPU (Poliuretano Termoplástico) con aserrín de madera con moldeo de hilo, buscando crear un material sostenible y económicamente viable con aplicación a la tecnología de impresión 3D por inyección aditiva.

Objetivos específicos

- Desarrollar un proceso de mezcla y moldeo de hilo: Implementar y ajustar un método de moldeo de hilo que permita integrar el aserrín con el TPU de manera uniforme y efectiva, asegurando una distribución homogénea de ambos componentes en el material final.
- Caracterizar el TPU y el aserrín de madera: Analizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del TPU y del aserrín de madera para entender su compatibilidad y sus posibles interacciones en el material compuesto.
- Evaluar las propiedades del material compuesto: Realizar pruebas de resistencia, flexibilidad y termogravimétricas para evaluar el desempeño del material

Palabras clave: Material compuesto, TPU (Poliuretano Termoplástico), Aserrín de madera, Sostenible, Impresión 3D, Inyección aditiva, Impacto ambiental, Materiales compuestos.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La inquietud por el daño ambiental provocado por los plásticos y la urgente necesidad de crear materiales sostenibles han impulsado la innovación en la industria de los polímeros.

Existen muchos y diversos tales como el PHA (Polihidroxialcanoatos), PBAT (Polibutileno adipato-co-tereftalato), PBS (Polibutileno succinato), Plásticos a base de almidón (Starch-Based Plastics) o el más usado actual el PLA (Ácido Poliláctico), cuyo origen y uso está enfocado la creación de materiales más amigables con el medioambiente. Enfocando el poliuretano termoplástico (TPU), es ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones gracias a su extraordinaria flexibilidad, durabilidad y facilidad de procesamiento. No obstante, su producción y eliminación generan una considerable contaminación ambiental, lo que destaca la necesidad de desarrollar opciones más respetuosas con el medio ambiente.

Por otro lado, la industria maderera genera grandes cantidades de aserrín como subproducto, el cual a menudo es considerado un residuo de bajo valor y puede representar un problema de gestión de desechos. La utilización de este aserrín en materiales compuestos podría no solo mitigar el impacto ambiental al reducir los desechos, sino también disminuir la dependencia de plásticos de origen derivados del petróleo y los costos asociados.

La transformación de las materias primas en productos mejorados y que pueden ser de mayor valor y hasta a un bajo costo de producción por medio de las reacciones y combinaciones químicas es una industria importante, obteniéndose una gran variedad de productos por medio de síntesis química. (J. Smith, 2012).

La impresión 3D, hoy en día conocida también como Manufactura Aditiva (MA), fue desarrollada en los años 1980's, y desde ese tiempo ha sido usada para realizar Prototipos Rápidos (RP), en los últimos años la impresión 3D o MA ha evolucionado de manera tal que, ya es usada para procesos de producción de alta demanda y tiene el potencial de producir

productos finales que son completamente funcionales o en la reparación de piezas afectadas por el uso. (Ceballo, 2019)

La integración del aserrín de madera en el TPU abre nuevas oportunidades en el ámbito de la impresión 3D. La impresión 3D ha revolucionado la fabricación al permitir la producción de objetos complejos y personalizados con alta precisión y eficiencia. Sin embargo, la mayoría de los materiales utilizados en la impresión 3D son plásticos derivados del petróleo, lo que contribuye a los problemas ambientales, los plásticos derivados del petróleo no son biodegradables, lo que significa que los objetos impresos en 3D, al final de su vida útil, contribuyen a la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente.

La búsqueda de materiales alternativos para la impresión 3D que sean más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente es, por lo tanto, una prioridad. (Parres, 2023)

El interés por estos nuevos materiales va más allá de la simple sustitución de los recursos tradicionales; se trata de una transformación hacia un futuro donde la sostenibilidad sea el eje central de la producción y el consumo. La industria, por su parte, reconoce que la adopción de materiales compuestos respetuosos con el medio ambiente no solo responde a una demanda ética y social, sino que también representa una oportunidad económica al posicionarse como pionera en tecnologías verdes y sostenibles.

Este contexto ha generado una carrera por descubrir y perfeccionar compuestos que puedan reducir la huella ecológica, aumentar la eficiencia energética, y al mismo tiempo, ofrecer las propiedades necesarias para aplicaciones industriales, desde la construcción y la automoción hasta la electrónica y los envases. Así, el desarrollo de un nuevo material que sea innovador, eficiente y, sobre todo, amigable con el medio ambiente, se ha convertido en un objetivo clave para avanzar hacia una economía más verde y sostenible.

1.2. Caso de estudio

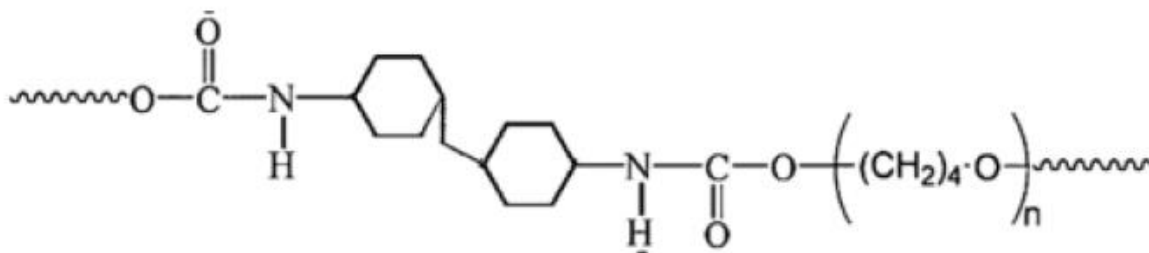
El presente trabajo busca la combinación de poliuretano termoplástico (TPU) y aserrín que podría dar lugar a un nuevo material compuesto con varias ventajas potenciales, tanto desde el punto de vista funcional como ambiental.

Algunas de las expectativas acerca del nuevo material compuesto serían la reducción de la huella ambiental, al incorporar aserrín, un subproducto de la industria de la madera, en el TPU, se reduce la cantidad de plástico puro necesario y se reutiliza un material que de otro modo podría ser desechado, disminuyendo así la huella ecológica del material. Propiedades mecánicas mejoradas ya que el aserrín podría actuar como un refuerzo, mejorando algunas propiedades mecánicas del TPU, como la rigidez y la resistencia al desgaste. Esto podría ser beneficioso en aplicaciones que requieran un material más fuerte y resistente. La mezcla de aserrín, un material de bajo costo, con TPU podría resultar en una reducción del costo total del material, haciendo que el compuesto sea más económico para ciertas aplicaciones. Incluso siendo el TPU un material no biodegradable, la inclusión de un componente natural como el aserrín podría acelerar la biodegradación del material compuesto, al menos en parte, una vez desechado, dependiendo de las condiciones ambientales. Pudiendo incluso realizar aplicaciones especializadas encontrando aplicaciones en sectores como la construcción, fabricación de muebles, o productos de consumo, donde la combinación de durabilidad, estética natural y sostenibilidad es valorada.

MARCO TEÓRICO

El poliuretano termoplástico, comúnmente conocido como TPU, es un polímero versátil y altamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y de consumo. A continuación, se muestra una visión detallada sobre el TPU.

El TPU es un copolímero que combina segmentos duros y blandos en su estructura molecular, lo que le otorga una combinación única de propiedades. Los segmentos duros suelen estar formados por diisocianatos (como el MDI o TDI) y extendidos con cadenas cortas de glicoles, mientras que los segmentos blandos están hechos de polioles de mayor peso molecular. Esta combinación de segmentos proporciona al TPU su característica flexibilidad y resistencia mecánica.



pág. 14

2.3 Propiedades del TPU

El TPU posee varias propiedades que le hacen ser versátil y útil al momento de crear componentes u objetos específicos en la impresión 3D, algunas de las propiedades más relevante son a continuación:

<i>Propiedad</i>	<i>Definición</i>
<i>Elasticidad y Flexibilidad</i>	El TPU es conocido por su alta elasticidad, lo que significa que puede estirarse significativamente y regresar a su forma original sin deformarse permanentemente. Esta propiedad lo hace ideal para aplicaciones que requieren materiales flexibles y duraderos. Teniendo un Módulo de Young de 40 kPa, en forma de filamento.
<i>Resistencia al Desgaste</i>	Es extremadamente resistente al desgaste, lo que lo convierte en un material de elección para aplicaciones que implican fricción o abrasión.
<i>Resistencia a Aceites y Químicos</i>	El TPU es resistente a muchos aceites, grasas, y productos químicos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en entornos industriales donde estos elementos están presentes.
<i>Transparencia y Colorabilidad</i>	El TPU puede ser fabricado en versiones transparentes, lo que es útil en aplicaciones donde la claridad es importante. Además de ser fácilmente coloreado durante el proceso de fabricación.

*Resistencia a altas y bajas
Temperaturas*

Mantiene su flexibilidad y otras propiedades mecánicas incluso a bajas temperaturas, lo que lo hace adecuado para su uso en condiciones extremas. Soportando temperaturas desde -40°C hasta 120° C.

Biocompatibilidad

Algunos grados de TPU son biocompatibles, lo que los hace adecuados para aplicaciones médicas, como catéteres, dispositivos médicos, y componentes de prótesis.

Tabla 1. Propiedades del TPU

2.3.1 Aplicaciones del TPU

El TPU es un material extremadamente versátil, y se utiliza en una amplia gama de industrias y productos; en la Industria Automotriz, el TPU se utiliza para fabricar piezas que requieren resistencia al desgaste y a los productos químicos, como juntas, sellos, componentes de interiores, y protectores.

Mientras que, en la Industria Médica como material biocompatible, el TPU se emplea en dispositivos médicos como catéteres, bolsas para suero, tubos y otros productos que requieren flexibilidad, resistencia y seguridad al contacto con el cuerpo humano.

También en la Electrónica y Tecnología se utiliza en cualquier aislante necesario, cables y otros dispositivos electrónicos debido a su combinación de resistencia a impactos, flexibilidad y aislamiento.

En la Industria Textil se emplea en recubrimientos de telas para obtener productos resistentes al agua, al desgaste y elásticos, como las prendas deportivas, mochilas y maletas.

En la impresión 3D, el TPU es popular para crear piezas flexibles que requieren una buena resistencia, baja conductividad y elasticidad, la mayoría siendo piezas personalizadas.

Una de las propiedades más destacadas del TPU es su capacidad para estirarse y doblarse sin romperse. Esto lo hace ideal para imprimir objetos que requieren flexibilidad, como juntas, sellos, fundas protectoras y componentes de dispositivos electrónicos. La elasticidad del TPU permite que las piezas impresas puedan deformarse bajo presión y luego volver a su forma original, lo que es útil en aplicaciones como zapatos o ropa deportiva.

El TPU es altamente resistente al desgaste, lo que significa que las piezas impresas con este material tienen una larga vida útil incluso cuando se utilizan en entornos donde están sujetas a fricción constante. Esto lo hace adecuado para piezas móviles o componentes sometidos a cargas mecánicas repetitivas.

Durante la impresión 3D, el TPU se adhiere bien entre capas, lo que reduce la posibilidad de que las piezas impresas se delaminen o se rompan por las líneas de capa. Esta buena cohesión interna es crucial para garantizar la integridad estructural de los objetos impresos.

El TPU es resistente a muchos aceites, grasas y productos químicos, lo que permite que las piezas impresas con este material sean duraderas y útiles en aplicaciones industriales donde están expuestas a estos elementos.

2.3.2 Aplicaciones enfocadas en la impresión 3D

Conocida de manera coloquial como “Impresión 3D”, es el termino dado a un grupo de tecnologías conocido también como Manufactura Aditiva. Con el fin de imprimir de manera tridimensional un objeto sólido, una impresora 3D lee la forma y las trayectorias desde un modelo digital 3D (Diseño CAD 3D). (Ceballo, 2019)

El TPU es excelente para crear prototipos que requieren propiedades funcionales similares al producto final. Por ejemplo, se pueden imprimir juntas, sellos o amortiguadores para pruebas en condiciones reales.

Debido a su flexibilidad y resistencia al impacto, el TPU se utiliza ampliamente en la impresión de fundas para dispositivos electrónicos, protectores de teléfonos móviles, y carcasas de equipos que necesitan amortiguar golpes.

Con el avance en la medicina, el TPU también se utiliza en la impresión de prótesis, plantillas ortopédicas y otros dispositivos médicos que requieren un material flexible y biocompatible. Su capacidad para adaptarse a la anatomía del cuerpo humano lo convierte en un material ideal para estas aplicaciones.

2.3.3 Procesabilidad del TPU

A diferencia de otros plásticos, el TPU posee la capacidad de ser reprocesado térmicamente, lo que permite cierto grado de reciclabilidad, el TPU es un material termoplástico, lo que significa que puede ser fundido y moldeado repetidamente sin degradarse significativamente. Esto facilita su procesamiento mediante técnicas como la inyección, extrusión, moldeo por soplado, y la impresión 3D. Para Luis F. *“El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de transformación de los plásticos.”* (Valle, 2007)

El moldeo por inyección es uno de los métodos más comunes para procesar TPU, especialmente en la fabricación de piezas pequeñas y complejas.

Mediante la extrusión es utilizarlo para producir láminas, tubos, y perfiles de TPU que luego pueden ser termoformados o utilizados directamente.

Y por última el moldeo por soplado es una técnica utilizada para producir botellas, recipientes y otras piezas huecas.

Con todo esto podemos apreciar que el TPU es un material que entra en los modelos de economía circular, además de ser perfectamente reciclable si se le es tratado correctamente.

2.4 Impacto Ambiental y Reciclabilidad

2.4.1 Impacto en el medio ambiente.

El TPU, al ser un plástico, tiene implicaciones ambientales asociadas con su producción y eliminación. Aunque es un material duradero y eficiente en muchas aplicaciones, su reciclabilidad es limitada en comparación con otros plásticos más comunes. Sin embargo, se pueden reutilizar desechos de TPU en la fabricación de nuevos productos, y existen iniciativas para mejorar la reciclabilidad del TPU mediante procesos mecánicos y químicos.

El TPU se produce a partir de derivados del petróleo, lo que significa que su fabricación depende de recursos no renovables. Esto contribuye a la huella de carbono del material. Además, la producción de TPU requiere una cantidad considerable de energía, lo que aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero. El impacto exacto depende de la fuente de energía utilizada en la fabricación (fósil, renovable, etc.).

“Los desechos de TPU pueden impactar negativamente en los ecosistemas marinos y terrestres. Partículas de micro plásticos derivados de TPU se han encontrado en suelos agrícolas y océanos, afectando la biodiversidad y entrando en la cadena alimentaria” (Parres, F. 2023).

Durante la producción de TPU, se liberan gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO₂). Estas emisiones contribuyen al cambio climático.

El TPU no es biodegradable en condiciones normales, lo que significa que puede persistir en el medio ambiente durante largos períodos. Esto es un problema significativo si el material no se recicla adecuadamente y termina en vertederos o, peor aún, en el medio ambiente natural

2.4.2 Reciclabilidad del TPU

El TPU es reciclable a través de procesos mecánicos. Esto implica triturar el material usado y reprocesarlo para crear nuevos productos. Sin embargo, el reciclado mecánico puede reducir las

propiedades mecánicas del material, lo que limita su reutilización en aplicaciones que requieren alta resistencia.

También es posible reciclar el TPU mediante métodos químicos, donde el material se descompone en sus componentes químicos originales. Estos pueden ser purificados y reutilizados para producir nuevo TPU. Este proceso puede ser más costoso y complejo, pero tiene el potencial de mantener la calidad del material reciclado.

2.4.3 Comportamiento en condiciones extremas

El TPU es resistente a la radiación UV, lo que lo hace ideal para aplicaciones al aire libre y en entornos expuestos a la luz solar directa. Sin embargo, su resistencia puede depender de la formulación específica del TPU. Se pueden agregar estabilizadores UV al TPU para mejorar esta propiedad.

Una de las ventajas del TPU es su resistencia a la hidrólisis, lo que significa que puede mantener su integridad en ambientes húmedos o bajo la exposición prolongada al agua. Esto es crucial en aplicaciones marítimas y en componentes expuestos a condiciones húmedas, como las suelas de zapatos. Aunque el TPU es resistente a bajas temperaturas, su comportamiento a altas temperaturas puede variar. En general, el TPU tiene una temperatura máxima de uso continuo de alrededor de 50°C a 100°C. Sin embargo, a temperaturas más altas, puede comenzar a ablandarse o deformarse, lo que limita su uso en aplicaciones de alta temperatura.

2.5 La madera

La madera es un material natural y renovable que ha sido utilizado por la humanidad durante miles de años. Se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, la madera es valorada por su durabilidad y propiedades mecánicas. Además, es un material que puede ser relativamente fácil de trabajar, lo que la convierte en una opción versátil en muchas industrias.

2.5.1 Propiedades de la madera

<i>Propiedades</i>	<i>Descripción</i>
<i>Estructura</i>	La madera es un material anisotrópico, lo que significa que sus propiedades varían en función de la dirección de la fibra. Esto afecta su resistencia y durabilidad dependiendo de cómo se corte y se utilice. Está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, que le confieren sus características físicas.
<i>Resistencia</i>	La madera es fuerte en relación con su peso, especialmente cuando se compara con otros materiales como el acero o el concreto. Su resistencia depende del tipo de madera (madera dura o blanda), la dirección de la fibra y su contenido de humedad.
<i>Aislante Térmico y Acústico</i>	La madera es un buen aislante térmico, lo que la hace ideal para su uso en la construcción de edificios. También tiene

	propiedades de aislamiento acústico, ayudando a reducir la transmisión de sonido.
<i>Sostenibilidad</i>	La madera es un recurso renovable cuando se gestiona de manera sostenible. Los árboles pueden replantarse, y la madera, si se maneja adecuadamente, tiene un impacto ambiental relativamente bajo en comparación con otros materiales.
<i>Biodiversidad y Carbono</i>	Los bosques, de donde se extrae la madera, son fundamentales para la biodiversidad global y actúan como importantes sumideros de carbono, capturando CO ₂ de la atmósfera.

Tabla 2. Propiedades de la madera.

2.5.2 Procesamiento de la Madera y Aserrín como Subproducto

El procesamiento de la madera genera varios subproductos, entre los que se encuentra el aserrín. El aserrín es el polvo o pequeñas partículas de madera que resultan del corte, lijado, aserrado o fresado de la madera.

El aserrín se genera en aserraderos, fábricas de muebles, talleres de carpintería y en cualquier lugar donde se trabaje con madera. Dependiendo del tipo de trabajo y del tamaño del grano, el aserrín puede ser muy fino o más grueso. La cantidad de aserrín producido puede ser significativa. En algunos casos, el aserrín puede representar un desafío de gestión debido a la gran cantidad que se genera.

2.5.3 Características del Aserrín

El aserrín puede variar en tamaño, desde polvo fino hasta pequeñas virutas, dependiendo del tipo de procesamiento de la madera. Tiene una composición que contiene celulosa, hemicelulosa y lignina, similares a la madera de la que proviene, lo que le da ciertas propiedades físicas y químicas útiles. Además, posee una alta capacidad para absorber humedad, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere la absorción de líquidos.

El aserrín es liviano y voluminoso, lo que puede dificultar su manejo y transporte en grandes cantidades. Sin embargo, puede compactarse en briquetas o pellets, lo que facilita su almacenamiento y transporte.

2.5.3.1 Impacto Ambiental del Aserrín

El aserrín, si no se gestiona adecuadamente, puede convertirse en un problema ambiental. La acumulación de aserrín en grandes cantidades puede suponer un riesgo de incendio y también puede liberar polvo en el aire, lo que es perjudicial para la salud respiratoria.

Al ser altamente inflamable, el almacenamiento inadecuado de aserrín puede aumentar el riesgo de incendios en plantas de procesamiento y áreas de almacenamiento.

Si se desecha incorrectamente, el aserrín puede contaminar cuerpos de agua, afectando la calidad del agua y dañando los ecosistemas acuáticos. La quema del aserrín, especialmente en instalaciones no controladas, puede liberar dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático.

Si no se recicla o reutiliza, el aserrín puede terminar en vertederos, ocupando espacio y representando una pérdida de recursos potencialmente valiosos. Además, en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno), la descomposición del aserrín en los vertederos puede generar metano, un gas de efecto invernadero más potente que el CO₂.

2.5.3.2 Reciclabilidad del Aserrín

El aserrín es un subproducto del procesamiento de la madera que tiene un gran potencial de reciclaje. Su reciclabilidad se debe a sus propiedades físicas y químicas, lo que lo convierte en un material valioso para una amplia gama de aplicaciones.

El desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el reciclaje más eficiente del aserrín, incluyendo la producción de nuevos materiales compuestos o bioproductos, representa una oportunidad para reducir el impacto ambiental y aumentar el valor del aserrín.

Fomentar el uso del aserrín en una economía circular, donde cada subproducto se recicla y reutiliza de manera efectiva, puede ayudar a minimizar los residuos y maximizar el aprovechamiento de los recursos naturales.

El aserrín, aunque a menudo subestimado como un subproducto del procesamiento de la madera, tiene un enorme potencial para ser reciclado y reutilizado en una variedad de aplicaciones. Su correcta gestión y aprovechamiento no solo contribuyen a la reducción de residuos y al ahorro de recursos, sino que también pueden mitigar algunos de los impactos ambientales asociados con su producción. La clave para maximizar el valor del aserrín radica en la innovación en sus procesos de reciclaje y en la adopción de prácticas sostenibles en la industria de la madera.

2.5.4 Innovación en Materiales

La investigación y desarrollo de materiales compuestos que mezclan madera reciclada con otros materiales pueden ayudar a reducir la demanda de madera virgen y mejorar la eficiencia del uso de recursos.

El aserrín se puede utilizar como refuerzo en la fabricación de bioplásticos, que son plásticos derivados de fuentes renovables como almidón, celulosa o aceites vegetales, o plásticos directamente derivados del petróleo, y así darles la oportunidad de ser más amables con el ambiente. Al mezclar aserrín con polímeros biodegradables o polímeros sintéticos, se mejora la resistencia mecánica del material y se reduce la dependencia de plásticos basados en combustibles fósiles.

Los biocompuestos que incorporan aserrín son más sostenibles que los plásticos convencionales, ya que no solo utilizan recursos renovables, sino que también permiten reutilizar residuos de la industria maderera, reduciendo el desperdicio.

2.6 Economía Circular

La economía circular es un modelo económico que busca redefinir la forma en que producimos y consumimos productos para minimizar el impacto ambiental y fomentar la sostenibilidad. A diferencia del modelo económico lineal tradicional, que sigue el patrón de "tomar, utilizar, desechar", la economía circular se basa en un enfoque cíclico que maximiza la vida útil de los recursos y minimiza los residuos

2.6.1 Principios de la economía circular

- **Reducción de Residuos:**

Minimización de Residuos: Promueve el diseño y la producción de productos que generen menos residuos desde el inicio, reduciendo la cantidad de desechos que se envían a los vertederos.

Recuperación de Recursos: Se enfoca en la recuperación de materiales y recursos al final de su vida útil para que puedan ser reciclados o reutilizados en lugar de ser desechados.

- **Prolongación de la Vida Útil:**

Durabilidad: Diseña productos para que sean más duraderos y reparables, lo que prolonga su vida útil y reduce la necesidad de reemplazos frecuentes.

Reparación y Mantenimiento: Facilita la reparación y el mantenimiento de productos para mantenerlos en uso durante más tiempo.

- **Reutilización y Reciclaje:**

Reutilización: Fomenta la reutilización de productos y componentes en lugar de desecharlos. Esto puede incluir la venta de productos de segunda mano o la reutilización de partes de productos desechados.

Reciclaje: Se enfoca en reciclar materiales y productos al final de su vida útil, transformándolos en nuevos productos o materias primas.

- **Cierre de Ciclos**

Ciclo de Vida de Productos: Busca cerrar los ciclos de vida de los productos, asegurando que los materiales utilizados en la producción puedan ser recuperados y reutilizados continuamente.

Energía y Recursos: Optimiza el uso de energía y recursos en todos los ciclos de producción y consumo, buscando alternativas sostenibles y renovables.

- **Diseño para la Circularidad:**

Diseño Modular: Crear productos con componentes intercambiables o modulares que puedan ser fácilmente reemplazados o actualizados.

- **Materiales Sostenibles**

Utilizar materiales reciclables o biodegradables en el diseño de productos.

2.6.2 Beneficios de la economía circular

- **Reducción de Residuos:** Disminuye la cantidad de residuos enviados a vertederos y reduce la contaminación ambiental.
- **Conservación de Recursos:** Ayuda a conservar recursos naturales al maximizar la reutilización y reciclaje de materiales.
- **Reducción de Emisiones:** Puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al minimizar la necesidad de producción y transporte de nuevos materiales.
- **Eficiencia de Costos:** Puede reducir costos operativos al optimizar el uso de recursos y materiales, y al disminuir la necesidad de gestionar residuos.

- **Nuevas Oportunidades de Negocio:** Abre nuevas oportunidades de negocio mediante modelos de negocio innovadores como el alquiler y la economía de compartición.
- **Valor Añadido:** Incrementa el valor de los productos al ofrecer características como durabilidad y reparabilidad, lo que puede atraer a consumidores conscientes de la sostenibilidad.

La economía circular representa un cambio fundamental en la manera en que gestionamos los recursos y el ciclo de vida de los productos. Al adoptar este modelo, es posible reducir el impacto ambiental, fomentar la sostenibilidad y crear nuevas oportunidades económicas. Aunque existen desafíos en su implementación, los beneficios potenciales para el medio ambiente, la economía y la sociedad hacen que sea una estrategia crucial para el futuro.

2.7 Análisis Termogravimétrico TGA

El Análisis Termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) es una técnica de análisis térmico que mide la variación en el peso de una muestra en función de la temperatura o el tiempo, mientras se calienta o enfría en una atmósfera controlada. Este método es ampliamente utilizado en la caracterización de materiales, ya que proporciona información valiosa sobre la estabilidad térmica, la composición y los procesos de descomposición de una sustancia.

2.7.1 Fundamentos del TGA

En un proceso de TGA, se calienta una muestra, mientras se registra su masa en función del tiempo o de la temperatura. Esta técnica es útil porque muchos materiales sufren cambios de masa cuando se descomponen, evaporan, o sufren reacciones químicas. Los datos recolectados son típicamente una curva de masa en función de la temperatura, llamada **curva TGA**.

Una curva TGA típica muestra la pérdida de masa relacionados con la pérdida de componentes volátiles (humedad, solventes, monómeros), descomposición del polímero, combustión de negro de carbón y residuos finales (ceniza, cargas). El método nos permite estudiar la descomposición de productos y materiales y sacar conclusiones sobre sus componentes individuales. Dicha información determinar los rangos de temperatura en los que ocurren los eventos de pérdida de masa y para cuantificar la cinética de dichos procesos.

Procedimiento para la elaboración del TGA

2.7.2 Procedimiento para la elaboración del TGA

- 1) Preparación de la Muestra: Se selecciona una pequeña cantidad de la muestra (generalmente entre 1-20 mg) que se coloca en un crisol, que luego se introduce en la balanza del TGA.
- 2) Inicio del Programa de Temperatura: Se inicia el programa de calentamiento o enfriamiento, en el que la temperatura se incrementa o disminuye a una tasa controlada.
- 3) Registro de Datos: A medida que la temperatura cambia, la balanza registra continuamente la masa de la muestra. Estos datos se trazan en una gráfica llamada termograma, donde se puede observar la variación de peso con respecto a la temperatura o el tiempo.

2.7.3 Interpretación de la Curva TGA

Suponiendo un polímero que se descompone en varias etapas ocurre que: primero se evapora el solvente residual, luego se descompone la matriz polimérica y finalmente queda un residuo inorgánico. El gráfico típico mostrará:

- a) Una meseta inicial (sin pérdida de masa, muestra estable).
- b) Un descenso abrupto (indicando una etapa de descomposición).
- c) Varias etapas de pérdida de masa si hay múltiples componentes.
- d) Una meseta final, que indica la cantidad de material residual, como cenizas o componentes no volátiles.

Uno de los enfoques más utilizados es el modelo de **cinética de reacción de primer orden**, que asume que la tasa de descomposición de un componente es proporcional a la cantidad de material que queda:

$$\frac{dm}{dt} = -km \quad [1]$$

Donde:

- m es la masa del material en un momento dado.
- k es la constante de velocidad de descomposición

2.7.4 Aplicaciones del TGA

- **Estabilidad Térmica:** El TGA se utiliza para determinar la temperatura a la cual un material comienza a descomponerse. Esto es crucial en la investigación y desarrollo de materiales que se utilizarán en entornos de alta temperatura.
- **Contenido de Humedad:** Puede medir la cantidad de agua absorbida por un material al detectar la pérdida de peso asociada a la evaporación del agua a medida que se calienta.
- **Análisis de Composición:** El TGA ayuda a determinar la composición de una muestra por la identificación de diferentes etapas de descomposición. Por ejemplo, en un polímero, se pueden identificar las temperaturas a las que los diferentes componentes se descomponen.
- **Identificación de Residuos:** Después del análisis, el TGA puede ayudar a identificar la presencia de residuos inorgánicos (como cenizas) al final del ciclo térmico, lo cual es útil en la industria de polímeros y combustibles

2.8 FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés: **Fourier Transform Infrared Spectroscopy**) es una técnica analítica usada principalmente para obtener un espectro infrarrojo de absorción o emisión de un sólido, líquido o gas. Esta técnica es ampliamente utilizada en diversas áreas como la química, biología, ciencia de materiales, farmacéutica, y muchos otros campos relacionados con el análisis de la estructura molecular de los compuestos.

2.8.1 Principios básicos de la espectroscopía FTIR

- **Interacción de la radiación infrarroja con la materia:** La espectroscopía FTIR se basa en el hecho de que las moléculas absorben radiación infrarroja a longitudes de onda específicas,

que corresponden a los diferentes modos de vibración de los enlaces en las moléculas. Estas vibraciones incluyen estiramientos, torsiones y flexiones de enlaces químicos.

- **Transformada de Fourier:** A diferencia de otras técnicas de espectroscopía infrarroja que miden una única longitud de onda a la vez, la FTIR mide todas las longitudes de onda simultáneamente. Esto es posible gracias al uso de un interferómetro, que recoge datos sobre cómo las diferentes frecuencias de la radiación infrarroja interactúan con la muestra. Los datos obtenidos se procesan mediante una transformada de Fourier para producir un espectro.
- **Espectro FTIR:** El espectro resultante muestra las frecuencias de absorción de las moléculas presentes en la muestra, lo que permite identificar los grupos funcionales presentes y, en muchos casos, la estructura química de la molécula. Cada pico en el espectro corresponde a una vibración particular de un grupo químico.

2.8.2 Aplicaciones de FTIR

- > **Identificación de sustancias químicas:** El FTIR es útil para identificar compuestos orgánicos e inorgánicos a través de sus patrones de absorción únicos.
- > **Caracterización de materiales:** En la ciencia de materiales, la FTIR se usa para estudiar polímeros, recubrimientos, pinturas, y compuestos complejos. Ayuda a determinar la composición química y la estructura molecular.
- > **Estudios de contaminación ambiental:** Se usa para detectar contaminantes químicos en el aire, agua y suelo, identificando compuestos específicos por sus bandas de absorción

2.8.3 Procedimiento de un análisis FTIR

Preparación de la muestra: La muestra puede presentarse de diversas formas según el tipo de espectrómetro y el material en cuestión.

Escaneo: Se dirige la radiación infrarroja a la muestra, que absorbe las frecuencias correspondientes a las vibraciones de sus enlaces.

Obtención del espectro: El interferómetro mide las interacciones de la radiación con la muestra, y el software del espectrómetro procesa los datos para obtener el espectro final.

Interpretación de resultados: Los picos del espectro se comparan con bases de datos o referencias de espectros conocidos para identificar los componentes químicos presentes en la muestra.

El análisis de materiales compuestos utilizando espectroscopía FTIR es esencial para comprender cómo se comportan y qué interacciones químicas ocurren entre los componentes. En el caso específico del **TPU (poliuretano termoplástico) mezclado con aserrín**, esta técnica es especialmente valiosa para estudiar las características de la mezcla y las posibles modificaciones químicas o físicas que ocurren durante su fabricación y uso.

2.8.4 Análisis FTIR en TPU/Madera

La espectroscopía FTIR permite identificar las **interacciones químicas** que pueden ocurrir entre el TPU y los componentes de la madera, lo que es crucial para evaluar la compatibilidad y la estabilidad del compuesto

2.8.4.1 Identificación de grupos funcionales

- En el TPU, los grupos funcionales más comunes son los grupos carbonilo ($C=O$), amina (NH), y grupos éter ($C-O-C$). Estos grupos absorben radiación en diferentes regiones del espectro infrarrojo.
- En la madera, se encuentran grupos característicos de la lignina ($C-O$ en los enlaces éter, estiramientos $C=C$ en los anillos aromáticos), celulosa (vibraciones de enlaces OH y $C-OH$), y hemicelulosa (grupos carboxilo).

2.8.4.2 Compatibilidad y análisis de interacción

El FTIR puede revelar si hay interacciones químicas entre los componentes de la madera y el TPU, como la formación de nuevos enlaces o la modificación de los existentes. Esto se observa en cambios en las bandas de absorción en las regiones correspondientes a los grupos funcionales de ambos materiales.

Por ejemplo, si durante la mezcla o fabricación se forman enlaces de hidrógeno entre los grupos OH de la celulosa y los grupos carbonilo del TPU, esto provocaría desplazamientos o cambios en las intensidades de las bandas de absorción en el espectro FTIR.

2.8.4.3 Modificación de la matriz polimérica

Si durante la fabricación del material compuesto se someten a **modificaciones térmicas o químicas**, el FTIR puede revelar cambios en los grupos funcionales, indicando si la estructura química del TPU o la madera ha cambiado significativamente. Esto puede ser útil para verificar si la madera ha sufrido degradación (por ejemplo, si las fibras de celulosa o lignina se han descompuesto durante el proceso de fusión).

2.9 Espectros característicos

En el análisis de TPU mezclado con madera, algunos de los picos que podrías observar en el espectro FTIR incluyen:

- **TPU:**
 - Bandas fuertes alrededor de 3300 cm^{-1} (vibraciones de NH).
 - Picos entre $1700\text{-}1730\text{ cm}^{-1}$ (carbonilos C=O del grupo ureta).
 - Regiones alrededor de 1100 cm^{-1} (estiramiento C-O-C de los éteres en la cadena polimérica).
- **Madera** (componente lignocelulósico):
 - Pico amplio alrededor de 3400 cm^{-1} (vibraciones O-H de los enlaces de hidrógeno en la celulosa y lignina).
 - Bandas en torno a 1600 cm^{-1} (estiramientos C=C en anillos aromáticos de la lignina).
 - Picos alrededor de $1200\text{-}1050\text{ cm}^{-1}$ (vibraciones C-O de los grupos éter y éster en la celulosa y hemicelulosa).

2.9.1 Ventajas del análisis FTIR en compuestos TPU/madera

- Evaluación rápida y no destructiva.
- Información química precisa sobre las interacciones entre los componentes

2.10 Esfuerzo y deformación

El estudio de **esfuerzo** y **deformación** es fundamental para evaluar el comportamiento mecánico, la capacidad de soportar estrés y su rendimiento bajo diversas condiciones. Los materiales compuestos combinan dos o más fases distintas, donde generalmente uno de los materiales actúa como **matriz** y el otro como **refuerzo**. Esta combinación puede mejorar propiedades como la resistencia, rigidez, dureza y resistencia al impacto. Los fundamentos de esfuerzo y deformación son:

a) Esfuerzo:

- Se refiere a la fuerza aplicada por unidad de área sobre un material.
- Se mide en **Pascales (Pa)** o **MPa**.
- Hay diferentes tipos de esfuerzo:
 - **Esfuerzo de tracción:** Cuando se estira el material.
 - **Esfuerzo de compresión:** Cuando se comprime.

b) Deformación:

- Es el cambio relativo en las dimensiones del material cuando se aplica un esfuerzo.
- Se expresa como una **relación adimensional** (alargamiento o acortamiento dividido por la longitud original).
- Puede ser elástica (recuperable) o plástica (permanente).

En un gráfico típico de **esfuerzo vs. deformación**, los materiales exhiben diferentes regiones:

- **Región elástica:** Donde el material vuelve a su forma original una vez que se retira la carga.
- **Región plástica:** Donde el material sufre deformación permanente.
- **Punto de ruptura:** Donde el material falla o se rompe.

2.10.1 Comportamiento mecánico de materiales compuestos

- **Matriz y refuerzo:**
 - En los compuestos, la matriz (polimérica, cerámica o metálica) distribuye el esfuerzo aplicado, mientras que el refuerzo (como fibras de vidrio, carbono, o partículas como nanopartículas de cerámica o madera) soporta las cargas y aumenta la resistencia y rigidez del material.
- **Resistencia y rigidez:**
 - La **resistencia** de un material compuesto es su capacidad para soportar cargas sin fallar. Los refuerzos como fibras o partículas aumentan la resistencia al esfuerzo de tracción, compresión y cizallamiento.
 - La **rigidez** está relacionada con el módulo de elasticidad (o módulo de Young), que es la relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica. Los refuerzos también contribuyen a aumentar la rigidez del material compuesto.
- **Análisis de tensión (de tracción):**
 - Se somete al material a un esfuerzo de tracción hasta que se produce la fractura. Se obtienen parámetros clave como el **límite elástico**, el **límite de fluencia**, el **módulo de elasticidad** y la **resistencia a la tracción**.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3 Materiales

- TPU puro
- Tamiz N° 80 – 0.177mm
- Tamiz N° 100 – 0.149mm
- Tamiz N° 120 – 0.125mm
- Aserrín tamizado
- Agua
- Contenedores
- Extrusor
- Boquilla de 1.75mm

En el presente trabajo, se desarrolló una metodología para la producción de filamento compuesto a base de TPU y aserrín, con el objetivo de crear un nuevo material compuesto. A continuación, se detalla el procedimiento.

3.2 Preparación del Equipo y Materiales

Inicialmente, se acondicionó un espacio de trabajo dedicado, asegurando condiciones de limpieza y orden óptimas. Se instaló el extrusor a un ángulo de 25° respecto a la horizontal y se equipó con una boquilla de 1.75 mm de diámetro. Para el enfriamiento del filamento extruido, se dispuso un recipiente con agua a temperatura ambiente. Se acondicionó una mesa de

recepción para depositar el filamento una vez enfriado. Por último, se preparó una mezcla homogénea de TPU y aserrín en la proporción establecida, pesando un total de 20 gramos.

3.2.1 Configuración del Extrusor

Se procedió a precalentar el extrusor a una temperatura de 145°C y se permitió alcanzar el equilibrio térmico durante 10 minutos. Posteriormente, se ajustó la velocidad de extrusión al máximo valor compatible con el material y las características del equipo.

3.2.2 Proceso de Extrusión

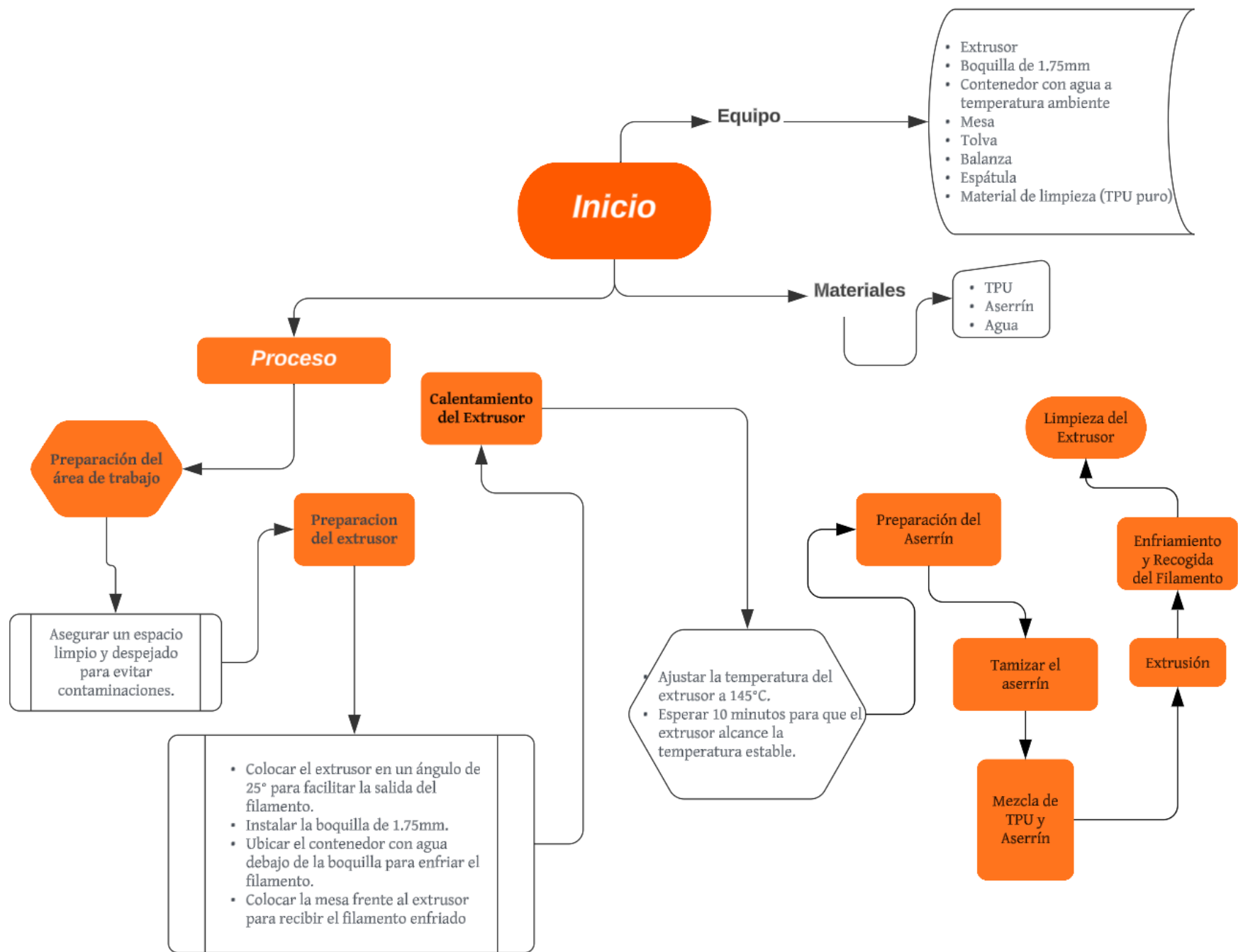
La mezcla de TPU y aserrín se introdujo cuidadosamente en la tolva del extrusor. A continuación, se inició el proceso de extrusión, manteniendo una vigilancia constante para evitar obstrucciones o enredos del filamento. Debido a la alta adhesividad del TPU, se implementó un sistema de guía para el filamento. El filamento extruido se sumergió en el agua para su enfriamiento y, seguidamente, se depositó sobre la mesa de recepción.

3.2.3 Limpieza y Mantenimiento

Al finalizar cada proceso de extrusión, se llevó a cabo una limpieza exhaustiva del extrusor y de la boquilla. Para eliminar cualquier residuo de la mezcla anterior, se realizó una purga con filamento TPU puro. Se inspeccionó la boquilla y se reemplazó si presentaba signos de desgaste o deterioro.

3.2.4 Repetición del Proceso

Para cada nueva extrusión, se repitieron los pasos anteriores, ajustando las variables del proceso según fuera necesario.



Capítulo 4

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron un total de 13 muestras, los cuales poseen cambios en el tamaño de las partículas de aserrín correspondientes a los tamices de malla 80 (0.177mm), 100 (0.149mm) y 120(0.125mm), así como diferentes concentraciones de Poliuretano Termoplástico (TPU) y aserrín. Este proceso de extrusión fue cuidadosamente controlado para asegurar la homogeneidad y calidad de los filamentos producidos.

El tamaño de las partículas y las concentraciones de los componentes en los filamentos extruidos son factores críticos que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Para ofrecer una visión detallada de estos aspectos, se presenta a continuación una tabla que detalla las concentraciones de TPU y aserrín utilizadas en las diferentes muestras, así como los respectivos tamaños de partícula obtenidos mediante el uso de los tamices mencionados.

Filamentos Obtenidos					
Proporciones entre TPU y aserrín Tamaño de partícula	97.5% -2.5%	95% - 5%	90% - 10%	80% - 20 %	70% - 30%
120					

100					
80					

Tabla 3. Filamentos obtenidos

Se obtuvieron diversos diámetros en los filamentos extruidos, con diámetros que van de 1.11 ± 0.097 hasta 1.6 ± 0.09 que evidencia la viabilidad de producir el material en cuestión, sugiriendo que, con ligeras modificaciones en las impresoras, es factible su utilización efectiva.

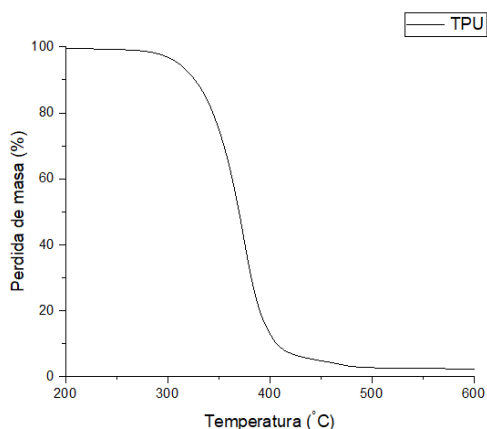
<i>Porcentaje</i>	<i>Malla</i>	<i>Diámetro</i>
97.5% - 2.5%	120	1.5 ± 0.07
95% - 5%		1.4 ± 0.09
90% - 10%		1.35 ± 0.06
80% - 20%		1.45 ± 0.07
70% - 30%		1.30 ± 0.06
97.5% - 2.5%	100	1.12 ± 0.06
95% - 5%		1.35 ± 0.06
90% - 10%		1.11 ± 0.097
80% - 20%		1.25 ± 0.08
97.5% - 2.5%	80	1.6 ± 0.09
95% - 5%		1.55 ± 0.7
90% - 10%		1.4 ± 0.09
80% - 20%		1.35 ± 0.06

Tabla 4. Diámetros obtenidos de los filamentos.

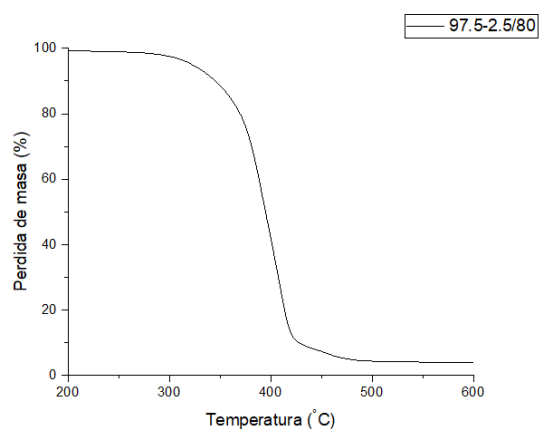
4.2 Resultado de proceso de TGA

Se realizó el estudio de Análisis Termogravimétrico (TGA) en aquellas muestras que presentaron un diámetro más grande y que exhibieron la mejor homogeneidad a lo largo del filamento, resultante del proceso de extrusión.

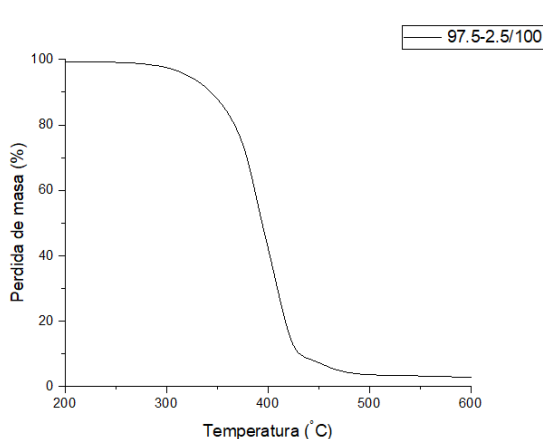
En estas gráficas, se pueden identificar claramente las distintas etapas de descomposición térmica de los materiales, donde cada etapa refleja una pérdida de masa correspondiente a la volatilización de componentes específicos o a la degradación de la estructura del material. Dicho análisis determina la estabilidad térmica de los materiales y su idoneidad para diversas aplicaciones prácticas.



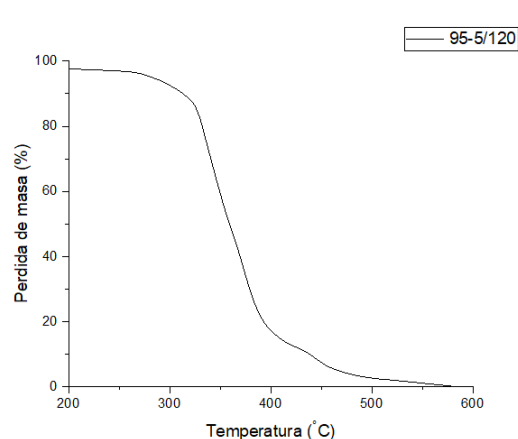
Gráfica 1. TGA de TPU



Gráfica 2. TGA de 97.5-2.5/80



Gráfica 3. TGA de 97.5-2.5/100

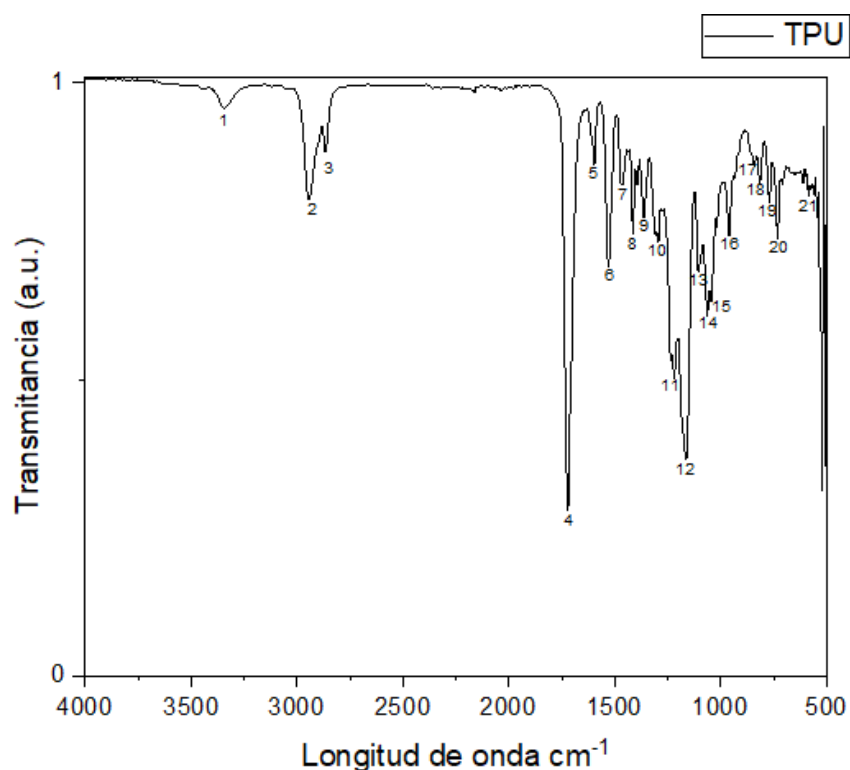


Gráfica 4. TGA de 95-5/120

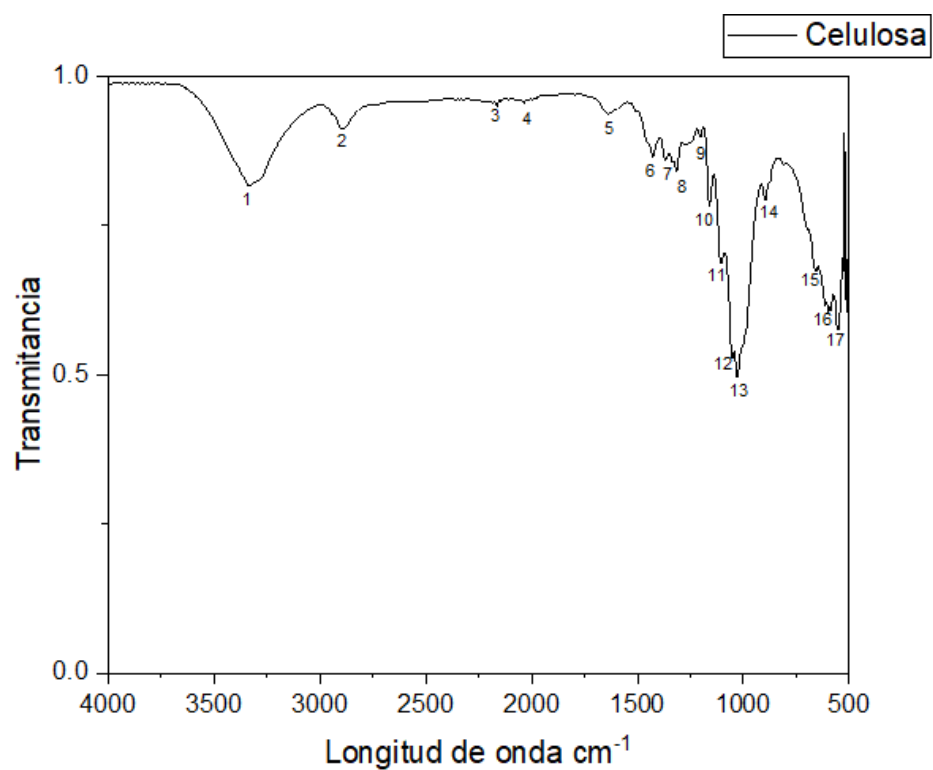
4.3 Resultado de estudios de FTIR

Durante la ejecución de un estudio mediante la técnica de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) aplicado a muestras de celulosa, Poliuretano Termoplástico (TPU) y mezclas de TPU con aserrín, se obtuvieron los resultados siguientes.

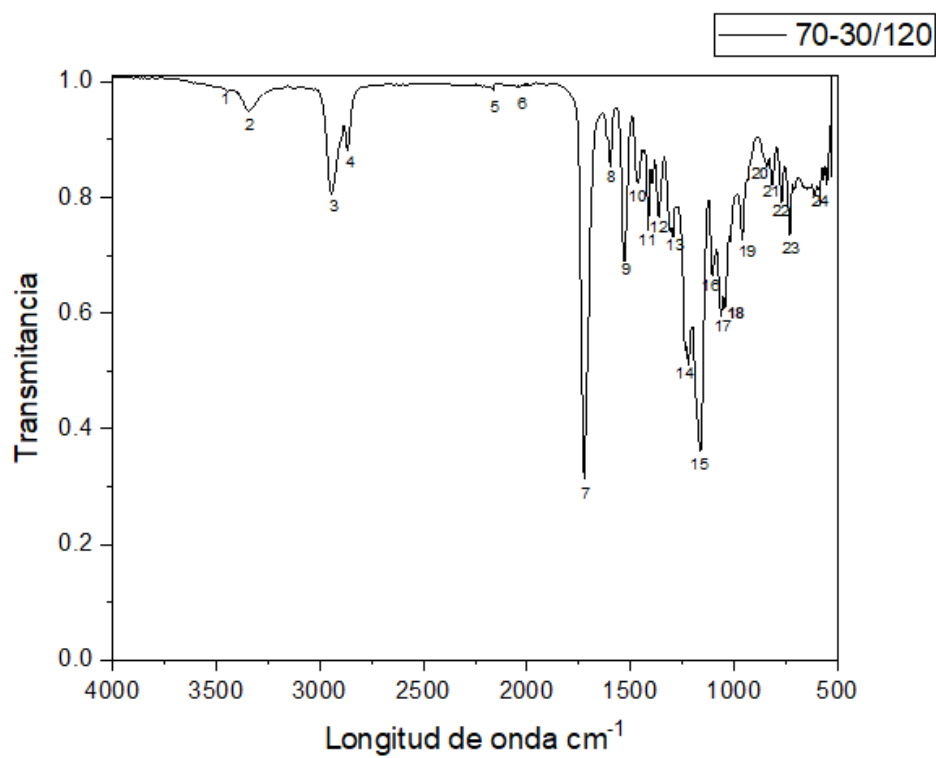
Se aprecia un detallado de las frecuencias de vibración específicas para cada uno de los componentes mencionados, permitiendo identificar de manera precisa las bandas características en los espectros. Esto proporcionó información valiosa sobre la estructura molecular y las posibles interacciones químicas entre los componentes de las muestras analizadas.



Gráfica 5. FTIR de TPU



Gráfica 6. FTIR de Celulosa



Gráfica 7. FTIR de 70-30/120

<i>CELULOSA</i>				
<i>Pico</i>	Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación tentativa	Posición (cm-1)	Posible compuesto
1	3334.37	Estiramiento O-H	3500-3150	Celulosa (grupos hidroxilo libres)
2	2918.41	Estiramiento C-H asimétrico	2900-2700	Celulosa (grupos metileno -CH ₂ -)
3	2851.47	Estiramiento C-H simétrico	2140-1990	Celulosa (grupos metileno -CH ₂ -)
4	1635	Flexión O-H	2140-1991	Agua adsorbida
5	1427	Deformación CH ₂	1650-1580	Celulosa
6	1370	Deformación CH ₂ simétrica	1450-1375	Celulosa
7	1315	Deformación CH ₂ asimétrica	1400-1000	Celulosa
8	1160	Estiramiento C-O-C	1390-1310	Celulosa (enlace glucosídico)
9	1054	Estiramiento C-O	1225-1200	Celulosa (anillos de piranosa)
10	1030	Estiramiento C-O	1250-1020	Celulosa (anillos de piranosa)
11	898.64	Deformación fuera del plano C-H	1250-1021	Celulosa (carbono anomérico)
12	1335	Deformación CH ₂ asimétrica	1250-1022	Celulosa
13	1205	Estiramiento C-O-C	1250-1023	Celulosa (enlace glucosídico)

Tabla 5. Compuestos principales de la Celulosa.

<i>TPU</i>				
<i>Pico</i>	Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación tentativa	Posición (cm-1)	Posible compuesto
1	3324	Enlace uretánico (NH)	3500-3150	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)
2	2941-2863	Grupos metileno (CH ₂)	2900-2700	Cadena alifática (parte de la cadena del TPU)
3	1733-1685	Grupo carbonilo (éster)	2140-1990	Grupo éster (parte del segmento duro del TPU)
4	1535	Enlace uretánico (C-N)	2140-1991	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)

5	1465, 1336	Grupos metileno (CH ₂)	1650-1580	Cadena alifática (parte de la cadena del TPU)
6	1165	Enlace uretánico (C-O-C)	1450-1375	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)
7	1135-947	Enlace éster con puente de hidrógeno	1400-1000	Segmento duro del TPU (posiblemente poliéster)
8	873-863	Diversos grupos (C-H, NH, OH)	1390-1310	Diversos grupos (CH, NH, OH)

Tabla 6. Compuestos principales del TPU.

<i>Cualquier mezcla de TPU con aserrín</i>				
<i>Pico</i>	Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación tentativa	Posición (cm-1)	Posible compuesto
1	3324	Enlace uretánico (NH)	3500-3150	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)
2	2941-2863	Grupos metileno (CH ₂)	2900-2700	Cadena alifática (parte de la cadena del TPU)
3	1733-1685	Grupo carbonilo (éster)	2140-1990	Grupo éster (parte del segmento duro del TPU)
4	1535	Enlace uretánico (C-N)	2140-1991	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)
5	1465, 1336	Grupos metileno (CH ₂)	1650-1580	Cadena alifática (parte de la cadena del TPU)
6	1165	Enlace uretánico (C-O-C)	1450-1375	Enlace uretánico (parte de la cadena del TPU)
7	1135-947	Enlace éster con puente de hidrógeno	1400-1000	Segmento duro del TPU (posiblemente poliéster)
8	873-863	Diversos grupos (C-H, NH, OH)	1390-1310	Diversos grupos (CH, NH, OH)

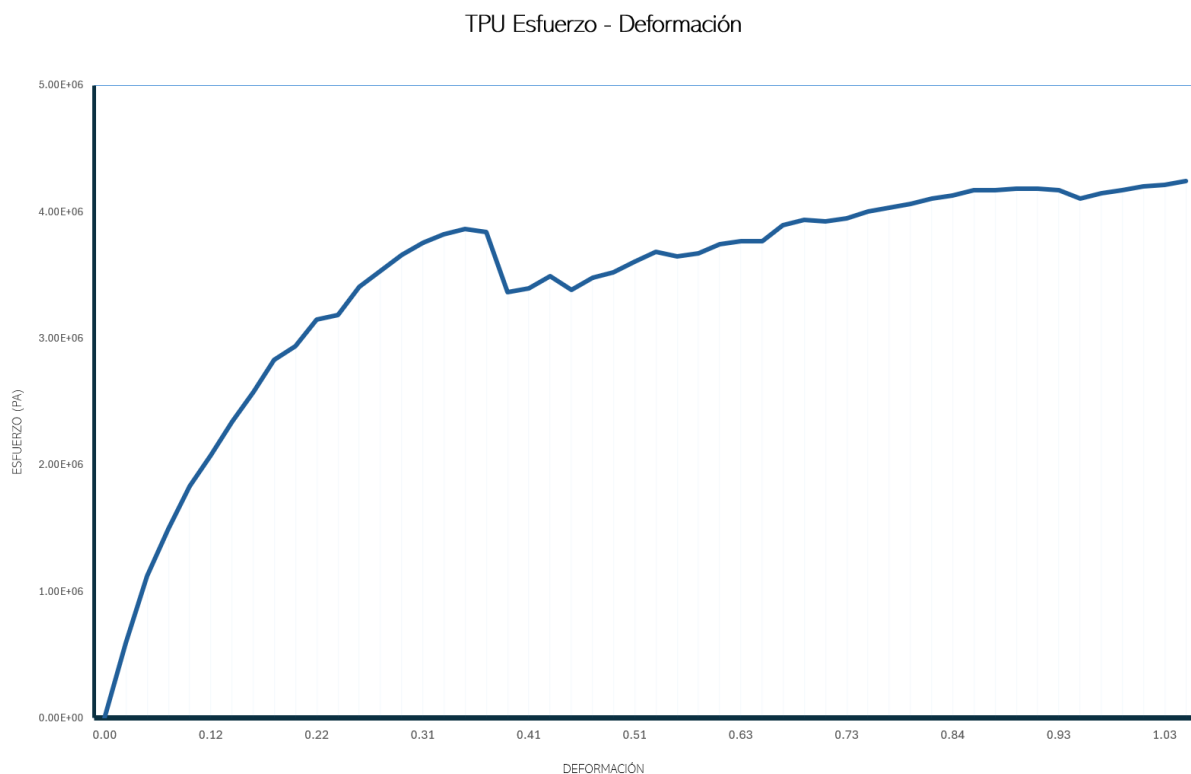
Tabla 7. Compuestos principales de las mezclas del TPU y aserrín.

4.4 Resultados de Deformación

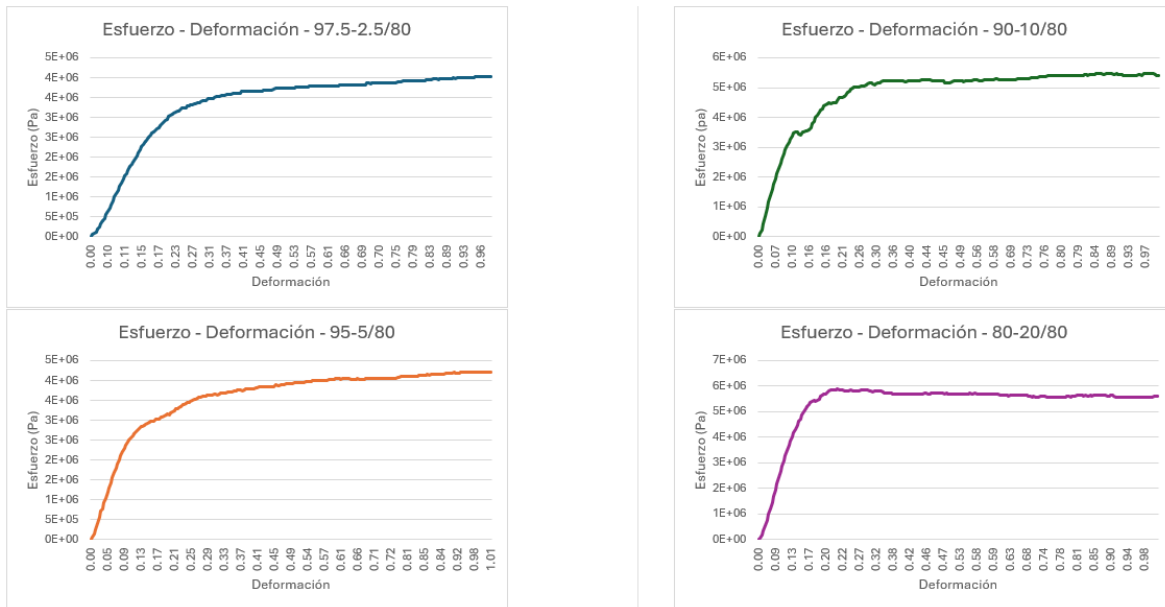
Se llevaron a cabo pruebas de esfuerzo - deformación en muestras de Poliuretano Termoplástico (TPU) y en todas las mezclas de TPU con aserrín obtenidas, en diferentes proporciones. Dichas pruebas se diseñaron para evaluar el comportamiento mecánico y la resistencia de los materiales bajo condiciones de estrés.

Durante el proceso de ensayo, se aplicaron fuerzas controladas a las muestras para observar sus respuestas mecánicas. En el caso del TPU puro, se analizó su capacidad de deformación, elasticidad y resistencia a la fractura, proporcionando una línea base crucial para comparaciones posteriores.

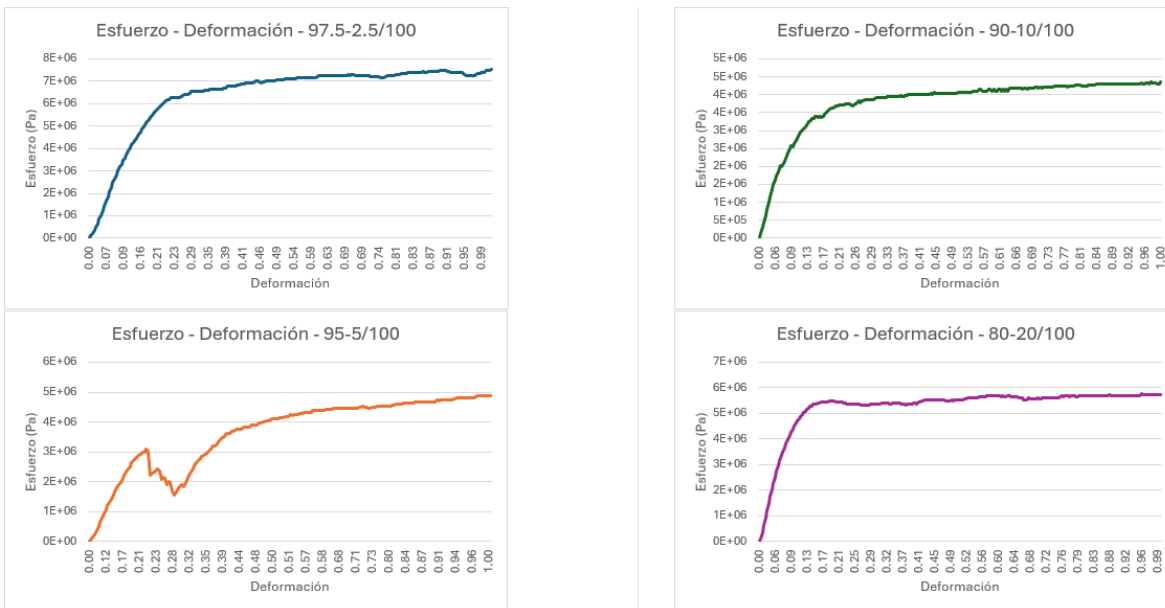
Por otro lado, las mezclas de TPU y aserrín, elaboradas en distintas proporciones, permitieron evaluar cómo la adición de material influye en las propiedades mecánicas del TPU. Se observaron cambios en la rigidez y la resistencia a la deformación de las mezclas, lo que permitió identificar las proporciones de madera que cambiaron las características del material sin comprometer otras.



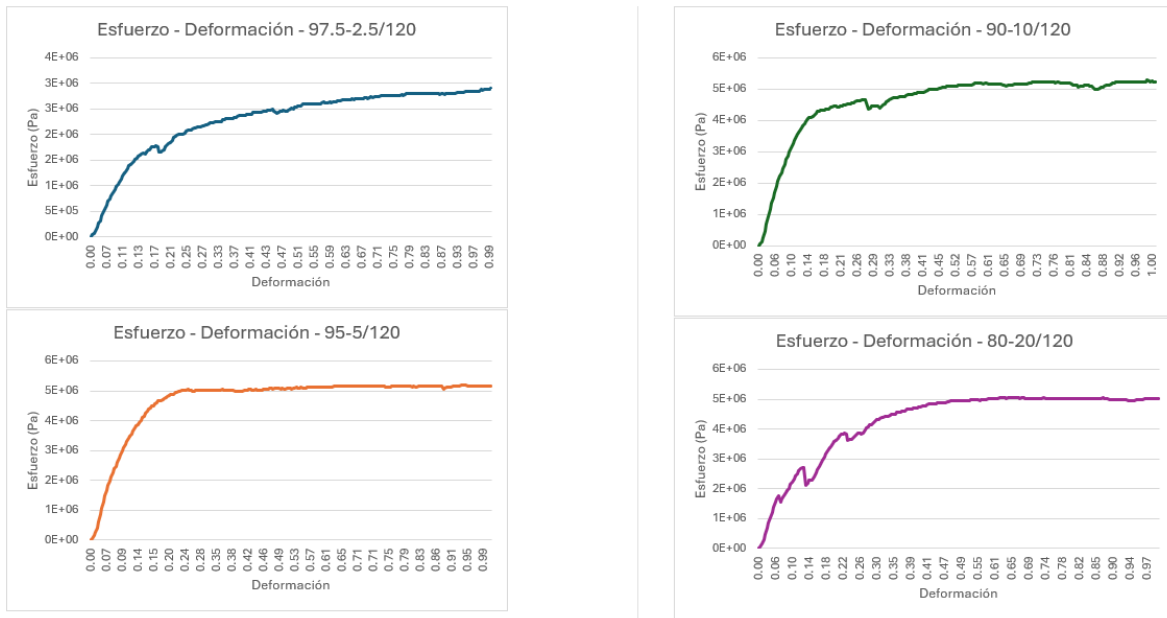
Gráfica 8. Esfuerzo y Deformación del TPU



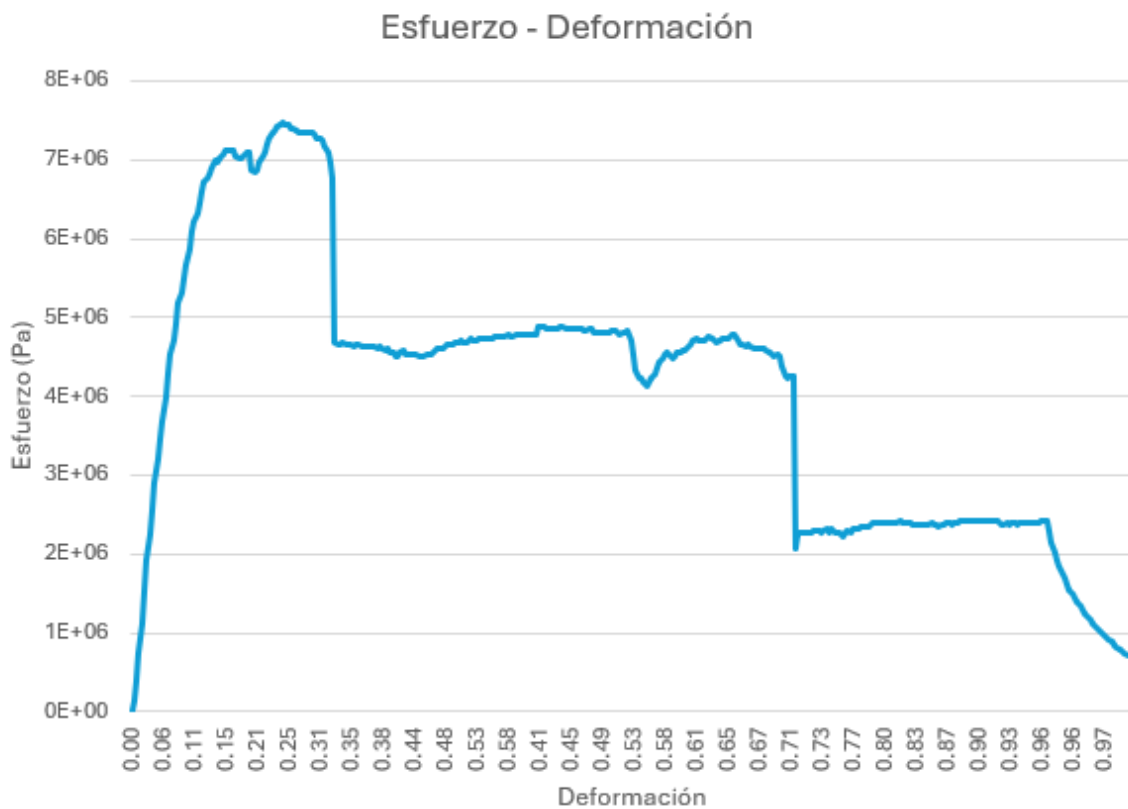
Gráfica 9. Esfuerzo y Deformación de TPU y aserrín del tamaño de malla 80.



Gráfica 10. Esfuerzo y Deformación de TPU y aserrín del tamaño de malla 100.



Gráfica 11. Esfuerzo y Deformación de TPU y aserrín del tamaño de malla 120.



Gráfica 12. Esfuerzo y Deformación de TPU y aserrín 70-30 del tamaño 120.

Análisis ANOVA

Se recopilaban los límites elásticos y módulos de Young de todas las pruebas de esfuerzo y deformación con el fin de realizar un análisis ANOVA y comprobar la reproductibilidad del material compuesto.

ANOVA	Límite elástico			
80	97.5-2.5	95-5	90-10	80-20
	3232834.78	3338775.91	5002012.49	6357464.99
	3580986.22	3656754	5261857.3	5519117.91
	2337588.23	2796825.71	4933051.29	5728704.67

Tabla 8. ANOVA del Límite Elástico Malla 80

ANOVA	Módulo de Young			
80	Y 97.5-2.5	Y 95-5	Y 90-10	Y 80-20
	68773	115434	140578	157033
	79703	98766	104303	170712
	73723	82370	132820	181631

Tabla 9. ANOVA del Módulo de Young Malla 80

ANOVA	Límite elástico			
100	97.5-2.5	95-5	90-10	80-20
	7003629.51	3143801.34	3080806.46	5378163.91
	6994618.24	3423250.35	3754732.87	5215189.24
	6699123.88	3073939.09	4043558.47	5622625.83

Tabla 10. ANOVA del Límite Elástico Malla 100

ANOVA	Módulo de Young			
100	Y 97.5-2.5	Y 95-5	Y 90-10	Y 80-20
	162589	117125	102962	144239
	125624	124161	92483	140623
	123252	102442	96295	138743

Tabla 11. ANOVA del Módulo de Young Malla 100

ANOVA	Límite elástico			
120	97.5-2.5	95-5	90-10	80-20
	1810829	4742167	4890357	4688215
	2093771	5326818	4750633	4287439
	1697652	4937051	4610908	4872090

Tabla 12. ANOVA del Límite Elástico Malla 120

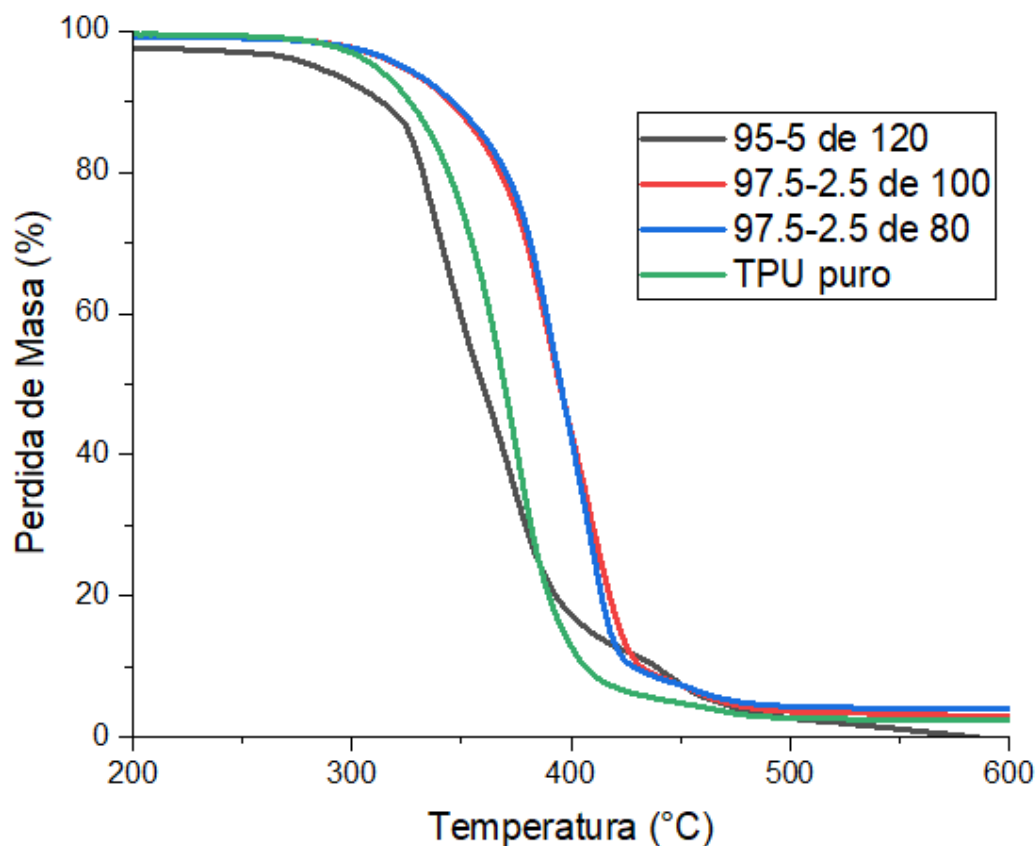
ANOVA	Módulo de Young			
120	Y 97.5-2.5	Y 95-5	Y 90-10	Y 80-20
	38585	147253	134074	121211

	51787	151794	150626	118491
	40904	129017	155383	124461

Tabla 13. ANOVA del Módulo de Young Malla 120

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.5 ANÁLISIS TGA



Gráfica 13. Análisis del TGA

Se muestra la relación entre la temperatura y la pérdida de masa de diferentes materiales, incluyendo un TPU puro y mezclas con diferentes proporciones. La pérdida de masa se expresa como un porcentaje y la temperatura se mide en grados Celsius

1. Degradación:

- **TPU puro (línea verde):** La curva muestra que el TPU puro comienza a perder masa significativamente alrededor de los **350-400 °C**, y su

descomposición principal ocurre entre **400-450 °C**, después de lo cual se estabiliza.

- **95-5 de 120 (línea negra)**: Esta muestra presenta una menor estabilidad térmica en comparación con el TPU puro, ya que comienza a perder masa ligeramente antes, pero la mayor parte de su descomposición ocurre en un rango similar.
- **97.5-2.5 de 100 (línea roja) y 97.5-2.5 de 80 (línea azul)**: Ambas curvas también muestran un comportamiento similar en cuanto a la pérdida de masa, con la descomposición principal ocurriendo alrededor de los **400-450 °C**, pero presentan ligeras variaciones en el inicio de la pérdida de masa respecto a los otros dos materiales, lo que puede estar relacionado con el tamaño del aditivo (aserrín) en la mezcla.

2. Estabilidad térmica:

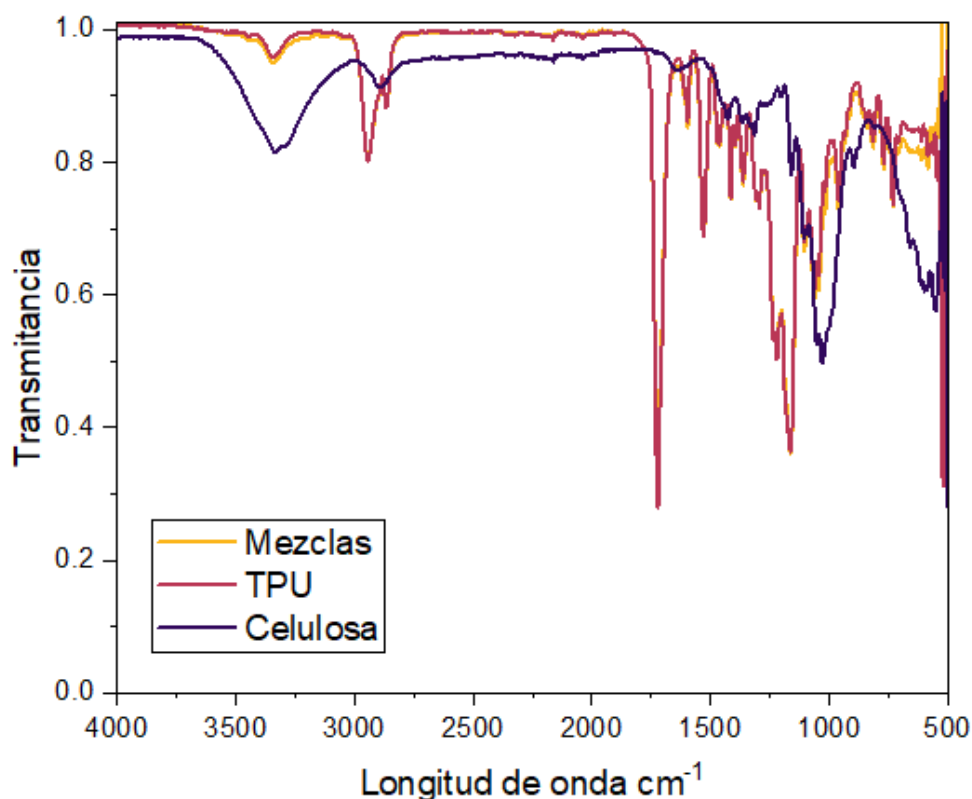
- En general, todas las muestras parecen empezar a descomponerse cerca de los **350-400 °C**, lo cual es común para muchos polímeros termoplásticos como el TPU.
- Las diferencias en las curvas indican que las distintas mezclas tienen una **estabilidad térmica ligeramente diferente** debido a la naturaleza de los aditivos o refuerzos (aserrín).

3. Comparación entre muestras:

- La **línea negra** (95-5 de 120) pierde rápidamente su masa conforme aumenta la temperatura, pero manteniendo una mayor masa residual (es decir, su pérdida de masa es más lenta) en la fase intermedia (alrededor de los 400°-450°) del análisis, lo que sugiere que la adición de ciertos aditivos mejora su estabilidad térmica en altas temperaturas.
- La **línea azul y roja** (97.5-2.5 de 80 y 100) tienen una pérdida de masa significativamente menor durante el aumento de temperatura hasta

aproximadamente los 450°, donde se estabiliza como el resto de materiales, por lo que la adición de aditivos (aserrín) mejora su estabilidad térmica.

4.6 Análisis de FTIR



Gráfica 14. Análisis de FTIR

Interpretación de las curvas:

- **TPU (Rojo):** El TPU muestra picos característicos que son probablemente atribuibles a funcionalidades asociadas con poliuretanos. En regiones específicas como entre los 3000-3500 cm^{-1} , bandas asociadas a las vibraciones de los enlaces O-H o N-H, que son típicas en los grupos uretano del TPU.
- **Celulosa (Morado):** La celulosa, como un polímero natural de origen vegetal, presenta picos característicos, especialmente en la región entre 3200-3500 cm^{-1} , que se asocian con las vibraciones de enlaces O-H de los grupos hidroxilo, así como bandas en el rango de 1000-1200 cm^{-1} debido a vibraciones de los enlaces C-O en su estructura de polisacárido.
- **Mezclas (Amarillo):** Este espectro representa una combinación de TPU y celulosa (aserrín). Su forma indica que conserva ciertas características de ambos componentes.

Hay una superposición significativa de las señales del TPU y la celulosa, lo que sugiere que no hay un cambio en la composición química de TPU.

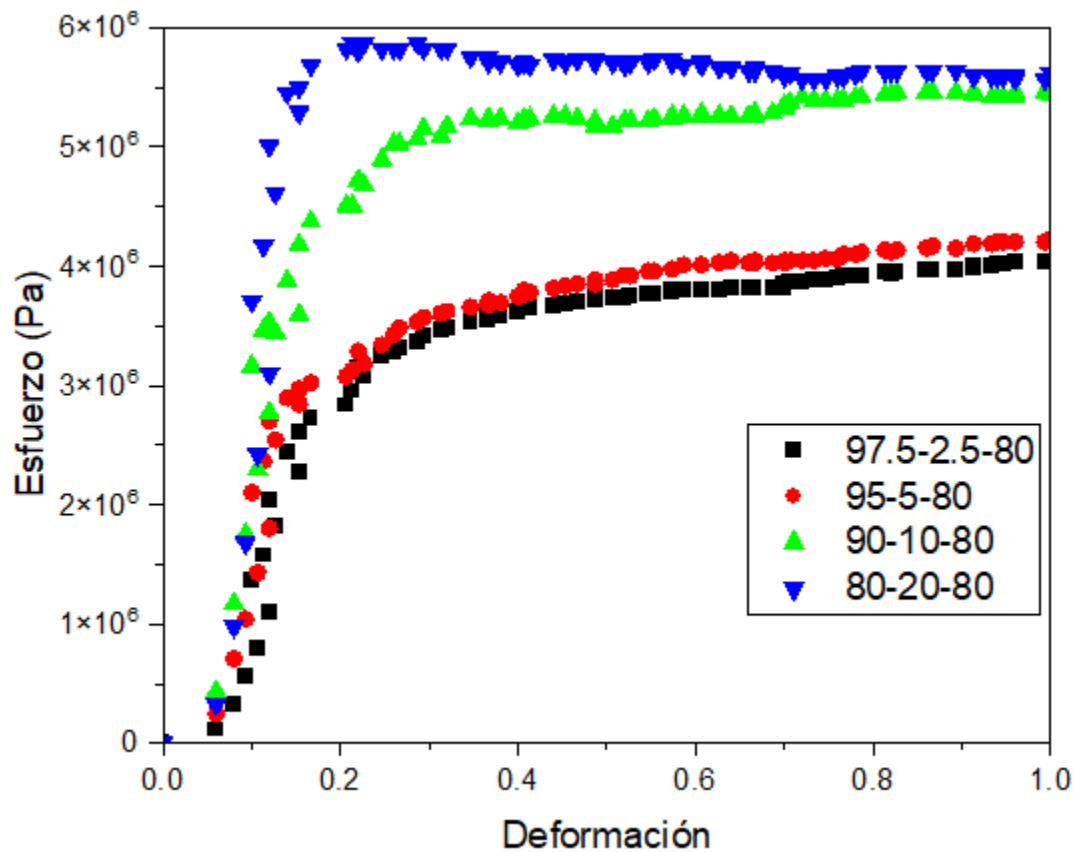
Regiones específicas de interés:

- **Región de 3500-3000 cm^{-1} :** Esta región normalmente está asociada con los grupos funcionales hidroxilo (O-H), lo que es prominente en la celulosa y, hasta cierto punto, en el TPU. La curva de celulosa tiene una clara absorción, lo que refleja la presencia de grupos hidroxilo, mientras que la mezcla (naranja) mantiene algunas características similares, lo que sugiere que los grupos O-H no se han modificado completamente.
- **Región de 2900-2800 cm^{-1} :** Esta es la región asociada con los estiramientos de enlaces C-H de los grupos metilo y metileno. El TPU tiene una clara señal en esta región, lo que indica la presencia de cadenas alifáticas en su estructura.
- **Región de 1750-1500 cm^{-1} :** Aquí suelen aparecer las señales de los grupos C=O (carbonilos), que son característicos en el TPU debido a los enlaces de uretano. Las señales del TPU son claras y se ven parcialmente reflejadas en la curva de las mezclas, lo que sugiere que estos grupos funcionales permanecen presentes en la mezcla.
- **Región de 1100-900 cm^{-1} :** Esta región está asociada principalmente con las vibraciones de los enlaces C-O-C, comunes en la estructura de la celulosa. En este caso, se puede observar que tanto la celulosa como las mezclas tienen bandas prominentes en esta región, indicando que los enlaces C-O siguen siendo una característica dominante.

Compatibilidad y mezclas de TPU y celulosa:

La superposición de los espectros indica que la estructura y composición del TPU, no se ha visto afectada por la adición de aserrín, por lo que el TPU conservará las propiedades inherentes al mismo material. La celulosa podría estar actuando como un refuerzo en la matriz del TPU, o podría haber interacciones a nivel de enlace de hidrógeno entre los grupos O-H de la celulosa y los grupos funcionales del TPU. Sin embargo, la presencia de picos en la mezcla indica que no ha habido una interacción química completa, sino una combinación física en la que ambos materiales conservan algunas de sus propiedades individuales.

4.7 Análisis de Deformación



Gráfica 15. Esfuerzo y Deformación de materiales de malla 80.

1.Comportamiento elástico inicial:

Todas las curvas presentan un aumento relativamente rápido del esfuerzo con poca deformación, lo que corresponde a la **región elástica**. En esta región, el material se deforma de manera reversible, y al retirar la fuerza aplicada, volvería a su forma original. Las pendientes iniciales de las curvas representan el **módulo de Young**, que es una medida de la rigidez del material. Los materiales con mayores proporciones de uno de los componentes, como la curva verde (80-20-80), parecen tener una mayor pendiente inicial, lo que sugiere que este material es más rígido.

2. Límite de elasticidad:

Después de un cierto punto, las curvas tienden a aplanarse, indicando el **límite elástico** del material. Este es el punto en el cual el material comienza a experimentar **deformación plástica**, es decir, deformación permanente. El valor máximo del esfuerzo antes de que la curva comience a aplanarse puede interpretarse como el **límite de fluencia**. Las curvas muestran que a medida que la proporción del segundo componente (aserrín) aumenta (como en el caso de 80-20-80), el material tiene una mayor capacidad para soportar esfuerzos antes de deformarse permanentemente.

3. Esfuerzo máximo y deformación plástica:

Los máximos esfuerzos varían entre aproximadamente 3 MPa y 6 MPa, con la curva correspondiente a **80-20-80** mostrando el esfuerzo máximo más alto (~6 MPa), seguido por **90-10-80** (~5 MPa), **95-5-80** (~3.5 MPa), y **97.5-2.5-80** (~3 MPa). Este aumento en el esfuerzo máximo con la adición de más proporción de un componente refuerza la idea de que una mayor cantidad de refuerzo de aserrín mejora la resistencia del material.

A medida que las curvas alcanzan su máximo, se puede observar un leve descenso en algunos casos, lo que podría representar el fenómeno de **cuello (necking)** o localización de la deformación, típico en materiales dúctiles que experimentan una reducción en la sección transversal al someterse a tensiones más altas.

4. Deformación hasta la falla:

A medida que los materiales se deforman más allá de su límite elástico, experimentan una deformación plástica significativa. El grado de deformación máxima alcanzado antes de la falla es una medida importante de la **ductilidad** del material. Las curvas más rígidas (como 80-20-80) no parecen alcanzar deformaciones tan grandes como las composiciones con menor proporción de refuerzo, sugiriendo que el material más rígido es también más frágil, mientras que las composiciones con menos refuerzo (como 97.5-2.5-80) muestran más deformación antes de alcanzar la ruptura, lo que sugiere mayor ductilidad.

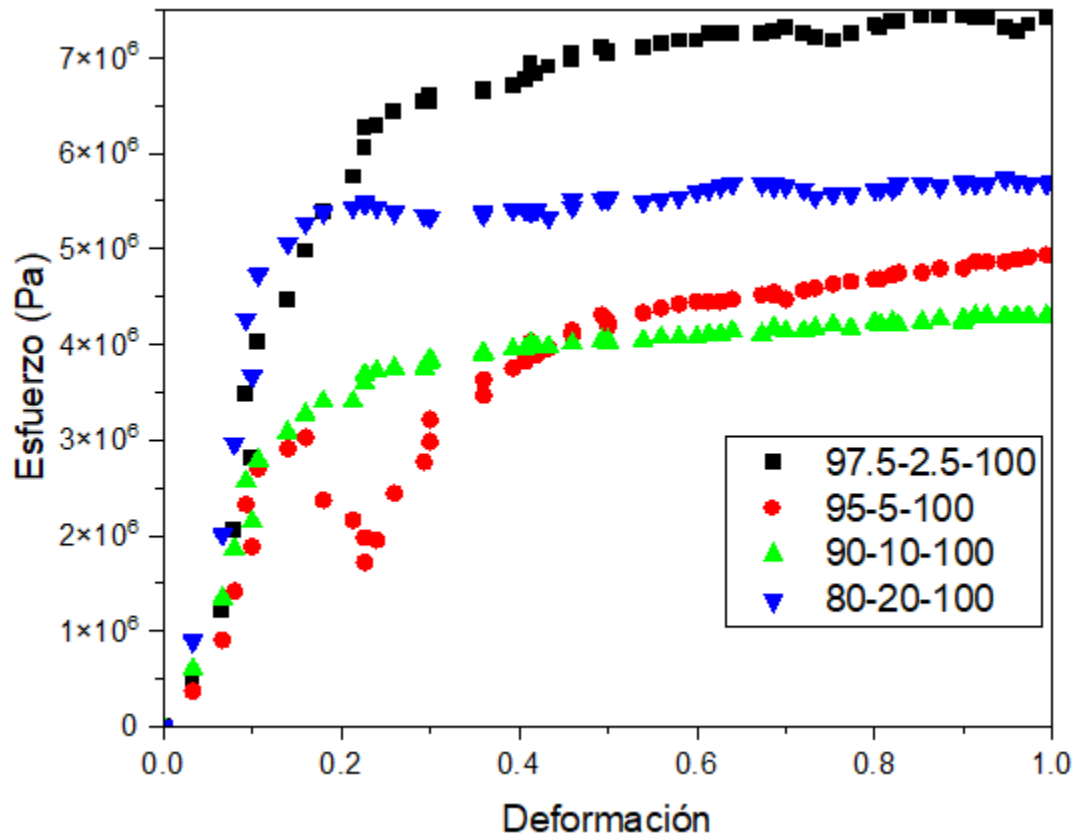
4.8 Comparación de las formulaciones

- **80-20-80 (Verde):** Esta formulación tiene el mayor esfuerzo máximo (~6 MPa) y muestra la mayor rigidez (pendiente inicial), lo que sugiere que el material es el más

resistente y rígido de todos. Sin embargo, su ductilidad es menor comparada con las otras formulaciones, lo que sugiere que es más frágil.

- **90-10-80 (Azul):** Esta curva muestra una buena combinación de rigidez y capacidad para soportar esfuerzos, pero con algo más de ductilidad que 80-20-80. Tiene un esfuerzo máximo alrededor de 5 MPa.
- **95-5-80 (Rojo):** La formulación con 5% de aditivo tiene un comportamiento más equilibrado, con un esfuerzo máximo de 3.5 MPa y una deformación considerable antes de la falla. Es más dúctil que las formulaciones con más refuerzo, pero menos resistente.
- **97.5-2.5-80 (Negro):** Esta es la formulación con menor proporción de refuerzo (2.5%) y muestra la menor resistencia (esfuerzo máximo ~3 MPa) y mayor deformación plástica antes de fallar, lo que sugiere que es el material más dúctil y menos resistente.

Este gráfico revela la influencia de las proporciones de los componentes en las propiedades mecánicas del material compuesto. A medida que la proporción de refuerzo (probablemente el segundo componente en las fórmulas) aumenta, el material se vuelve más rígido y resistente, pero también menos dúctil. Las formulaciones con mayores cantidades de refuerzo, como 80-20-80 y 90-10-80, tienen los mayores esfuerzos máximos y menores deformaciones antes de la falla, lo que las hace adecuadas para aplicaciones que requieren alta resistencia. Por otro lado, las formulaciones con menos refuerzo, como 97.5-2.5-80, muestran mayor ductilidad, lo que las hace más útiles en situaciones donde se requiere flexibilidad y capacidad para soportar deformaciones significativas antes de romperse.



Gráfica 16. Esfuerzo y Deformación de materiales de malla 100.

Comportamiento mecánico

- **97.5-2.5-100 (negro):**
 - Este material muestra el mayor esfuerzo de ruptura, alcanzando aproximadamente los 7 MPa.
 - La curva asciende de forma rápida hasta llegar a su esfuerzo máximo, luego muestra una caída en el esfuerzo en función de la deformación, lo que da un comportamiento plástico.
 - Esto indica una composición con muy alta resistencia mecánica, aunque la capacidad de deformación es menor en comparación con otros materiales del gráfico.
- **95-5-100 (rojo):**

- La curva de este material es relativamente estable después de un primer incremento, estabilizándose en torno a los 3 MPa.
 - Aunque la capacidad de esfuerzo máximo es menor en comparación con el material de 97.5-2.5-100, este compuesto muestra una deformación progresiva sin alcanzar una caída abrupta en esfuerzo, lo cual podría señalar una mayor ductilidad.
 - Este comportamiento podría ser favorable en aplicaciones que requieran cierta flexibilidad sin comprometer la resistencia estructural.
- **90-10-100 (verde):**
 - En este caso, se observa una respuesta mecánica similar a la del material 95-5-100, pero con un esfuerzo máximo ligeramente menor.
 - La deformación es más alta que la de los materiales con menor contenido del segundo componente, indicando una mayor ductilidad y capacidad de elongación.
 - Este comportamiento sugiere una mezcla balanceada entre resistencia y flexibilidad.
- **80-20-100 (azul):**
 - Este material tiene el menor esfuerzo máximo, estabilizándose alrededor de 5 MPa.
 - La curva de esfuerzo muestra una menor pendiente inicial en comparación con los demás materiales, lo cual indica una menor rigidez.
 - El comportamiento de este compuesto parece estar orientado hacia una mayor flexibilidad o capacidad de deformación, lo que podría ser útil en aplicaciones que requieran resistencia a la deformación sin una alta carga de esfuerzo.

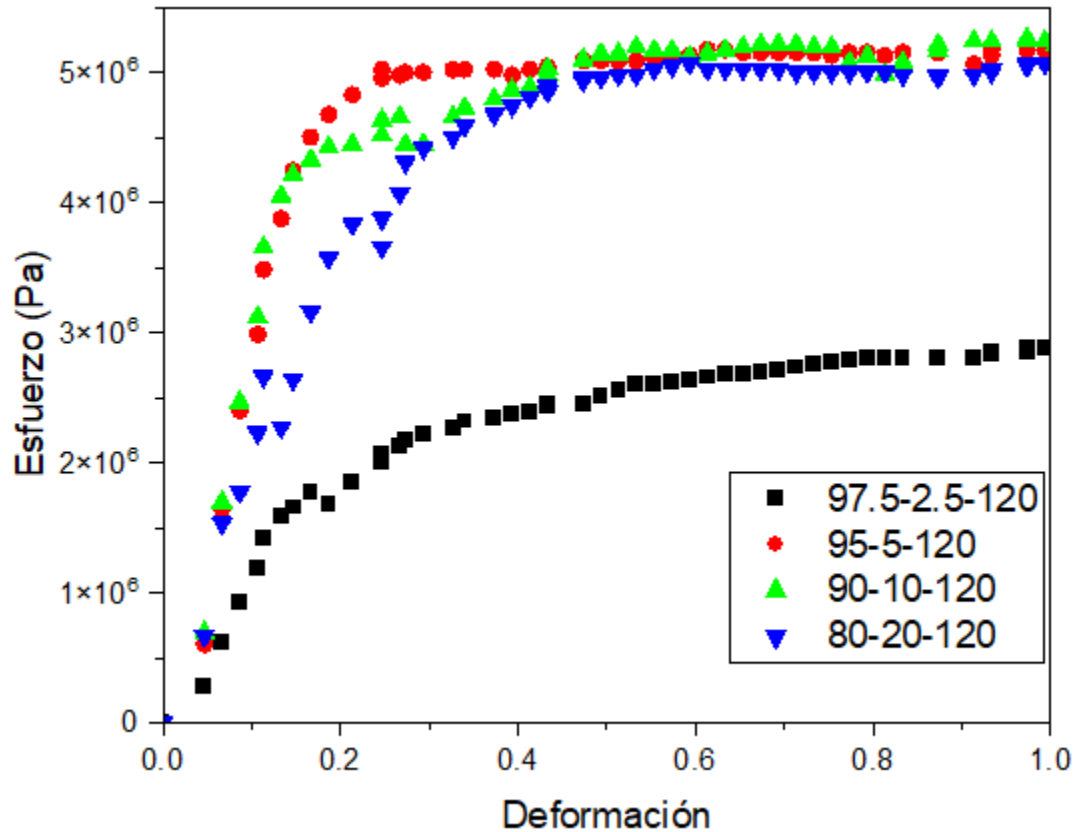
Análisis comparativo

La composición del material influye significativamente en las propiedades mecánicas, como se observa en el cambio de la resistencia y la ductilidad con el incremento del segundo

componente. Los materiales con una mayor cantidad del primer componente (97.5 y 95) alcanzan esfuerzos más altos, pero a expensas de una menor capacidad de deformación. Por el contrario, al aumentar la proporción del segundo componente (como en 80-20), se reduce la resistencia al esfuerzo, pero aumenta la capacidad de deformación.

Implicaciones de diseño y aplicación

Estos materiales muestran una combinación de propiedades que puede ser aprovechada para distintas aplicaciones. Las mezclas con mayor resistencia (como 97.5-2.5) son ideales para aplicaciones donde se requiera alta capacidad de carga y rigidez, como en estructuras portantes o en componentes expuestos a altas tensiones. Por otro lado, los materiales con mayor capacidad de deformación (como 80-20) serían adecuados para aplicaciones que requieran flexibilidad, absorción de energía, o resistencia a impactos.



Gráfica 17. Esfuerzo y Deformación de materiales de malla 120.

Comportamiento mecánico

1. 97.5-2.5-120 (negro):

- La curva de este compuesto muestra un comportamiento notablemente distinto al del gráfico anterior (100).
- Su esfuerzo máximo alcanza apenas los $2 \times 10^6 \times 10^6$ Pa, una reducción significativa respecto al esfuerzo alcanzado en la condición de 100.
- La curva tiene una pendiente menor y un comportamiento casi lineal que sugiere un material menos rígido bajo esta condición, con una mayor tendencia a la deformación sin alcanzar el mismo nivel de esfuerzo.

2. 95-5-120 (círculos rojos):

- La curva del material 95-5-120 alcanza aproximadamente $5 \times 10^6 \times 10^6$ Pa, similar a su esfuerzo en la condición de 100, pero con una pendiente inicial menos pronunciada.
- Este material mantiene un buen nivel de resistencia, aunque la capacidad de deformación parece ligeramente mayor.
- Este comportamiento sugiere una menor rigidez inicial y una buena ductilidad en esta nueva condición, lo cual puede ser indicativo de una menor resistencia interna debido a los efectos de la temperatura o la carga.

3. 90-10-120 (triángulos verdes):

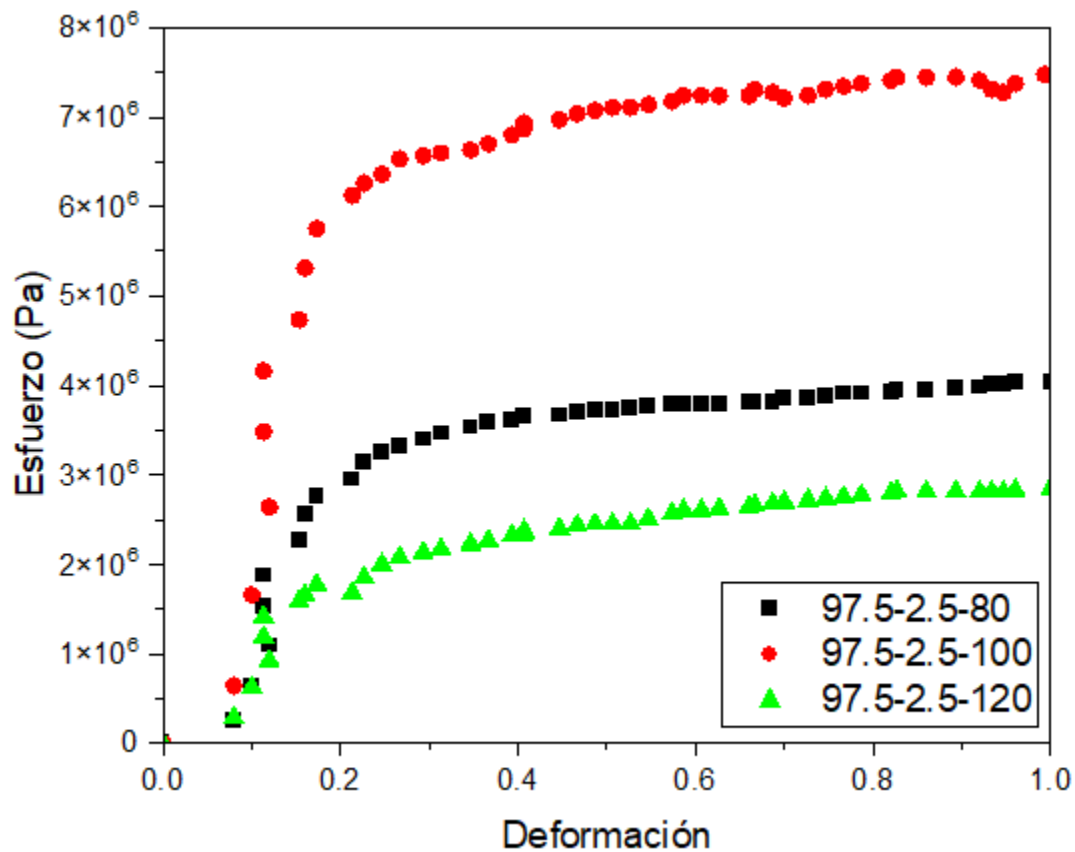
- La respuesta mecánica de este material alcanza un esfuerzo de casi $5 \times 10^6 \times 10^6$ Pa, con una curva que se estabiliza rápidamente, indicando que el material alcanza su límite de carga y resistencia a una deformación relativamente baja.
- La capacidad de deformación parece haber aumentado en comparación con la condición de 100, lo cual podría ser favorable para aplicaciones que requieran flexibilidad adicional.
- La reducción en rigidez inicial indica que este compuesto también es menos resistente bajo la nueva condición.

4. 80-20-120 (triángulos azules):

- El esfuerzo máximo de este material ronda los $5 \times 10^6 \times 10^6$ Pa, en línea con su desempeño en la condición de 100.
- Sin embargo, la curva muestra una pendiente inicial menor y una capacidad de deformación mayor, lo cual sugiere un aumento en ductilidad.
- Este comportamiento parece confirmar que una mayor proporción del segundo componente (probablemente madera) bajo esta condición mejora la flexibilidad a costa de una reducción en la rigidez inicial.

El material 97.5-2.5-120 presenta de 2 MPa. Este cambio sugiere que tamaño tan reducido de aserrín afecta más a los compuestos con menor proporción de componente natural, disminuyendo su rigidez y resistencia.

Los materiales 95-5-120, 90-10-120, y 80-20-120, por otro lado, mantienen un esfuerzo máximo similar al de la condición 100, pero muestran un comportamiento de mayor ductilidad y menor rigidez inicial. Esto sugiere que el aserrín proporciona una estructura más estable a temperaturas elevadas, lo cual podría ser beneficioso en aplicaciones que requieran resistencia a temperaturas elevadas o fluctuantes.



Gráfica 18. Esfuerzo y Deformación de materiales de proporciones 95.5-2.5.

Comportamiento mecánico

1. Material 97.5-2.5-80 (negro):

- Exhibe un comportamiento mecánico intermedio entre los tres materiales, alcanzando un esfuerzo de saturación alrededor de 3 MPa.
- La curva muestra un aumento rápido en el esfuerzo al inicio de la deformación, seguido por una meseta a partir de una deformación cercana a 0.2.

2. Material 97.5-2.5-100 (rojo):

- Este material muestra el esfuerzo más alto de los tres, alcanzando aproximadamente 7 MPa.
- El incremento en el esfuerzo es más pronunciado y sostenido en comparación con los otros dos materiales, lo que indica una mayor resistencia a la

deformación. Esta característica sugiere que el material tiene una mayor rigidez y resistencia mecánica.

- La meseta en esta curva sugiere un límite elástico alto, posiblemente debido a un refuerzo o una mayor calidad de enlace entre las partículas en su matriz.

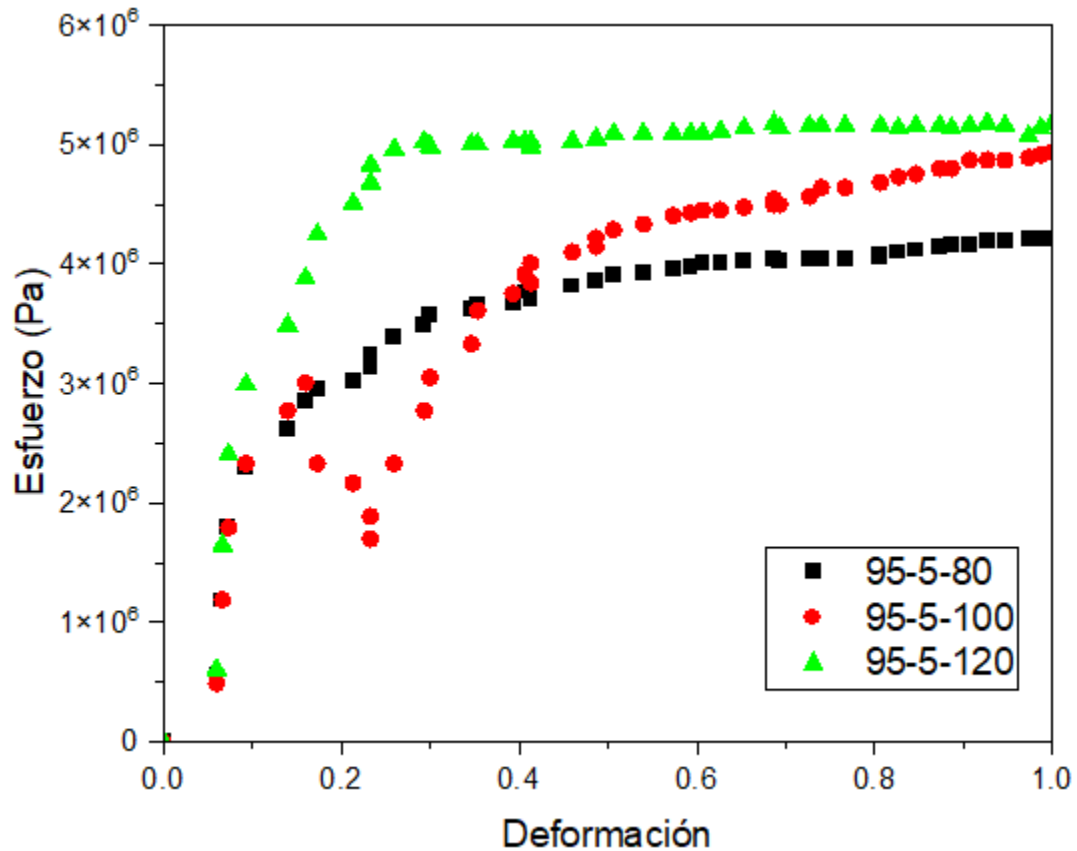
3. **Material 97.5-2.5-120 (verde):**

- Muestra el esfuerzo más bajo en comparación con los otros materiales, alcanzando un máximo de cerca de 2 MPa.
- La curva tiende a aplanarse a partir de una deformación cercana a 0.1, indicando una baja capacidad de soportar cargas después de un límite inicial bajo.
- Este comportamiento podría sugerir que el material tiene menos rigidez y puede deformarse más fácilmente bajo carga.

Interpretación y posibles aplicaciones

La variación en el comportamiento mecánico de estos materiales sugiere que el parámetro indicado por el tamaño de malla 80, 100 y 120 tiene una influencia significativa en la rigidez y resistencia final de los compuestos.

- **Material con esfuerzo elevado (97.5-2.5-100)** podría ser adecuado para aplicaciones que requieran alta resistencia mecánica y rigidez, como componentes estructurales, piezas automotrices, o aplicaciones en la construcción.
- **Material con menor esfuerzo (97.5-2.5-80 y 97.5-2.5-120)** podrían tener aplicaciones en productos que requieran una mayor capacidad de deformación, como empaques flexibles, almohadillas protectoras o elementos de absorción de impacto.



Gráfica 19. Esfuerzo y Deformación de materiales de proporciones 95-5.

Comportamiento mecánico:

1. Material 95-5-80 (negro):

- La curva muestra un aumento constante en el esfuerzo a medida que aumenta la deformación, alcanzando un valor máximo cercano a 4 MPa.
- La curva se estabiliza aproximadamente a una deformación de 0.4 , lo que indica un comportamiento de saturación en el esfuerzo y sugiere que este material posee un equilibrio entre resistencia y ductilidad.
- La curva es relativamente uniforme, lo que sugiere que este material podría mantener una estabilidad estructural bajo deformación continua.

2. Material 95-5-100 (rojo):

- Presenta un esfuerzo máximo cercano a los 3 MPa, mostrando un comportamiento inferior al de los otros materiales en términos de capacidad de carga.
- La curva tiene un crecimiento menos uniforme y evidencia una caída en ciertos puntos de la deformación, lo cual sugiere que este material experimenta alguna inestabilidad o pérdida de resistencia a medida que se deforma.
- Esta inestabilidad podría deberse a una estructura interna menos cohesionada, probablemente debido a una condición de procesamiento que no optimizó la interacción entre la matriz y el refuerzo.

3. **Material 95-5-120 (verde):**

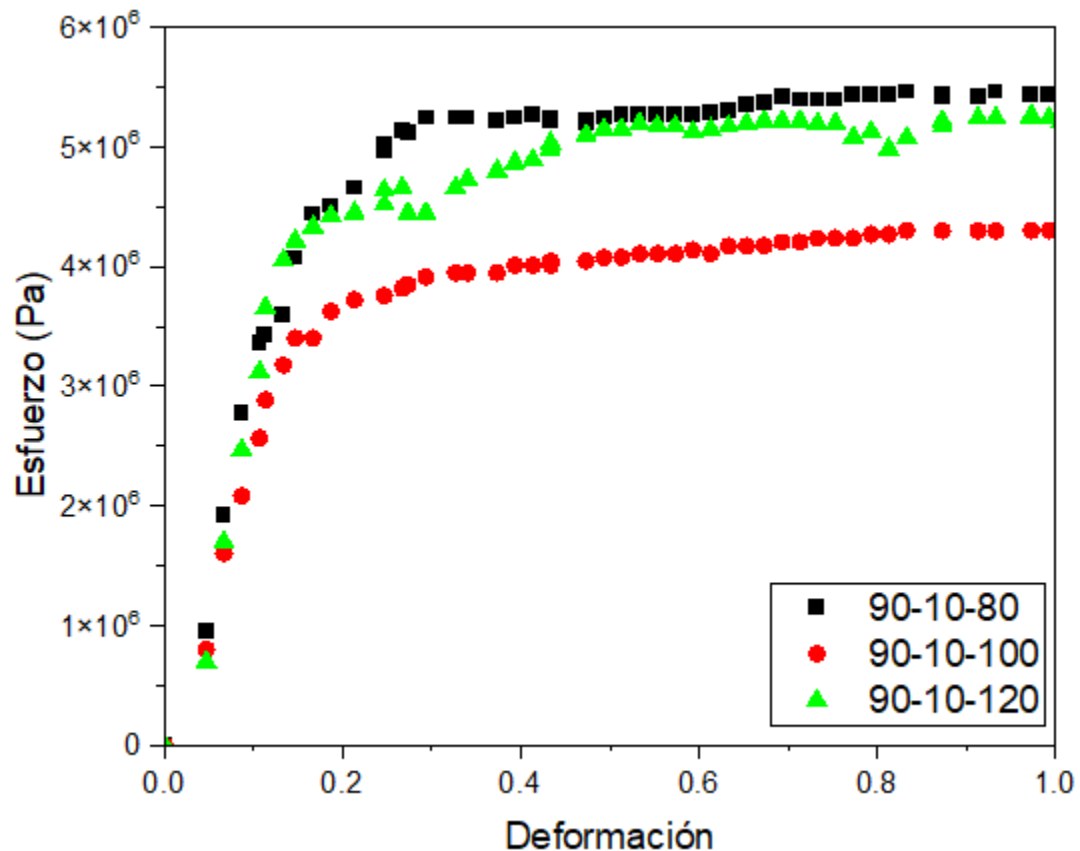
- Este material muestra el mayor esfuerzo entre los tres, alcanzando valores cercanos a 5 MPa.
- La curva es más pronunciada en las etapas iniciales de la deformación y luego se estabiliza a partir de aproximadamente 0.3, lo que indica que este material es significativamente resistente y podría tener una alta rigidez.
- La estabilidad en la región de saturación sugiere que este material está bien cohesionado, lo que le permite mantener un alto nivel de esfuerzo sin fracturarse prematuramente.

Comparación general y aplicaciones potenciales

En términos de aplicaciones prácticas, el material **95-5-120** sería adecuado para situaciones que requieran alta resistencia y rigidez, como en componentes estructurales o en aplicaciones automotrices y de construcción. La alta cohesión interna en este material sugiere que puede soportar cargas elevadas sin deformarse significativamente.

El material **95-5-80**, con su esfuerzo máximo intermedio y su estabilidad, podría ser útil para aplicaciones donde se necesite una buena combinación de resistencia y flexibilidad, como empaques o materiales de amortiguación.

Finalmente, el material **95-5-100** podría estar limitado en aplicaciones donde se requiera una resistencia mecánica estable, ya que la inestabilidad en la curva sugiere posibles problemas de cohesión interna.



Gráfica 20. Esfuerzo y Deformación de materiales de proporciones 90-10.

Comportamiento mecánico

1. Material 90-10-80 (negro):

- Este material alcanza un esfuerzo máximo de aproximadamente 5.5 MPa.
- La curva se estabiliza en este valor alrededor de una deformación de 0.3, indicando que tiene una buena resistencia y una capacidad para mantener la carga a medida que se deforma.
- Este comportamiento sugiere que el material tiene una estructura interna estable y posiblemente una buena cohesión entre la matriz y el refuerzo, lo cual le permite soportar esfuerzos elevados sin perder su integridad.

2. Material 90-10-100 (rojo):

- Este material muestra un esfuerzo máximo de alrededor de 4 MPa, lo cual es inferior en comparación con los otros dos.

- La curva es menos pronunciada y tiene un incremento de esfuerzo más gradual, estabilizándose alrededor de una deformación de 0.2, lo cual sugiere una menor rigidez.
- Este material podría ser menos adecuado para aplicaciones de alta carga, ya que su capacidad de soportar esfuerzos es limitada en comparación con los demás.

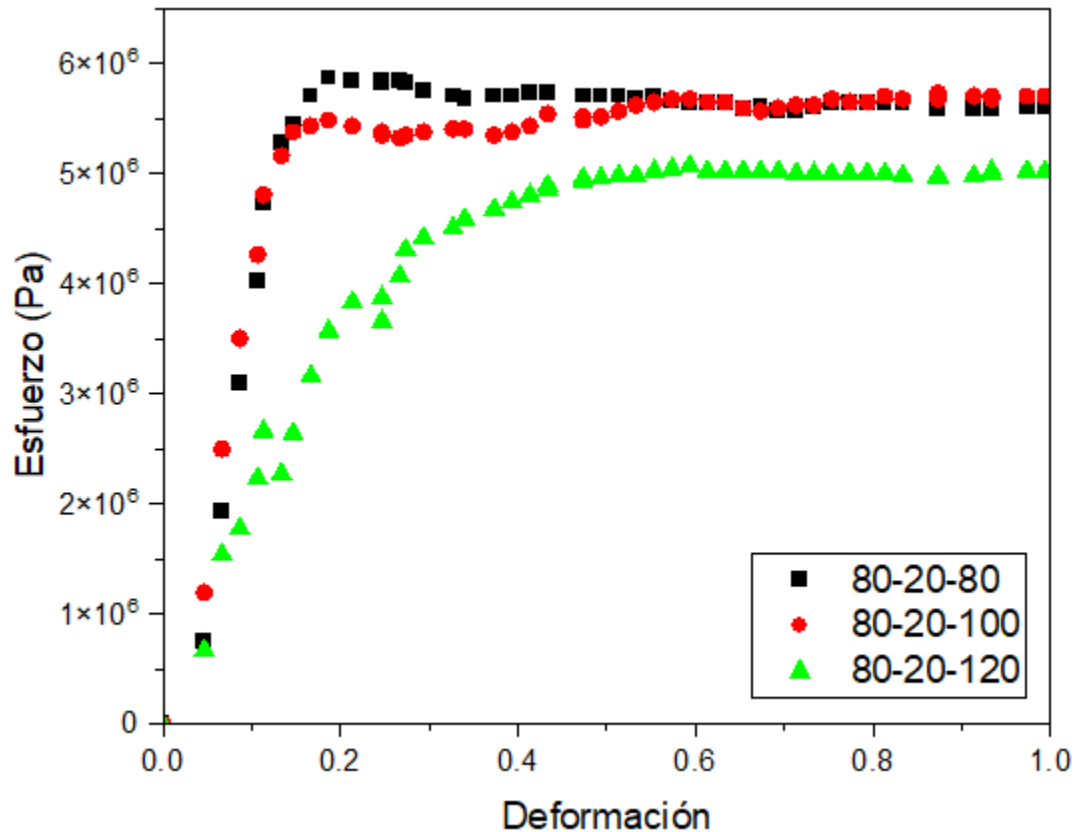
3. **Material 90-10-120 (verde):**

- Este material presenta un esfuerzo máximo cercano a 5 MPa, con un comportamiento intermedio entre los otros dos.
- La curva sube rápidamente en las primeras etapas de deformación y luego se estabiliza en torno a 0.25 de deformación, mostrando buena capacidad de carga, pero sin superar al material 90-10-80.
- Esto sugiere que el procesamiento del tamaño de malla "120" produce un material con alta resistencia, aunque ligeramente inferior al de la configuración "80".

En términos de aplicaciones prácticas, el material **90-10-80** es el más adecuado para situaciones que requieren alta resistencia mecánica y estabilidad estructural, como en componentes estructurales, construcción, o incluso aplicaciones automotrices. Este material podría soportar mayores cargas sin deformarse significativamente.

El material **90-10-120**, aunque también es resistente, podría utilizarse en aplicaciones que requieren una resistencia moderada, donde se permite cierta flexibilidad en el material.

El material **90-10-100**, debido a su menor capacidad de carga, podría ser más adecuado para aplicaciones donde la resistencia no sea el factor crítico, como en componentes menos exigentes que requieran un material con cierta capacidad de deformación sin que colapse.



Gráfica 20. Esfuerzo y Deformación de materiales de proporciones 80-20.

Comportamiento mecánico

1. Material 80-20-80 (negro):

- Este material alcanza el mayor esfuerzo máximo, cercano a 6.5 MPa, lo que indica que tiene una alta capacidad de carga.
- La curva se estabiliza a partir de una deformación de 0.2, mostrando que mantiene su resistencia en una amplia gama de deformación.
- Este material parece ser altamente resistente y estructuralmente estable, lo cual puede ser ideal para aplicaciones de alta carga donde se necesita máxima resistencia.

2. Material 80-20-100 (rojo):

- Este material también muestra una alta capacidad de carga, con un esfuerzo máximo en torno a 5.5 MPa, aunque ligeramente inferior al 80-20-80.

- La curva tiene un comportamiento más estable que el 80-20-120, alcanzando su máximo y manteniendo una resistencia constante a partir de una deformación de 0.2.
- El tamaño de malla "100" produce un material de buena resistencia, aunque no óptima en comparación con el 80-20-80.

3. Material 80-20-120 (verde):

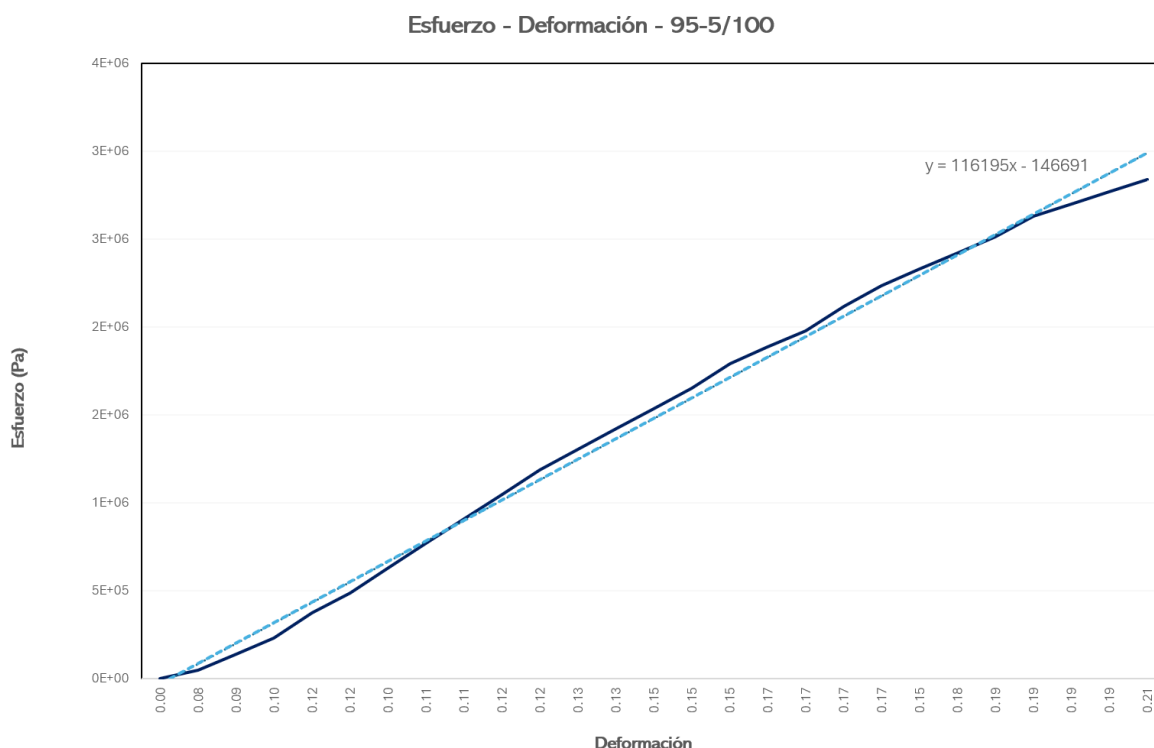
- Este material tiene un esfuerzo máximo considerablemente menor, alcanzando alrededor de 4.5 MPa.
- La curva tiene una pendiente inicial más baja, y el esfuerzo se estabiliza a un nivel menor en comparación con los otros dos materiales.
- Esto indica que la malla "120" no es óptima para maximizar la resistencia, probablemente debido a un problema al momento de mezclarse ambos TPU y aserrín que podría estar afectando la integridad estructural del material.

Por lo que, el material (80-20-80) presenta la mayor resistencia mecánica y estabilidad en la deformación, lo cual lo hace ideal para aplicaciones estructurales que requieren alta carga, como en construcción o en componentes de maquinaria pesada. La resistencia observada en el 80-20-100 es también significativa, aunque su aplicación podría ser más limitada en comparación con el 80-20-80.

El material 80-20-120, con su menor capacidad de carga, podría ser aplicable en contextos menos exigentes donde la flexibilidad es preferible sobre la resistencia máxima, o en componentes de menor responsabilidad estructural.

Análisis del Módulo de Young

Se obtuvo el módulo de Young de los materiales compuestos mediante un ajuste lineal en la región elástica de sus respectivas curvas de esfuerzo-deformación. Para cada material, se calculó la pendiente de dicha región, la cual corresponde al valor del módulo de Young. Este procedimiento permitió una estimación de la rigidez elástica de cada material, reflejando su capacidad de resistencia frente a deformaciones en el régimen elástico.



Gráfica 21. Esfuerzo y Deformación de 95-5/100 para cálculo de módulo de Young.

Análisis de los módulos de Young obtenidos y Observaciones Clave

1. Efecto de la Composición en el Módulo de Young

Los datos indican que la composición porcentual tiene una influencia significativa en el módulo de Young, con una tendencia general al aumento del módulo conforme se incrementa el porcentaje del segundo componente (potencialmente el refuerzo) en el material.

Composición 70% - 30% y Malla 120

- En particular, la combinación del 70% - 30% con una malla de 120 resulta en el módulo de Young más alto, con un valor de **237,401 Pa**. Este punto indica que, con una mayor proporción de refuerzo, el material gana considerablemente en rigidez.
- Este valor sobresale en comparación con todas las demás combinaciones, sugiriendo una sinergia óptima entre la composición y el tamaño de malla en esta configuración.

Composición 80% - 20% y Variación en la Malla

- La segunda composición que muestra un valor elevado del módulo de Young es la de **80% - 20%**, destacando una fuerte respuesta mecánica con 191,683 Pa en malla 100 y 177,748 Pa en malla 80. Esto indica que la malla y la composición interactúan de manera compleja para fortalecer el material.

Patrones Generales

- En general, el aumento del segundo componente (el refuerzo) parece mejorar las propiedades de rigidez, alcanzando un óptimo con el 30%. Sin embargo, una malla específica también es crucial para alcanzar estos niveles máximos, particularmente la malla 120 en el caso de 70% - 30%.
- Este hallazgo sugiere que una mayor proporción de refuerzo contribuye directamente a incrementar la resistencia del material hasta cierto punto. Más allá de esta proporción, el incremento podría no ser lineal y dependería en gran medida del tamaño de malla utilizado.

2. Efecto de la Malla en el Módulo de Young

El tamaño de la partícula debido a la malla influye de manera diferenciada dependiendo de la composición:

- **Para el 97.5% - 2.5%:** El módulo de Young decrece con la reducción de la malla, con valores de 49,804 Pa en malla 120 y de 70,559 Pa en malla 80.
- **Para el 80% - 20%:** Observamos que el módulo de Young es significativamente mayor en las mallas más grandes (191,683 Pa en malla 100 frente a 177,748 Pa en

mallas 80), lo cual resalta que una malla más fina podría limitar el impacto del refuerzo.

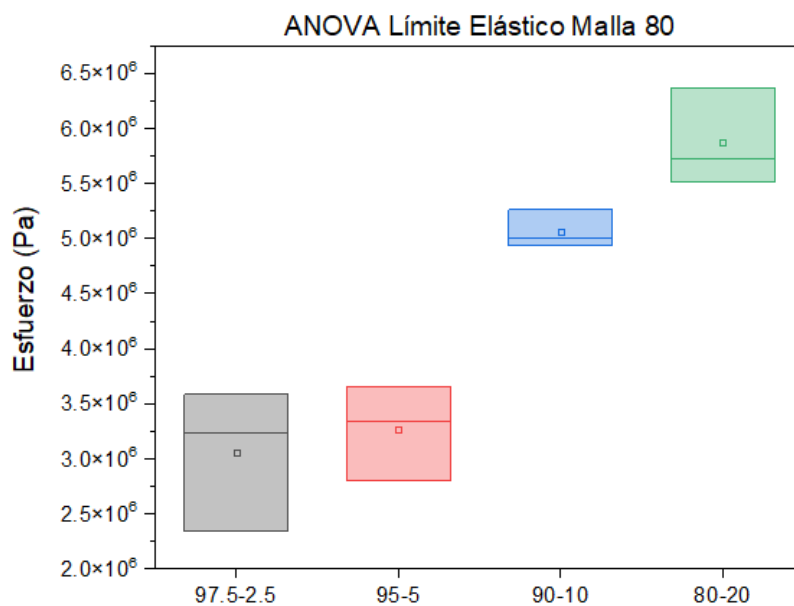
Por lo que las mallas más grandes tienden a mejorar el módulo de Young en las composiciones con mayor cantidad de refuerzo (20-30%), sugiriendo que una mayor integración del refuerzo con una malla más abierta favorece la transferencia de carga y mejora la rigidez del material.

<i>Porcentaje</i>	<i>Malla</i>	<i>Módulo de Young (Pa)</i>
97.5% - 2.5%	120	49,804
95% - 5%		126,110
90% - 10%		143,330
80% - 20%		101,732
70% - 30%		237,401
97.5% - 2.5%	100	142,587
95% - 5%		116,195
90% - 10%		96,221
80% - 20%		191,683
97.5% - 2.5%	80	70,559
95% - 5%		109,908
90% - 10%		159,172
80% - 20%		177,748

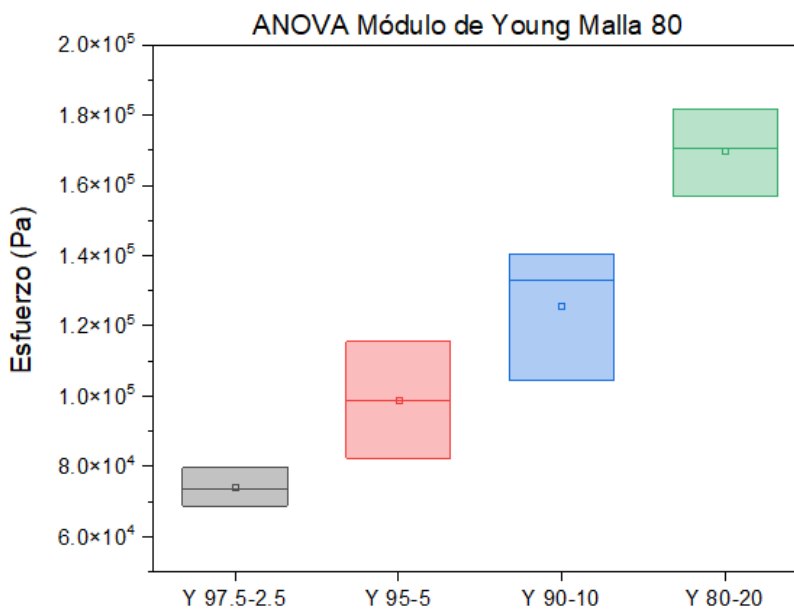
Tabla 14. Módulos de Young de los materiales compuestos.

Análisis ANOVA

Se realizaron análisis de ANOVA, dando como resultado los siguientes gráficos.

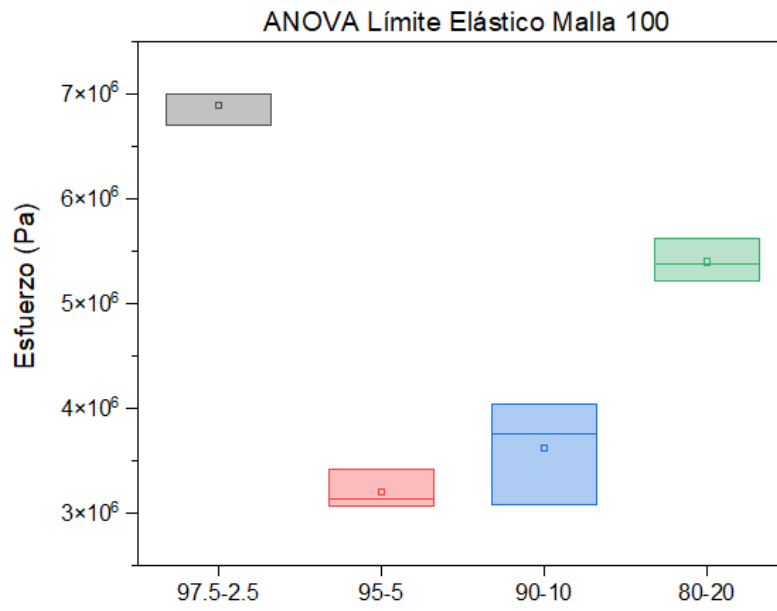


Gráfica 22. ANOVA Límite Elástico Malla 80

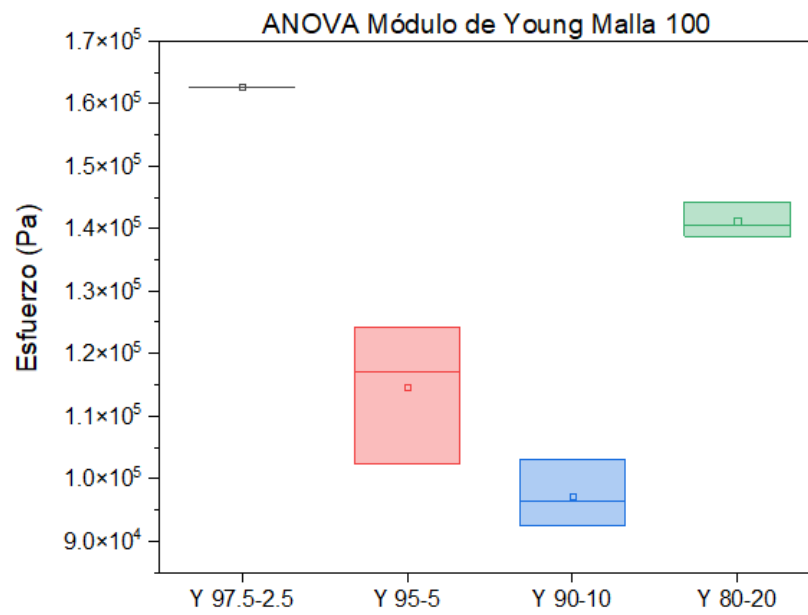


Gráfica 23. ANOVA Módulo de Young Malla 80

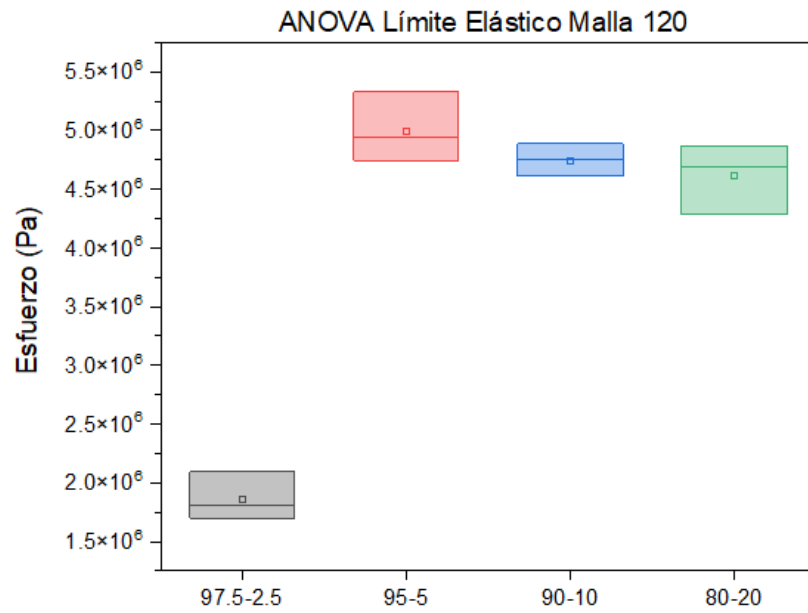
Gráfica 22. ANOVA Límite Elástico Malla 80



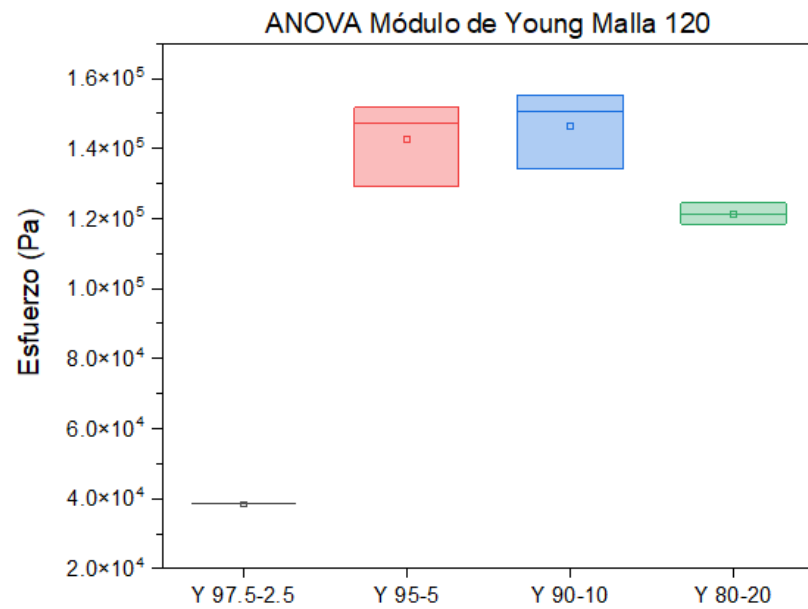
Gráfica 24. ANOVA Límite Elástico Malla 100



Gráfica 25. ANOVA Módulo de Young Malla 1



Gráfica 26. ANOVA Límite Elástico Malla 120



Conclusión

Sobre el análisis TGA...

La adición de una pequeña cantidad de un segundo componente al TPU afecta positivamente la estabilidad térmica. Las muestras con 2.5% y 5% de este componente muestran mayor resistencia a la descomposición en comparación con el TPU. Esto sugiere que, en pequeñas proporciones, el aserrín actúa no solo como un refuerzo, sino que retrasa la descomposición del material conforme se eleva la temperatura.

Las mejoras en la estabilidad térmica del TPU mediante la adición de un segundo componente son significativas, especialmente para aplicaciones que requieren resistencia a altas temperaturas. Esta investigación puede tener relevancia en industrias como la automotriz o la construcción, donde los materiales pueden estar expuestos a condiciones térmicas extremas.

El análisis sugiere que es posible optimizar la estabilidad térmica del TPU mediante la adición controlada de aserrín. La formulación con 95% de TPU y 5% de aserrín, de tamaño de malla 120, parece ser la más prometedora en términos de resistencia térmica, seguida por las formulaciones de tamaño 80 y 100.

Acerca del análisis FTIR...

La superposición de picos en la muestra de mezcla sugiere que el TPU no se vio afectada por la celulosa. Aunque el cambio entre 550 y 500 cm^{-1} indican que existe una interacción entre ambos materiales modificando el comportamiento del material compuesto.

Los resultados sugieren que la incorporación de celulosa en TPU podría ser beneficiosa para aplicaciones donde se requieren materiales más sostenibles con buena compatibilidad de fases. La interacción observada entre el TPU y la celulosa podría permitir la fabricación de materiales compuestos con propiedades mejoradas y mayor resistencia, además de aportar características biodegradables debido a la presencia de celulosa (aserrín).

En referente a estrés y deformación...

El análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas de TPU-celulosa sugiere que tanto la proporción de celulosa como el tamaño de partícula (tamaño de malla) son factores determinantes para mejorar el rendimiento del material.

A mayor proporción de celulosa, se observa un incremento significativo en la resistencia y rigidez de las mezclas de TPU, especialmente cuando las partículas de celulosa son más finas. Esto indica que la celulosa no solo mejora la resistencia mecánica, sino que su tamaño de partícula optimizado permite una distribución de cargas más uniforme.

Las partículas de malla 120, al ser más finas, proporcionan un refuerzo superior en comparación con las partículas de malla 80. Esto se debe probablemente a una mejor interacción entre el TPU y la celulosa, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y estabilidad estructural.

Las mezclas de TPU-celulosa con partículas finas de malla 120 y alto contenido de celulosa (por ejemplo, 80-20-120) son candidatas ideales para aplicaciones estructurales que demandan alta resistencia y estabilidad. En cambio, las mezclas con partículas de malla más gruesa podrían ser útiles en aplicaciones menos exigentes, donde la flexibilidad y menor rigidez inicial son deseables.

En relación con el Módulo de Young

La malla 100 presenta los valores de rigidez más altos, especialmente para composiciones con un contenido de partículas elevado (20%), alcanzando un Módulo de Young de **191,683 Pa** en el caso de la mezcla 80%-20%. Esto podría indicar que este tamaño de malla permite una mejor interacción entre el TPU y las partículas, incrementando la rigidez del material. Por otro lado, la malla 120 muestra una reducción en el módulo de Young al aumentar el contenido de partículas más allá del 10%, mientras que en la malla 80 los valores de rigidez se mantienen altos en general, aunque no superan a los de la malla 100.

A medida que aumenta el porcentaje de partículas en cada malla, se observan diferentes tendencias:

Los datos sugieren que la elección del tamaño de malla y el porcentaje de partículas en una mezcla de TPU-partículas es fundamental para controlar el Módulo de Young, y, por lo tanto, la rigidez del material compuesto. La malla 100 muestra la mayor rigidez en la composición

80%-20%, lo cual podría deberse a un balance óptimo entre tamaño de partícula y su dispersión en la matriz de TPU. Además, estos resultados indican que una mayor proporción de partículas no siempre implica una mayor rigidez, ya que las interacciones pueden variar dependiendo de la malla y del contenido de partículas.

Bibliografía

- Ceballo, J. J. (2019). *Libro manufactura aditiva (impresión 3d)*. Obtenido de DSpace Repository: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16409>
- E. paul DeGarmo. (1969). Toronto, Canadá: The Macmillan Company.
- Gutiérrez, A. J. (2008). *Diseño de Procesos en ingeniería química*. Mex.: Reverseté, S.A.
- Hammet, L. P. (2005). *Chemistry of Engineering Materials*. LEIGHOU.
- Parkin, S. M. (1994). *Chemistry For Enviromental Engineering*. McGrawHill.
- Ramos, J. G. (2004). *Introducción al análisis químico de los plasticos*. BLUME.
- Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. E.U: Wiley.
- Valle, L. F. (2007). *Extursión de plasticos*. Mex: Limusa.
- Antonio Espinoza Martínez, P. A. (2017). *Estudio para el desarrollo de compuestos de poliéteruretano termoplástico (TPU)-hidroxiapatita (HA) para su posible uso en implantes ortopédicos: Procesabilidad y propiedades mecánicas*. CIQA Repositorios. Recuperado 28 de noviembre de 2023, de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/429>
- Alexandra. (2022, 2 agosto). *¿Cómo es de flexible el TPU? Todo sobre el filamento TPU*. Technologies.
- Kariz, M., & Eslami-Farsani, R. (2017). *Effect of wood content in FDM filament on the properties of 3D printed parts*. Journal of Materials Research and Technology, 6(4), 347-354.
- La economía circular: *Un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente*. (2023, 22 agosto). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>
- López, J. P., et al. (2018). *A comparative study of lignocellulose, cellulose and lignin as oxygen barrier in thermoplastic starch film*. Carbohydrate Polymers, 2010

- Ahn, S. H., & Kim, G. H. (2019). *A review on 3D printing for customized food fabrication*. Food Science and Biotechnology,
- Chen, C., Cai, S., Li, H., Huang, J., & Jia, Y. (2022). *Wood and lignocellulose reinforced polymer composites: A review*. Polymers