

**CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DEL ÁCIDO POLILÁCTICO PURO Y CON MODIFICACIONES DE CELULOSA Y
LIGNINA PARA IMPRESIONES 3D**

**LEIDY VIVIANA RODRÍGUEZ ARENAS
OSCAR DAVID GALLO MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2022

**CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS
DEL ÁCIDO POLILÁCTICO PURO Y CON MODIFICACIONES DE CELULOSA Y
LIGNINA PARA IMPRESIONES 3D**

**LEIDY VIVIANA RODRÍGUEZ ARENAS
OSCAR DAVID GALLO MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director:
William Pinto Hernández
Doctorado en Ingeniería mecánica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2022

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por este logro tan importante en mi vida, a pesar de las dificultades me dio el entendimiento y la valentía para forjarme como la mujer que soy.

A mis dos amores Juan diego y Martin Eduardo por consentirme y alegrar todos mis días, son la mejor bendición. Este logro es de ellos.

A mis padres Felsomina y José Vicente por quienes, con su amor, respeto y esfuerzo me han permitido logra una meta más. Con su ejemplo me han enseñado a luchar por mis sueños, formándome para ser mejor persona cada día y crecer profesionalmente.

A mi hermana Franny Paola con sus consejos, paciencia y amor me ha guiado en el camino. A mi cuñado por su cariño y acompañarnos en todo.

A mis amigas quienes siempre estuvieron presentes con su apoyo incondicional.

Leidy Viviana Rodríguez Arenas

DEDICATORIA

A Dios por guiarme en el mejor camino del bien, por siempre estar acompañándome en cada paso que doy y a buscar la mejor solución en cada dificultad presentada en mi vida, por siempre escuchar mis peticiones y por ayudarme a conseguir cada logro y triunfo propuesto, pero en especial por haberme dado la mejor familia del mundo.

A mis padres por apoyarme en todos mis proyectos de vida, por ser modelo de humildad, carácter y respeto, por formarme tanto como personal y profesional. Por darme su cuidado y amor absoluto.

A mi hermana por ser partícipe del apoyo incondicional, por creer en mí siempre para lograr cada una de las metas y objetivos en el paso de mi vida, siempre estaré agradecido. A mis hermanos por brindarme su conocimiento, experiencia y ser ejemplo de vida.

A mi pareja, familiares, amigos y profesores quienes participaron en mi formación como profesional, quienes dedicaron parte de su tiempo para aportar conocimiento.

Oscar David Gallo Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos los recursos, herramientas y préstamo de instalaciones en el desarrollo de este proyecto investigativo. Gracias por contribuir en nuestra formación integral como Ingenieros Mecánicos.

A nuestro director de proyecto PhD William Pinto quien con su orientación, dedicación y confianza alcanzamos los resultados buscados desde el inicio. Al Profesor e Ingeniero Oscar Bohórquez por guiarnos con sus conocimientos en el proceso del proyecto.

A nuestras familias, compañeros de carrera y todas las personas que hicieron posible de una u otra manera el desarrollo de la tesis.

A mi compañera de proyecto Leidy Viviana por el apoyo y dedicación para llevar a cabo la finalización de esta etapa profesional.

A mi compañero Oscar David por su dedicación, sin su apoyo no hubiese sido posible este logro.

Leidy Viviana Rodríguez Arenas

Oscar David Gallo Martínez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. MARCO REFERENCIA	17
2.1 Antecedentes Internacionales	17
2.1.1 Fabricación Y Caracterización De Filamentos Para Impresora 3d A Partir De Materiales Reciclados	17
2.1.2 Caracterización Mecánica De Piezas De Pla Fabricadas Mediante Impresión 3d. El Objetivo De Este Proyecto Fue El Modelado Y Construcción De Probetas Formadas	18
2.1.3 Caracterización De Materiales Termoplásticos De Abs Y Pla Semirrígido Impresos En 3d Con Cinco Mallados Internos Diferentes	19
2.1.4 Caracterización Mecánica Del Material Compuesto De Matriz Poliéster Con Fibra De Coco Para La Determinación De Propiedades Mecánicas En Aplicaciones Industriales	20
2.2 ANTECEDENTES NACIONALES	21
2.2.1 Caracterización De Las Propiedades Mecánicas A Tensión Del Ácido Poliláctico Pla Procesado Por Manufactura Aditiva Fff Considerando La Degradación Por Humedad Y Temperatura	21
2.3 ANTECEDENTES REGIONALES	22
2.3.1 Caracterización Y Predicción De Las Propiedades A Tensión De Componentes Impresos En 3d Con Refuerzo De Fibras	22
3. REFERENTES TEÓRICOS	24
3.1 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)	24
3.1.1 Propiedades Físicas Y Mecánicas Del Pla	25
3.2 CELULOSA	26

3.2.1 Propiedades Físicas	27
3.3 LIGNINA	28
3.3.1 La Lignina	28
4. MÉTODO Y MATERIALES	29
4.1 MATERIALES Y EQUIPOS	29
4.1.1 Ácido Poliláctico (Pla)	29
4.1.2 Lignina	30
4.1.3 Celulosa	31
4.1.4 Máquina De Ensayos Mecánicos	32
4.1.5 Molino De Cuchillas	33
4.1.6 Balanza Analítica	34
4.2 PROBETAS DE ENSAYO	35
4.3 ENSAYOS MECÁNICOS	40
4.3.1 Ensayo Para Determinar Las Propiedades De Tensión En Plásticos	40
5. RESULTADOS	43
6. CONCLUSIONES	58
7. RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades Del Pla	26
Tabla 2. Concentraciones Del Material En Las Probetas	36
Tabla 3. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla Puro	44
Tabla 4. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla-Lignina 1%	45
Tabla 5. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla-Lignina 3%	46
Tabla 6. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla-Lignina 5%	47
Tabla 7. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas Pla-Celulosa 1%	48
Tabla 8. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla-Celulosa 3%	49
Tabla 9. Resultados Del Ensayo De Tensión En Probetas De Pla-Celulosa 5%	50
Tabla 10. Valores Promedio Del Ensayo De Tensión Del Pla Puro	51
Tabla 11. Valores Promedio Del Ensayo De Tensión Del Pla-Lignina	53
Tabla 12. Valores Promedio Del Ensayo De Tensión Del Pla-Celulosa	55
Tabla 13. Resultados Promedio Del Pla, Lignina Y Celulosa	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pla En Pellets	29
Figura 2. Ficha Técnica Pla	30
Figura 3. Lignina En Disecador	31
Figura 4. Celulosa En Polvo	32
Figura 5. Mts Bionix	33
Figura 6. Molino De Cuchillas Thomas-Wiley	34
Figura 7. Balanza Analítica Ohaus	35
Figura 8. Geometría De Probeta De Ensayo Según Norma Astm D638-14 Tipo V, En Milímetros.	36
Figura 9. Pla Puro	37
Figura 10. Lignina 1%	38
Figura 11. Lignina 3%	38
Figura 12. Lignina 5%	38
Figura 13. Celulosa 1%	39
Figura 14. Celulosa 3%	39
Figura 15. Celulosa 5%	40

LISTA DE GRAFICOS

	Pág.
Grafico 1. Curva Esfuerzo-Deformación Pla Puro	44
Grafico 2. Curva Esfuerzo-Deformación Pla-Lignina 1%	45
Grafico 3. Curva Esfuerzo-Deformación Pla-Lignina 3%	46
Grafico 4. Curva Esfuerzo-Deformación Pla-Lignina 5%	47
Grafico 5. Curva Esfuerzo- Deformación Pla-Celulosa 1%	48
Grafico 6. Curva Esfuerzo-Deformación Pla-Celulosa 3%	49
Grafico 7. Curva Esfuerzo Vs Deformación Pla-Celulosa 5%	50
Grafico 8. Módulo De Young Promedio (Pla Puro Y Pla-Lignina 1,3,5%)	51
Grafico 9. Esfuerzo Máximo Promedio (Pla Puro Y Pla-Lignina 1,3,5%)	52
Grafico 10. Porcentaje De Deformación Promedio (Pla Puro Y Pla-Lignina 1,3,5%)	52
Grafico 11. Módulo De Young Promedio (Pla Puro Y Pla-Celulosa 1,3,5%)	53
Grafico 12. Esfuerzo Máximo Promedio (Pla Puro Y Pla-Celulosa 1,3,5%)	54
Grafico 13. Porcentaje De Deformación Promedio (Pla Puro Y Pla-Celulosa 1,3,5%)	54
Grafico 14. Resultado Módulo De Young Promedio Pla, Lignina Y Celulosa	55
Grafico 15. Resultado Esfuerzo Máximo Promedio Pla, Lignina Y Celulosa	56
Grafico 16. Resultado Deformación Promedio Pla, Lignina Y Celulosa	56

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN Y COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ÁCIDO POLILÁCTICO PURO Y CON MODIFICACIONES DE CELULOSA Y LIGNINA PARA IMPRESIONES 3D*

AUTOR: LEIDY VIVIANA RODRÍGUEZ ARENAS, OSCAR DAVID GALLO MARTÍNEZ **

PALABRAS CLAVE: PLÁSTICO, BIODEGRADABLE, LIGNINA, CELULOSA, ÁCIDO POLILÁCTICO.

DESCRIPCION

Los plásticos derivados del petróleo son el principal factor contaminante presente hoy día en el medio ambiente y generar estudios sobre nuevos materiales que sean biodegradables son soluciones para este tipo de problemas. La gran mayoría de ellos son componentes extraídos de plantas y materias primas naturales; Dentro de los más comunes se encuentran: la celulosa, la lignina y el ácido Poliláctico (PLA), cuyos elementos ofrecen biodegradabilidad, buenas propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y rigidez, también biocompatibilidad y su facilidad de obtención.

Se buscará combinar sus matrices estructurales para que sus propiedades mecánicas mejoren con la finalidad de poder implementar este tipo de materiales en la impresión 3D mediante el modelado por deposición fundida (MDF), esta técnica de fabricación usa programas CAD/CAM.

En el desarrollo de este proyecto de investigación se realizaron cuerpos de prueba por moldeo abierto, los cuales contenían concentraciones de PLA en mayor proporción con combinaciones de lignina y celulosa de 1, 3 y 5% basado en el peso total de la mezcla, luego se realizaron pruebas de tracción de acuerdo con la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos) para determinar propiedades mecánicas. De los resultados obtenidos se concluyó que el PLA con modificaciones de celulosa 1% es recomendado en aplicaciones similares al PLA, que requiera altas deformaciones, por otra parte, se determinó que, a mayor concentración de lignina y celulosa menor será el esfuerzo último y de igual manera el módulo de Young se verá afectado.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto Hernández, Doctor en ingeniería Mecánica.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION AND COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID AND MODIFICATIONS OF CELLULOSE AND LIGNIN FOR 3D PRINTS*

AUTHOR: LEIDY VIVIANA RODRÍGUEZ ARENAS, OSCAR DAVID GALLO MARTÍNEZ**

KEY WORDS: PLASTICS, BIODEGRADABLE, LIGNIN, CELLULOSE, POLYLACTIC ACID.

DESCRIPTION

Petroleum-derived plastics are the principal polluting agent today in environment. Do studies about new biodegradable materials are solutions for this kind the problems, the most of these are components extracted from plants and natural raw materials; the most popular is cellulose, lignin and the polylactic acid (PLA), all them give degradability, good mechanical properties like tensile strength and stiffness, also biocompatibility and easy to obtain.

It will be looked for combine their structural matrices makes these materials increase the mechanical properties and then can implement this kind materials in 3D printing through Fused Deposition Modeling (FDM), this manufacturing technique uses CAD/CAM programs.

In the development of this investigation project were made test bodies by open molding, this contained concentrations of PLA in greater proportion with combinations of lignin and cellulose 1,3 and 5% in total mix weigh, after that were made traction tests according to standard ASTM D638-14 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) to determine mechanical properties. From results obtained it was concluded that PLA with cellulose modifications of 1% is recommended in applications similar to PLA with high deformations. On the other hand, it was determined that to higher lignin and cellulose concentration less will be their last effort and of same away Young's modulus will be affected.

* Degree work

** Faculty of physical-mechanical Engineers. School of mechanical engineering. Director: William Pinto Hernández, Doctor in mechanical engineering.

INTRODUCCIÓN

Hoy día, el planeta está pasando por una serie de cambios climáticos que generan problemas irreversibles con hechos que afectan de forma negativa el medio ambiente.

El plástico y sus derivados son uno de los principales agentes que producen la contaminación en el planeta; un estudio que pronostica el uso de plástico dicho por ONU¹ muestra que cada minuto las personas compran un millón de botellas de plástico y que al transcurrir el año se usan 500.000 millones de bolsas, de las cuales, alrededor de 8 millones de toneladas acaban en los océanos, generando una amenaza a la vida marina. Dado lo anterior, surgió en respuesta a estos problemas a optar por la creación de plásticos biodegradables que se obtienen a partir de materiales de origen vegetal.

Una investigación hecha por científicos de la Universidad Autónoma de México (UNAM)² han desarrollado una clase de plástico biodegradable fabricado con residuos agroindustriales y ácidos de bacterias modificadas, los cuales podrían sustituir los plásticos regulares derivados del petróleo. Dichos biopolímeros se degradarán biológicamente por pequeños microorganismos minimizando el impacto ambiental.

Los bioplásticos principalmente se producen de la celulosa y hemicelulosa. Los azúcares extraídos de estos procesos son usados para obtener ácidos orgánicos,

¹ ONU (Organización de Naciones Unidas). Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso. [Sitio Web]. 15 de Marzo 2019. [consulta: 1 de Noviembre 2021]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>

² NATGEO (National Geographic). Científicos mexicanos desarrollan plásticos biodegradables.[Sitio Web]. 9 de Agosto 2018. [consulta: 1 de Noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.ngenespanol.com/ciencia/desarrollo-de-plasticos-biodegradables-bioplasticos/>

uno de ellos es el láctico, proveniente de la leche y otros generados por diferentes tipos de compuestos³.

Por otra parte, la celulosa es considerada el compuesto orgánico natural más abundante, tan solo la madera posee del 40 al 60 % de celulosa en su estructura, siendo esta el componente fundamental de la pared celular vegetal. De igual forma, la celulosa se encuentra generalmente combinada con sustancias como la lignina, hemicelulosas, pectinas y ácidos grasos⁴. A su vez, la celulosa posee una estructura semicristalina la cual puede cambiar según el tipo del cuerpo vegetal. Se obtiene a partir de estos diferentes tipos de conformaciones morfológicas y estructurales, por ende, sus propiedades físicas y mecánicas sean diferentes; una de las propiedades mecánicas más relevantes desde el punto de vista estructural, es la resistencia a la tracción⁵.

La lignina después de la celulosa es la segunda más abundante en la naturaleza, está conforma entre 15-25 % de la madera y se crea a partir de la fotosíntesis haciéndola como uno de los recursos renovables más asequibles y potenciales para uso industrial; Se estima en un intervalo de producción entre 500 y 3600 millones de toneladas por año en el mundo⁶, el cual es un subproducto desechado durante el proceso de obtención de la celulosa y tan solo una pequeña parte de este es usada en las grandes papeleras del mundo como combustible.

Como tercer compuesto tenemos el PLA o ácido Poliláctico, es también un biopolímero precursor del ácido láctico, debido a su biocompatibilidad, propiedades

³ Ibid.p. 2.

⁴ SANZ TEJEDOR, Asensión. Medios de comunicación en internet: Química Orgánica Industrial. *Tecnología de la celulosa. La industria papelera* [en línea].2019 [Consultado 20 de Octubre 2021]. <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>

⁵ GAÑAN, Piedad, *et al.* Celulosa: Un Polímero de Siempre con Mucho Futuro. *Revista Colombiana de Materiales*. 2017, Edición Especial, pp. 01-04. ISS 2256-1013

⁶ CHÁVEZ-SIFONES, Marvin y DOMINE, Marcelo. Lignina, Estructura y Aplicaciones: Métodos de Despolimerización Para la Obtención de Derivados Aromáticos de Interés Industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. Vol.4, Núm. 4, octubre-diciembre, 2013, pp. 15-46. E-ISSN: 0718-8706

de barrera y biodegradabilidad se le ha encontrado muchas aplicaciones como farmacéuticas, alimenticias, textil, química entre otras. Tiene unas propiedades mecánicas superiores en comparación a otros polímeros derivados del petróleo, haciendo al PLA competitivo en cuanto a temas de rigidez. Un ejemplo claro estudiado en una investigación por la Univalle arrojó que el PLA tiene una fuerza de tensión entre 40 – 60 Mpa y el polipropileno (PP) entre 33 – 37,9 Mpa siendo visiblemente el PLA más fuerte⁷.

Por otro lado, en la industria el uso del plástico se ha vuelto frecuente, ya que en la mayoría se tiene como materia prima; así lo es el caso de la impresión 3D específicamente en el modelado por deposición fundida (MDF). En esta industria es muy común el uso de polímeros como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), poliestireno de impacto (HIPS), entre otros.

Se ha buscado la manera de sustituirlos con otros materiales que no generen la misma contaminación, por lo anterior esta investigación se centra en el estudio de las propiedades mecánicas de estos tres materiales (PLA, LIGNINA Y CELULOSA) con diferentes modificaciones en su contenido teniendo como base el PLA en mayor proporción. Se realizaron cuerpos de prueba con concentraciones de 1, 3 y 5% en peso de lignina y celulosa sobre el PLA. Se aplicaron ensayos de tensión bajo la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos), además se desarrolló un análisis en las propiedades físicas. Por último, con los resultados obtenidos se busca determinar si estos materiales compuestos son aplicables en la impresión 3D.

⁷ SERNA, Lilibiana; RODRÍGUEZ DE S, Aída y ALBAN, Fred. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*. Vol. 5 Núm. 1, Octubre, 2003, pp. 01-11. Disponible en: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y comparar las propiedades mecánicas del Ácido Poliláctico puro y con modificaciones de celulosa y lignina para uso en impresiones 3D, contribuyendo en la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS, la cual aporta en la formación integral del ingeniero mecánico promoviendo la investigación y conservación de los recursos naturales para fomentar e implementar el desarrollo de nuevas tecnologías.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar la metodología para la elaboración de los cuerpos de prueba del ácido Poliláctico puro, con modificaciones de Celulosa y Lignina, teniendo en cuenta la norma, propiedades mecánicas y concentración de los materiales compuestos del 1%, 3% y 5% en peso.
- Caracterizar el comportamiento mecánico del ácido Poliláctico puro y con modificaciones de Celulosa y lignina, utilizando la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos).
- Evaluar la influencia de las concentraciones de la celulosa y lignina en las propiedades mecánicas del Ácido Poliláctico

2. MARCO REFERENCIA

2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

2.1.1 Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados. El objetivo de este proyecto fue fabricar y caracterizar fibras a partir de materiales propios usados en la impresión 3D como PLA o ABS con otros polímeros, residuos de PET, residuos de vidrio y fibras naturales como viruta de plátano, ese proceso se hizo mediante ensayos mecánicos que permitieran hacer la valoración y el análisis adecuado.

En el desarrollo del trabajo se hizo un estudio de los materiales reciclados. Por otra parte, para la formación de los filamentos se dio el uso de una máquina trituradora y una extrusora de plásticos para la realización de las probetas con las que se realizaron pruebas mecánicas como tracción y flexión también diseñadas a partir de modelos CAD, el modelo comparativo fueron impresiones con filamentos comerciales en la industria.

Como conclusión y resultados se obtuvo que al comparar las probetas que se fabricaron con elementos reciclados como PLA, botellas de PET y otros polímeros basados en el proyecto con las elaboradas comercialmente, estas últimas obtuvieron mejores características mecánicas. También cuando elaboraron las pruebas, tomaron estructuras básicas en el relleno de las probetas como lo fueron Honey comb y rectangulares para comprobar como afectaba la disposición del filamento en las propiedades mecánicas de la probeta, llegando a la conclusión que las probetas tipo Honey comb soportaban más antes de producirse el fallo, debido a que este tipo de relleno estaba mejor distribuido en el interior respecto a las demás probetas haciendo que el filamento abarque más superficie y haga una mejor distribución de cargas. Para el ensayo de tracción se usó el relleno tipo rectangular descartando el tipo Honey comb debido a las condiciones dimensionales, llegando

a la conclusión de que las probetas fabricadas con material reciclado eran más frágiles. Además, cabe resaltar que dicho proyecto tuvo problemas técnicos a la hora de realizar las probetas en la impresora 3D ya que esta sufrió daños y solo realizaron pruebas para filamentos hechos a partir de PLA⁸.

2.1.2 Caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3D. El objetivo de este proyecto fue el modelado y construcción de probetas formadas de PLA con el propósito de conocer el comportamiento estructural de una pieza manufacturada en impresión 3D, dicho propósito se obtuvo mediante ensayos de prueba de tipo mecánico.

En el desarrollo de los ensayos se analizaron propiedades mecánicas como la compresión, flexión y tensión con normas ASTM D695-02a, D790-02, D638-02a respectivamente. A las probetas se realizaron configuraciones de tipo angular y configuraciones en su relleno para hallar propiedades como el módulo de elasticidad, esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia. Al terminar las pruebas mecánicas se realizó una demostración con una interferometría (tipo de prueba) con ayuda del programa ARAMIS, el cual muestra la deformación de las probetas a tensión. También se le hicieron pruebas de recubrimiento foto elástico para hallar los esfuerzos de la probeta.

Se concluyó que las probetas sometidas a tensión tuvieron una deformación de 15% lo que se consideraron un plástico, de igual forma un material semirrígido. En el ensayo de compresión se encontró que el ángulo con el cual fueron creadas las probetas no afectó sus propiedades mecánicas, obteniendo como resultado un material adecuado para su uso en fuerzas de compresión, con la característica que se deforma, pero no se rompe con un esfuerzo máximo de 75 Mpa. En la prueba de

⁸ ARTEAGA MEDINA, Laura. Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3d a partir de materiales reciclados. Trabajo de grado: Universidad de la Laguna. Santa Cruz de Tenerife, España. 2015. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <http://docplayer.es/10086498-Trabajo-de-fin-de-grado.html>

flexión con ángulos de 45 y 50° se hallaron esfuerzos máximos y mayores desplazamientos con la recomendación para estos ángulos ser usados en piezas sometidas a flexión aun teniendo deformaciones muy grandes módulos de elasticidad muy pequeños⁹.

2.1.3 Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semirrígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. El objetivo de este proyecto fue caracterizar materiales termoplásticos de ABS y PLA semirrígidos impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes, se obtuvieron las probetas de ABS y PLA por medio de impresión 3D aplicando el método de deposición de material fundido. En los mallados internos se emplearon figuras geométricas como el triángulo, cuadrado, pentágono, círculos concéntricos y tiras distribuidas de forma diagonal.

Se realizaron probetas sólidas y semirrígidas de ABS y PLA en AutoCAD e Inventor, aplicando las normas ASTM D638 – 14 y Norma ASTM D790 – 10 para pruebas de tracción y flexión, respectivamente, donde se exportaron los archivos digitales CAD a formato STL, luego se calibró la impresora en 3D y así se pudo ejecutar la configuración de las probetas para imprimirlas, una vez obtenidos las muestras se realizaron los ensayos de tracción y flexión. Se tabularon y analizaron los resultados adquiridos de los ensayos. Finalmente se presentaron los resultados y los valores de resistencia de las composiciones interna de materiales más adecuada para fuerzas de tracción y flexión.

Con los resultados obtenidos se concluyó que, para el ABS, la configuración más adecuada para tracción fue el mallado cuadrado, con resistencia a la fluencia de 12,6% menor que la probeta sólida y un 9,6% más liviana, en cambio la prueba de

⁹ CORTÉS CEDILLO, Arturo Raúl. caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3d. Trabajo de grado: Instituto politécnico nacional. México D.F. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/23751>

flexión la mejor configuración resultó ser el mallado circular, con el 6,3% de resistencia a la flexión menor y un 11,6% más liviana con respecto a la probeta sólida. Por otra parte, el PLA para la prueba de tracción y flexión la mejor configuración fue el mallada diagonal, que tiene la distribución diagonal en forma de fibras del mismo material, con un 17,6% y 6,1% menor en el valor de la resistencia a la fluencia y a la resistencia a la flexión, respectivamente, con una disminución en el peso del 9,6% y 2,3%, esta variación en el peso en el mallado diagonal se da porque las probetas tienen diferente forma y tamaño¹⁰.

2.1.4 Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales. El objetivo de este proyecto fue determinar las propiedades mecánicas de un material compuesto de resina poliéster reforzado con fibra de coco, con diferentes configuraciones, fracciones volumétricas y estratificación, con el fin de establecer la combinación idónea que brinde las mejores propiedades mecánicas del material compuesto para la aplicación más indicada en la industria. Se desarrollaron ensayos de flexión, tracción e impacto bajo normas ASTM3039, ASTM-7264 y ASTM-5628, respectivamente.

Las probetas fueron realizadas en una matriz de acero soldado ASTM A36, con un acabado superficial adecuado para el desarrollo de las probetas a ensayarse, las resinas fueron preparadas en conjunto con el MECK al 2% de su volumen, y la fibra se la extrajo en forma manual de cocos secos aplicando un tratamiento de limpieza con Hidróxido de Sodio. Se tabularon los datos para proceder a la selección de la combinación de las probetas.

Al obtener los resultados se concluyó que la mejor combinación de las probetas fue la de fibra corta al 30% en fracción volumétrica, en orientación al azar y

¹⁰ MOLINA OSEJOS, Jaime Vinicio. Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos En 3D con cinco mallados internos diferentes. Trabajo de grado: Escuela politécnica nacional. Quito, Ecuador. 2016. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>

estratificación manual, presentando buenas propiedades mecánicas, una absorción de energía aceptable en los ensayos y buena distribución de esfuerzos en todo el material, además las aplicaciones industriales encontradas en el material se las vio en el ámbito de la industria de la construcción, la industria del mueble y la industria automotriz¹¹.

2.2 ANTECEDENTES NACIONALES

2.2.1 Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión del ácido Poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando la degradación por humedad y temperatura. El objetivo de este proyecto fue caracterizar las propiedades mecánicas a tensión de polímero ácido Poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando su degradación por humedad y temperatura utilizando la norma ASTM 638D (Método de prueba estándar para propiedades de tracción de los plásticos).

En el desarrollo se estableció el diseño de experimentos a partir de las variables de estudio donde se pudo demostrar con un número adecuado de probetas, los efectos que tienen diferentes factores (de proceso y medioambientales) sobre las propiedades mecánicas del PLA, luego se fabricaron las probetas por manufactura aditiva FFF de conformidad a la norma ASTM 638D y así realizar las pruebas de degradación por temperatura y humedad y los ensayos de tensión a las probetas para determinar las propiedades mecánicas a tensión, por último se hizo un análisis estadístico para determinar el efecto de los factores estudiados en las propiedades mecánicas a tensión.

¹¹ MAZÓN ORTIZ, Gabriel Eduardo. Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales. Trabajo de grado: Universidad técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 2017. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25131>

Se concluyo que el PLA como los demás materiales plásticos, presenta curvas características de esfuerzo VS, se observó que el material presento un comportamiento elástico estable hasta alcanzar su esfuerzo máximo donde se ve influenciada por el ángulo de trama para la impresión de las probetas, presentando valores mayores en probetas impresas con un ángulo de 0-90°, debido a que la carga aplicada para generar la falla se encuentra en la misma dirección de los filamentos.

El proyecto me aporta para el diseño factorial de experimentos que se emplearon en el proyecto, donde lograron una gran optimización de recursos, reduciendo factores como costos, tiempos de impresión, además los niveles empleados para cada uno de los factores fueron seleccionados de acuerdo con una investigación bibliográfica, que permitió obtener valores acordes para la investigación, ofreciendo cierta confiabilidad en los resultados¹².

2.3 ANTECEDENTES REGIONALES

2.3.1 Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3d con refuerzo de fibras. El objetivo de este proyecto fue caracterizar las propiedades elásticas tanto de las probetas hechas en solo plástico, como de las que están reforzadas con fibra, y predecir las propiedades elásticas usando el método analítico de la rigidez volumétrica promedio.

Para el desarrollo del proyecto las probetas fueron fabricadas variando la geometría del patrón de relleno y su densidad, la orientación de la fibra de las capas de refuerzo a 0°, 45° y 90°, además los ensayos de tracción se realizaron aplicando la

¹² ROA SIERRA, Jairo Andrés. Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión del ácido Poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando la degradación por humedad y temperatura. Trabajo de grado: Universidad Santo Tomas. Bogotá. 2017. Consultado 6 de octubre de 2018. Disponible en <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9324/RoaJairo2017.pdf?sequence=1>

norma ASTM D638. Además, se predijo un modelo donde pudiera estimar las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, y así establecer si pueden ser utilizadas como componentes funcionales de acuerdo las propiedades mecánicas requeridas.

Se concluyo que el uso de la tecnología aditiva para la fabricación de materiales compuestos admite reducir el número de procesos hasta obtener la pieza final, además las piezas tienen un buen acabado superficial, En los resultados el patrón de relleno triangular presenta la rigidez más alta, el módulo de elasticidad de las probetas con capas isótropas de fibra de vidrio aumenta un 85, 56 y 30% para las direcciones de 0, 45 y 90°, respectivamente. El aporte de este es proyecto es fomentar la investigación más profunda ya que es necesario tener conocimiento al caracterizar completamente el comportamiento mecánico de estas estructuras, en particular, ensayos de compresión, flexión y torsión¹³.

¹³ BELTRÁN GUARÍN, Sergio. Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3d con refuerzo de fibras. Trabajo de grado: Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander. 2017. Consultado 6 de octubre de 2018. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2017/169633.pdf>

3. REFERENTES TEÓRICOS

3.1 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

El ácido láctico, del cual se forma el PLA se obtiene por vía química o biotecnología. La producción química se basa en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico (HCN) para dar lactonitrilo, el cual puede ser hidrolizado a ácido láctico entre otros métodos para la obtención.

El ácido láctico usado en la polimerización para la producción de PLA debe tener una alta pureza. Existen varios métodos para la polimerización:

La primera se da por: “policondensación de ácido láctico, seguido por una despolimerización hacia el dímero diláctido, el cual puede polimerizarse abriendo el anillo, en polímeros de alto peso molecular”¹⁴.

En la segunda se da por: “el ácido láctico es poli condensado en presencia de un monómero bifuncional, por ejemplo, diol o diádico, produciendo un polímero telequérico, el cual puede unirse a otro para producir polímeros de alto peso molecular”¹⁵.

En la tercera se da por: “el ácido láctico es policondensado directamente en polímeros de alto peso molecular, manipulando el equilibrio entre: ácido láctico, agua y ácido Poliláctico en un solvente orgánico. Estas reacciones se producen por simple calentamiento o por la acción de catalizadores como alcóxidos metálicos y complejos quirales de aluminio metoxilado”¹⁶.

¹⁴ SERNA, Liliana; RODRÍGUEZ DE S, Aída y ALBAN, Fred. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*. Vol. 5 Núm. 1, Octubre, 2003, pp. 01-11. Disponible en: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301

¹⁵ Ibid., p. 20.

¹⁶ Ibid., p. 20.

3.1.1 Propiedades físicas y mecánicas del PLA. Las propiedades físicas y mecánicas dependen de la composición del polímero. “La cristalinidad puede ajustarse desde un valor de 0% a 40% en forma de homopolímeros lineales o ramificados, y como copolímeros al azar o de bloque. Una forma cristalina (en su mayor parte compuesta de forma L-láctido) y de alto peso molecular (> 100.000 Daltons) garantiza una reabsorción larga (aproximadamente de 1 a 2 años). Formulaciones diferentes y la adición de radicales en las cadenas, permiten controlar o modelar la velocidad de reabsorción. La tabla 1 muestra algunas propiedades del PLA de acuerdo a su composición. Utilizando 100% de L-PLA, resulta un material con alto punto de fusión y alta cristalinidad. Si se usa una mezcla D y L, se obtiene un polímero amorfo con una temperatura de transición vítrea (Tg) de 60°C. Con 90% D y 10% L, se obtiene un material copolimérico, el cual puede polimerizarse en forma orientada, con temperaturas por encima de su temperatura de transición vítrea. La temperatura de procesamiento está entre 60 y 125°C y depende de la proporción de D o L ácido láctico en el polímero. Sin embargo, el PLA puede ser plastificado con su monómero o alternativamente con ácido láctico oligomérico y esto permite disminuir Tg”¹⁷

¹⁷ Ibid., p. 21.

Tabla 1. Propiedades del PLA

Masa Molecular (Kda)	% Cristalinidad	Viscosidad h (dL/g)	Densidad r (g/cm ³)
L-P.L.A 50 a 756	15 a 74	0,61 a 8,2	1,25
D.L. P.L.A 21 a 550	0 (amorphe)	0,25 a 2,01	1,29
P.L.A.-P.G.A. 20 a 145	46 a 52	0,5 a 1,6	1,50 a 1,64

Fuente: SERNA, Liliana; RODRÍGUEZ DE S, Aída y ALBAN, Fred. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*. Vol. 5 Núm. 1, Octubre, 2003, pp. 01-11.

Disponible

en:

https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301

El PLA tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, con la excepción de la baja elongación. Otras limitaciones a comparación de otros plásticos, es la baja temperatura de distorsión (HDT); la barrera de agua y oxígeno del PLA es bastante buena, además se deja imprimir no se necesita algún tratamiento anterior a la impresión.

El PLA puede ser tan blando como el polietileno o tan duro como el acrílico, flexible como el elastómero o rígido como el poliestireno.

3.2 CELULOSA

La celulosa o fibra es el elemento constitutivo de la madera. Viendo la celulosa desde un punto de vista químico es un polímero natural formado por muchas unidades de glucosa. Los componentes o fibras se encuentran en la madera unidas entre sí por la lignina, compuesto químico que produce rigidez.

Para su fabricación, la celulosa se separa de la lignina mediante procesos químicos o mecánicos. Hay dos tipos de celulosa:

- Celulosa de fibra larga

- Celulosa de fibra corta

3.2.1 Propiedades físicas. Grado de polimerización de la celulosa: es el número de b – D (+) glucosas unitarias que están presentes en cada una. La fibra de celulosa consiste en una mezcla de cadenas de celulosas de tamaño diferente. Por lo que, al llamar grado de polimerización o masa molecular, estamos refiriéndonos al valor promedio. El grado de polimerización de la celulosa se afecta cuando a la misma se le hacen tratamientos químicos (pulpeo químico, blanqueamiento, procesos de delignificación) o separación mediante métodos químicos.

Solubilidad de la celulosa: la celulosa es la combinación macromolecular que no se disuelve en solventes usuales. “La disolución de la celulosa consiste en la ruptura de la estructura fibrilar lo que resulta una desintegración de las fibras y microfibrillas originando las cadenas de celulosa sin cambiar la longitud de la cadena”¹⁸

Existen dos métodos de disolución:

- Directa: la celulosa tiende a disolverse directamente con un solvente en específico.
- Indirecta: la celulosa se transforma a lo largo de reacciones de sustitución en derivados como acetatos, nitratos y otros. Estos son disueltos en solventes específicamente designados.

¹⁸ CARBALLO ABREU, Leila y ARTEAGA CRESPO, Yasiel Celulosa de madera fecha de consulta: 6 octubre 2021 disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos44/celulosa-madera/celulosa-madera.shtml>

3.3 LIGNINA

La lignina es uno de los biopolímeros que más abunda junto con la celulosa y la hemicelulosa en las plantas, estas conforman la pared celular en una disposición regulada a nivel nano-estructural, obteniendo así redes o conjuntos de lignina-hidratos de carbono. La composición de estos tres elementos varía según el tipo de planta.

La lignina está presente en todas las plantas vasculares que se forma mediante la fotosíntesis, se considera como un recurso renovable asequible y con mucho potencial para uso industrial.

3.3.1 La lignina. Fuente de materias primas renovables. Es una abundante fuente de materias primas renovables, teniendo futuras aplicaciones y sus perspectivas bastante promisorias. La industria papelera produce grandes cantidades por año. Siendo gran parte quemado directamente en las fábricas en una etapa de recuperación de energía.

La lignina puede tener aplicaciones directas, como las presentadas por los ligno-sulfonatos, compuestos no peligrosos que poseen aplicaciones como pesticidas, emulsificantes entre otras. Además, la lignina puede ser usada como copolímero para incorporarse en resinas tipo fenol-formaldehído, polímeros tipo poliolefinas-lignina etc. La lignina se puede modificar químicamente y formar parte en formulaciones para aumentar las propiedades de resinas y adhesivos¹⁹.

¹⁹ CHÁVEZ-SIFONES, Marvin y DOMINE, Marcelo. Lignina, Estructura y Aplicaciones: Métodos de Despolimerización Para la Obtención de Derivados Aromáticos de Interés Industrial. Avances en Ciencias e Ingeniería. Vol.4, Núm. 4, octubre-diciembre, 2013, pp. 15-46

4. MÉTODO Y MATERIALES

A continuación, se enuncian los métodos y los materiales usados en el proyecto para el análisis de las propiedades mecánicas del ácido Poliláctico puro y con modificaciones de celulosa y lignina para impresiones 3D.

4.1 MATERIALES Y EQUIPOS

4.1.1 Ácido Poliláctico (PLA): La presentación del PLA utilizado en el ensayo es en pellets, con una densidad aproximada de $1,28 \text{ g/cm}^3$ y un volumen de $0,0335 \text{ mm}^3$, la cantidad usada fue de $\frac{1}{2}$ kilogramo aproximadamente. A continuación, se indica la ficha técnica y forma del PLA:

Figura 1. PLA en Pellets



Fuente: Elaboración Propia

Figura 2. Ficha Técnica PLA



Propiedades	unidad	Valor
Densidad	gr/cm ³	1.28
Punto de Fusión	°C	120
Fusión Índice	g/10 min	7-10
Rendimiento de la Fuerza	mpa	20
Alargamiento a la Rotura	%	85
Resistencia a la Flexión	mpa	55
Módulo a la Flexión	mpa	2152
Resistencia al Impacto	Kj/m ²	5

Esta Resina BIOPLASTICA, cumple con las normas Internacionales ASTM D6400; ISO 17088 en USA. La Norma EN-13432 en Europa **Normas Tecnica Colombiana: NTC-5991, NTC-5992, NTC-5993.**

Fuente: Autor Grethsell empaque biodegradable S.A.S

4.1.2 Lignina: La lignina utilizada para las probetas en el ensayo de tensión proviene de la madera, su aspecto es café de partículas finas y soluble en el agua. Presenta una concentración de PH del 8,50%, solidos del 92,96%, y humedad del 7,02%. En la figura 3 se observa la lignina en un desecador de vidrio con tapa y gel de sílice para evitar la alta humedad de la lignina.

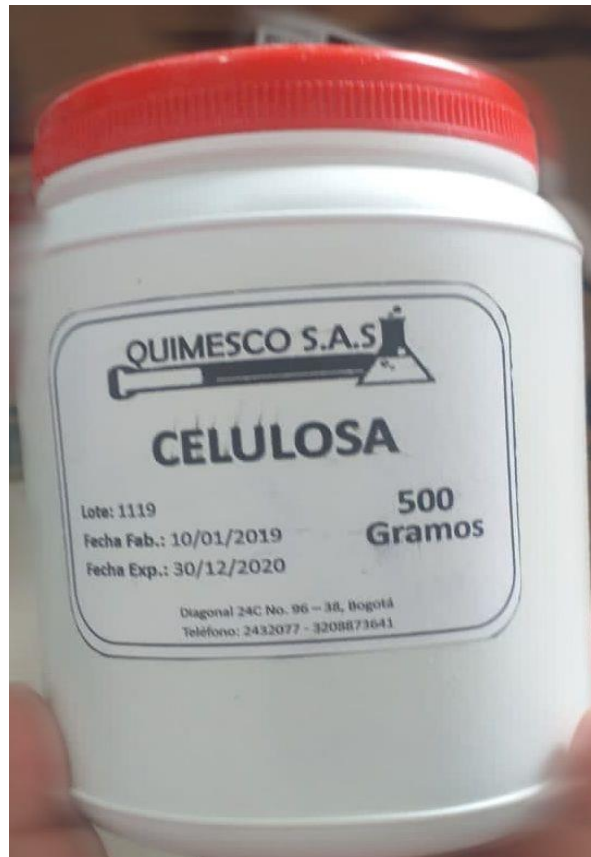
Figura 3. Lignina en desecador



Fuente: Elaboración Propia

4.1.3 Celulosa: La celulosa utilizada en los cuerpos de prueba para el ensayo de tensión contiene una pureza del 99,6%, una humedad del 6,10% y un PH del 7,2% a una temperatura de 25°C. Pesa aproximadamente 500 gr, es de coloración blanca y su presentación es en polvo fino. Como se observa en la figura 4 fue sellada en un recipiente para aislarla de la humedad del ambiente.

Figura 4. Celulosa en Polvo



Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Máquina de Ensayos mecánicos: En la ejecución del ensayo para determinar las propiedades de tensión en los polímeros, de acuerdo con la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos), se utilizó la maquina MTS BIONIX, con una capacidad de carga de 25KN, como se observa en la figura 5. La máquina fue facilitada por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 5. MTS Bionix



Fuente: Elaboración Propia

4.1.5 Molino de cuchillas: Para triturar los pellets de PLA se utilizó un molino de cuchillas THOMAS-WILEY de cuatro cuchillas giratorias, con una malla de triturado de grosor de 2 mm², esto con el fin de facilitar el tamaño de los compuestos y realizar una mezcla homogénea entre el PLA-Lignina y PLA-Celulosa.

Figura 6. Molino de cuchillas THOMAS-WILEY



Fuente: Elaboración Propia

4.1.6 Balanza Analítica: La medición de las concentraciones de lignina y celulosa se realizaron con una balanza analítica y de precisión OHAUS, con protector contracorriente de aire, paneles de vidrio sellados herméticamente, y puertas corredizas. Resolución de 0,1 mg y capacidad de carga máxima de 220 g, la balanza fue facilitada por el laboratorio de la escuela de Ingeniería Mecánica.

Figura 7. Balanza analítica OHAUS



Fuente: Elaboración Propia

4.2 PROBETAS DE ENSAYO

Se realizó una totalidad de 56 cuerpos de prueba como se observa en la tabla 2; Donde se elaboraron 8 probetas de PLA puro, 8 probetas con concentración del 1, 3 y 5% de lignina con PLA y 8 probetas de celulosa con PLA de iguales concentraciones. La base de la cantidad de material fue en peso total de la mezcla.

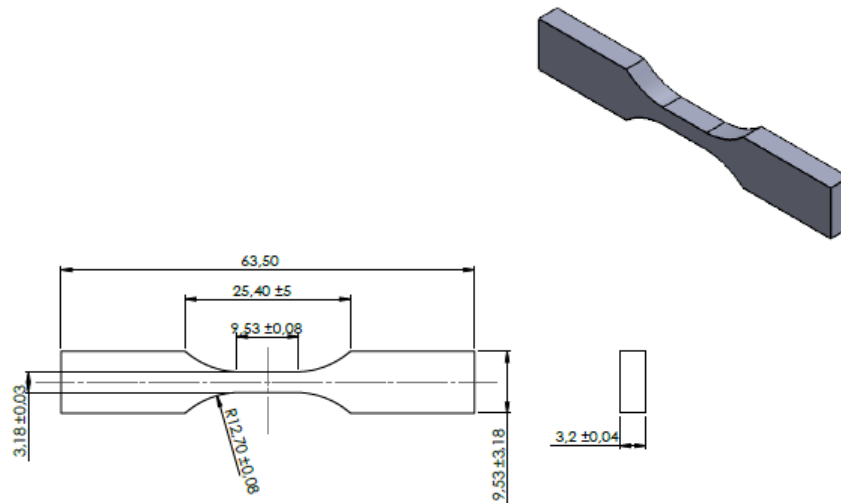
Tabla 2. Concentraciones del material en las probetas

Material	Porcentaje en peso del material en el PLA	Numero de probetas
PLA puro	100%	8
Lignina	1%	8
Lignina	3%	8
Lignina	5%	8
Celulosa	1%	8
Celulosa	3%	8
Celulosa	5%	8

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un molde abierto compuesto por laminas en acero HR con corte en laser para mayor precisión en sus dimensiones. La matriz la conforma 2 piezas, una como base y la otra principal con la geometría de la probeta para ensayos de tensión según la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos). La figura 8 muestran las dimensiones de la probeta.

Figura 8. Geometría de probeta de ensayo según norma ASTM D638-14 tipo V, en milímetros.



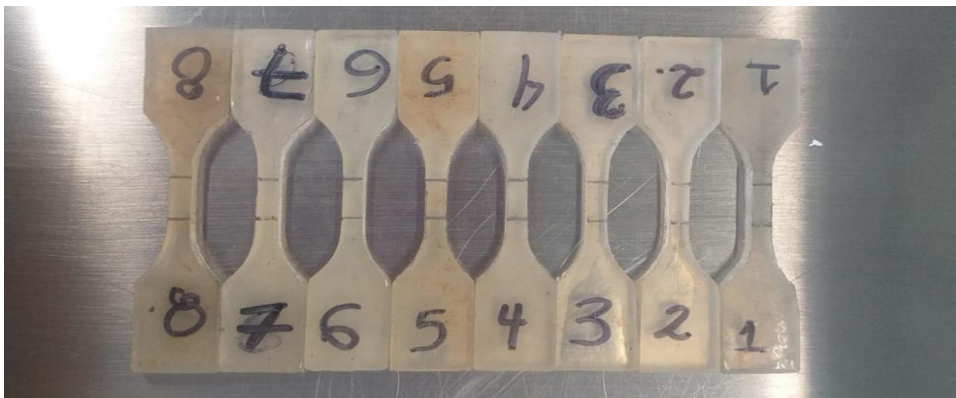
Fuente: Elaboración propia, con base en la norma ASTM D638-14

Se utilizó una estufa eléctrica con resistencia tubular de 6 pulgadas de superficie de contacto que genera una temperatura variable desde 0° hasta 200°C. La temperatura aproximada a la cual se realizó la fundición de los cuerpos de prueba fue 180°C por un tiempo estimado de 60 minutos, en la extracción de las probetas se aplicó silicón como desmoldante.

Para garantizar que el material compuesto quedara homogéneo, previamente se combinaron los componentes de PLA, lignina y celulosa por agitación. Después en el proceso de fundición se realizaron mezclas uniformes eliminando la presencia de burbujas de aire para evitar concentradores de esfuerzo.

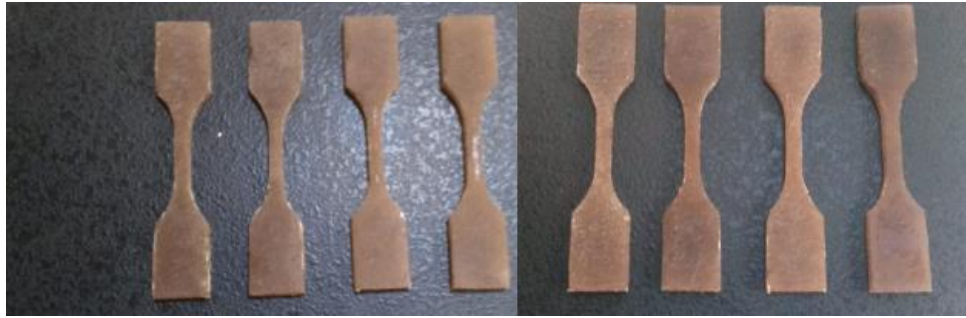
Para obtener las dimensiones deseadas se eliminaron las rebabas formadas posteriores a la fundición mediante procesos de pulido. En las siguientes figuras se pueden apreciar las probetas realizadas para el ensayo de tensión.

Figura 9. PLA puro



Fuente: Elaboración Propia

Figura 10. Lignina 1%



Fuente: Elaboración Propia

Figura 11. Lignina 3%



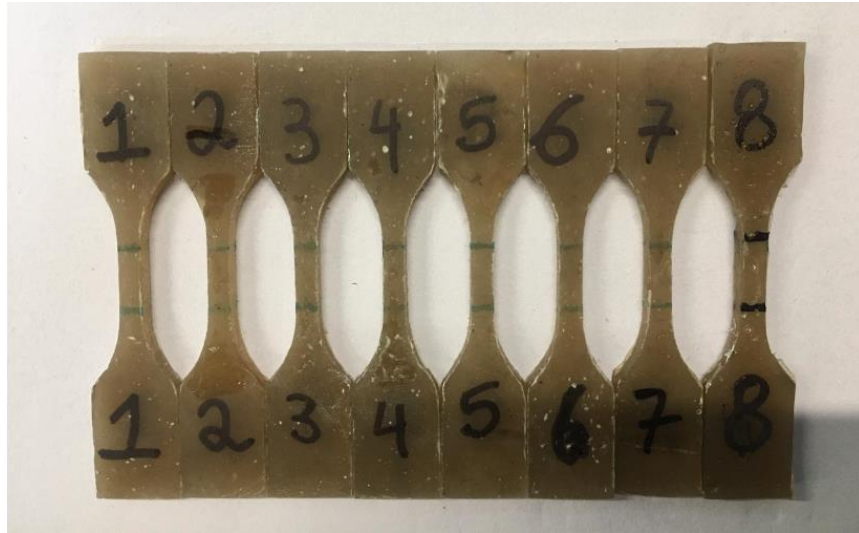
Fuente: Elaboración Propia

Figura 12. Lignina 5%



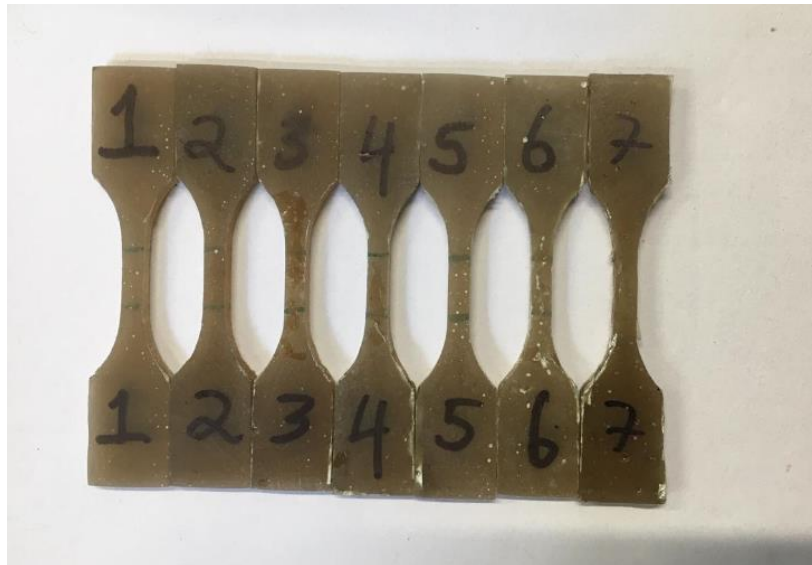
Fuente: Elaboración Propia

Figura 13. Celulosa 1%



Fuente: Elaboración Propia

Figura 14. Celulosa 3%



Fuente: Elaboración Propia

Figura 15. Celulosa 5%



Fuente: Elaboración Propia

4.3 ENSAYOS MECÁNICOS

4.3.1 Ensayo para determinar las propiedades de tensión en plásticos: Se aplicó el ensayo de tensión a las probetas de PLA puro, PLA con modificaciones del 1, 3 y 5% en peso de lignina y celulosa, teniendo en cuenta la norma ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos) a temperatura ambiente de 26°C, con una velocidad de desplazamiento para el espécimen tipo V de 1,0 mm/min, la cual produce ruptura en un periodo entre 0,5 y 5 minutos del tiempo del ensayo²⁰. De las pruebas desarrolladas a las 8 probetas por material se descartaron 3 de las más dispersas en sus resultados, dejando una totalidad de 5 por material.

El ensayo de tensión permite determinar el comportamiento a partir de las características principales que nos ofrece las dimensiones de la probeta en [mm], el

²⁰ ASTM INTERNATIONAL. D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2014.

desplazamiento axial de las mordazas en [mm], el tiempo en el que se produce la fractura en [s] y la fuerza axial en [N] con la cual se le aplico a cada una de ellas. Con estos datos podemos calcular valores como el esfuerzo de tracción y la deformación unitaria.

El esfuerzo de tracción (σ), es el cálculo de la fuerza axial aplicada a la probeta dividida por el área de la sección transversal mínima inicial, se expresa en fuerza por unidad de área [N/mm²] ó [MPa]. Se define mediante la ecuación 1:

$$\sigma = \frac{F}{A_s} \quad (1)$$

Donde,

σ = Esfuerzo de tracción

F = Fuerza axial aplicada al material

A_s = Área de la sección transversal del material

La deformación unitaria (ε) es la relación entre el alargamiento o el incremento de la longitud producida por la carga aplicada y la longitud de referencia del material de ensayo. Se expresa como una relación adimensional [mm/mm]. Se define mediante la ecuación 2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (2)$$

Siendo,

ε = Deformación unitaria

ΔL = Deformación final o alargamiento

L_f = Longitud final del material

L_o = Longitud de referencia del material

5. RESULTADOS

El análisis del ensayo se realizó a partir de la curva esfuerzo-deformación de los resultados obtenidos de las pruebas de tensión para determinar las propiedades mecánicas. Desde la gráfica 1 hasta la gráfica 7 indican las curvas de PLA puro, PLA-Lignina y PLA-Celulosa, donde se ilustran parámetros como esfuerzo, deformación unitaria y módulo de Young.

Este módulo de Young o módulo de elasticidad es la constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria en el comportamiento elástico lineal del material, es decir es la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación en la zona elástica como se describe en la ecuación 3.

$$\sigma = E\varepsilon(3)$$

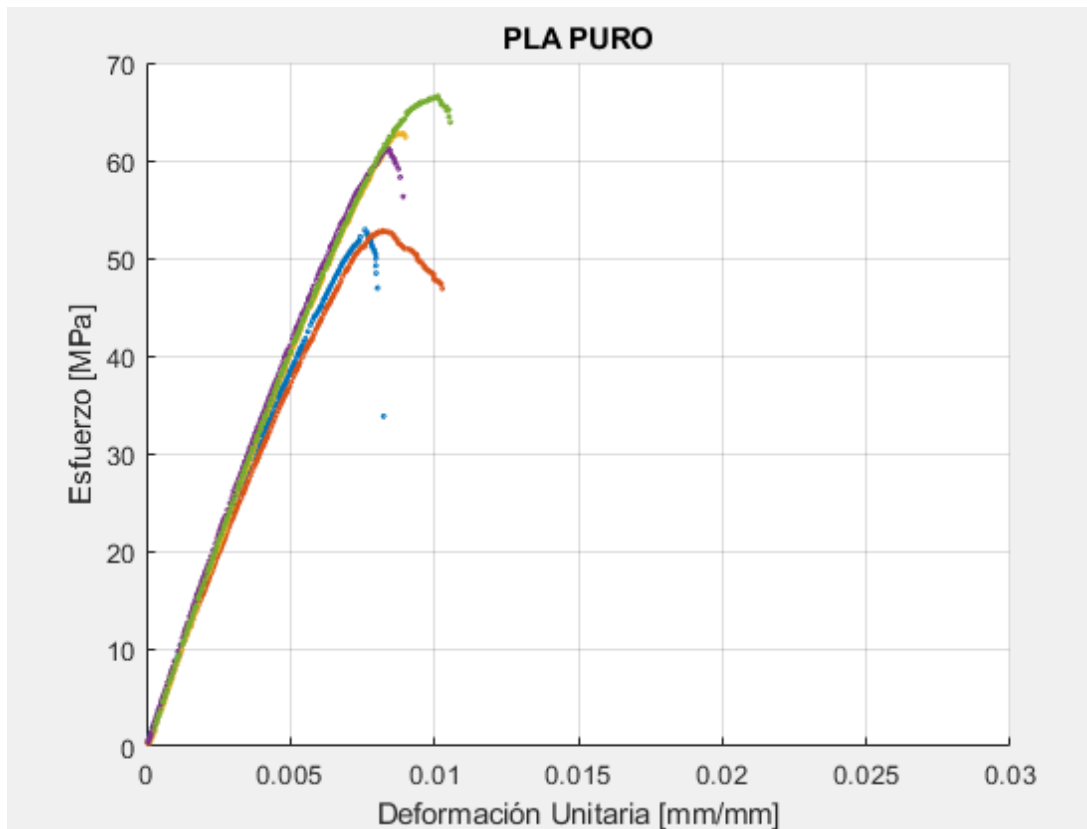
E = Módulo de Young o Módulo de elasticidad

ε = Deformación unitaria

σ = Esfuerzo de tracción

Los resultados del módulo de Young, esfuerzo máximo y porcentaje de deformación de las 5 probetas por tipo de muestra se presentan desde la Tabla 3 hasta la Tabla 9. El esfuerzo máximo del material es la carga máxima a la tracción que el material puede soportar sobre su área de la sección transversal y el valor de deformación en la fractura se expresa en porcentaje.

Grafico 1. Curva esfuerzo-deformación PLA Puro



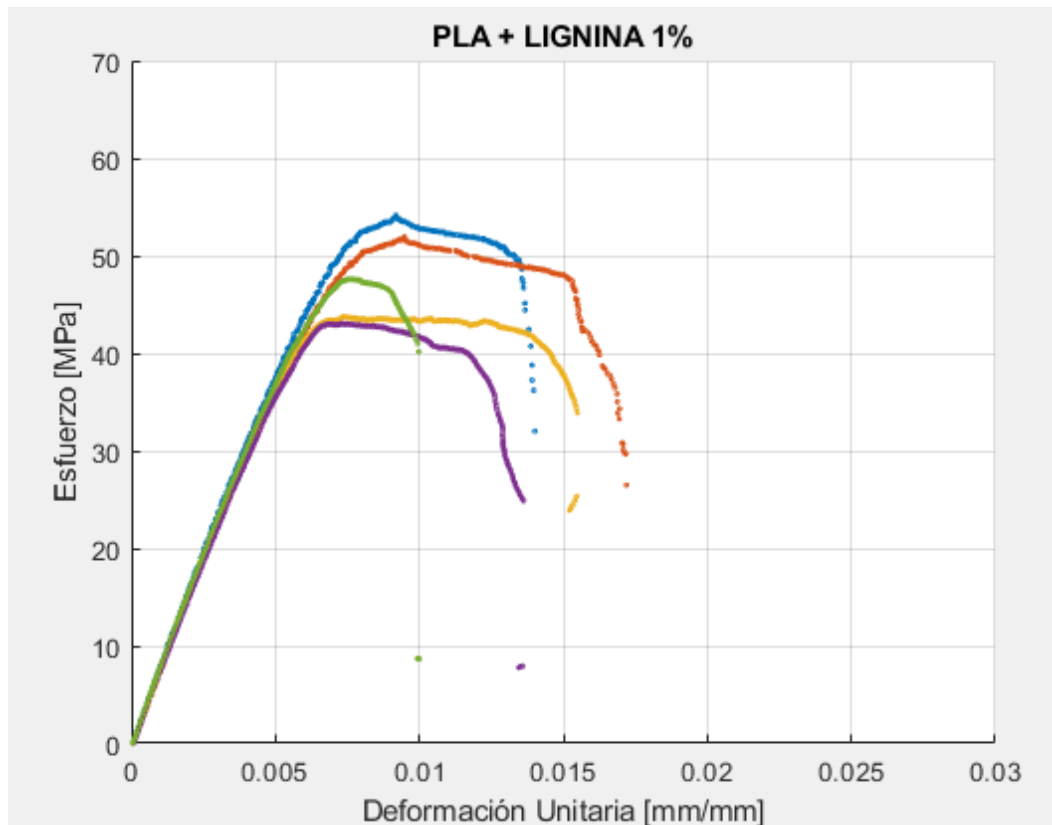
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA puro

N° prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	52.911	8.169	0.824
2	52.790	7.889	1.027
3	62.751	8.536	0.900
4	61.122	8.761	0.891
5	66.597	8.593	1.055

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 2. Curva esfuerzo-deformación PLA-Lignina 1%



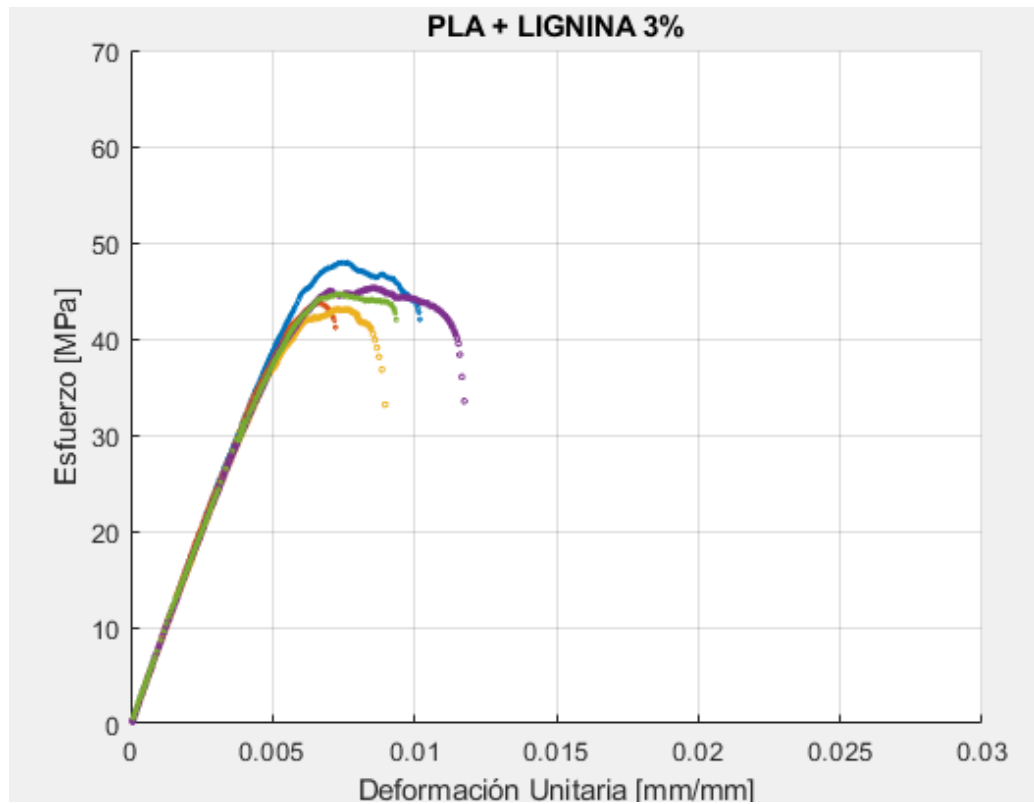
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA-Lignina 1%

Nº prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	54.165	8.037	1.401
2	51.938	7.749	1.718
3	43.760	7.804	1.549
4	43.034	7.667	1.362
5	47.601	7.889	1.000

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 3. Curva esfuerzo-deformación PLA-Lignina 3%



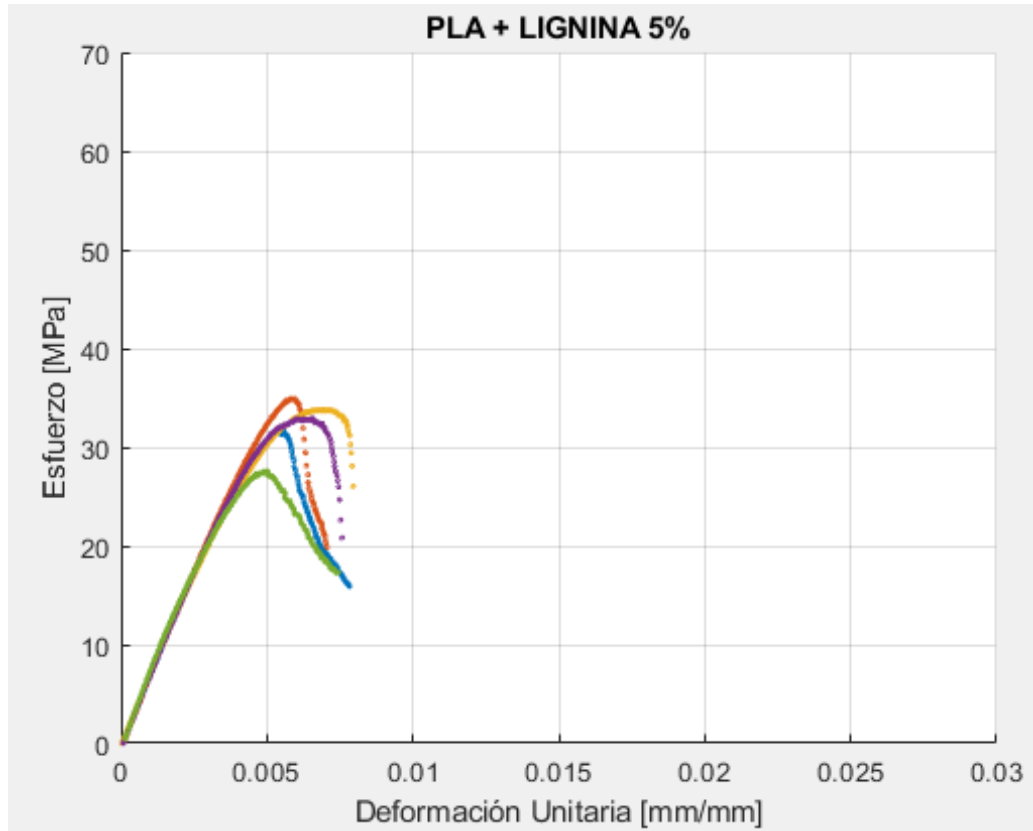
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA-Lignina 3%

N° prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	47.911	8.391	1.019
2	43.762	8.387	0.722
3	43.086	8.061	0.897
4	45.306	8.123	1.176
5	44.639	8.128	0.936

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 4. Curva esfuerzo-deformación PLA-Lignina 5%



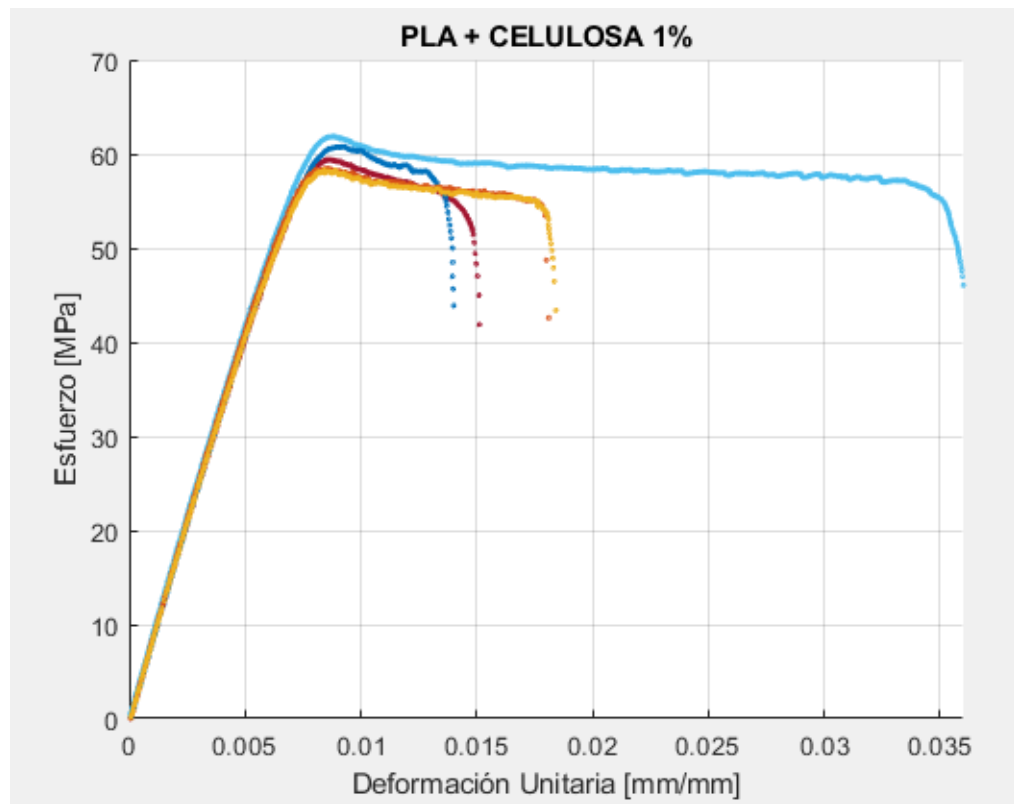
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA-Lignina 5%

N° prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	31.576	7.234	0.782
2	34.917	7.357	0.706
3	33.794	7.009	0.796
4	32.908	7.232	0.758
5	27.567	7.529	0.742

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 5. Curva esfuerzo- deformación PLA-Celulosa 1%



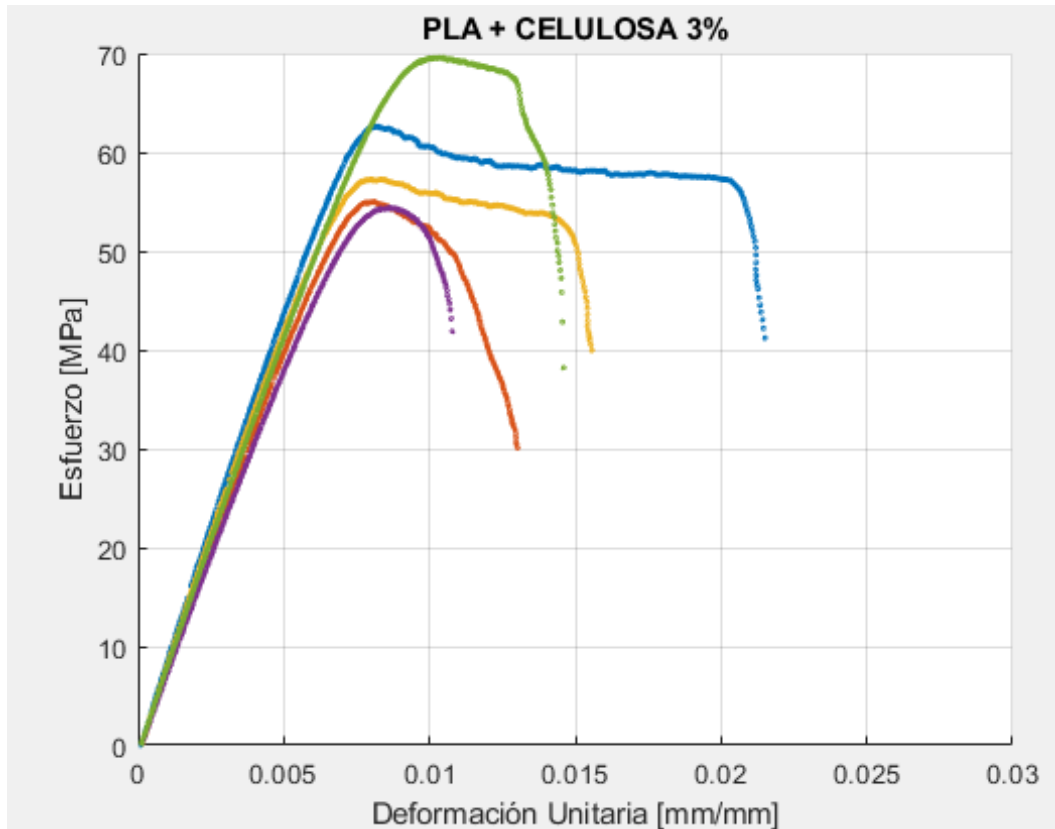
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Resultados del ensayo de tensión en probetas PLA-Celulosa 1%

N° prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	61.885	8.522	3.607
2	59.393	8.334	1.958
3	60.759	8.389	1.452
4	58.466	8.493	1.811
5	58.284	8.361	1.847

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 6. Curva esfuerzo-deformación PLA-Celulosa 3%



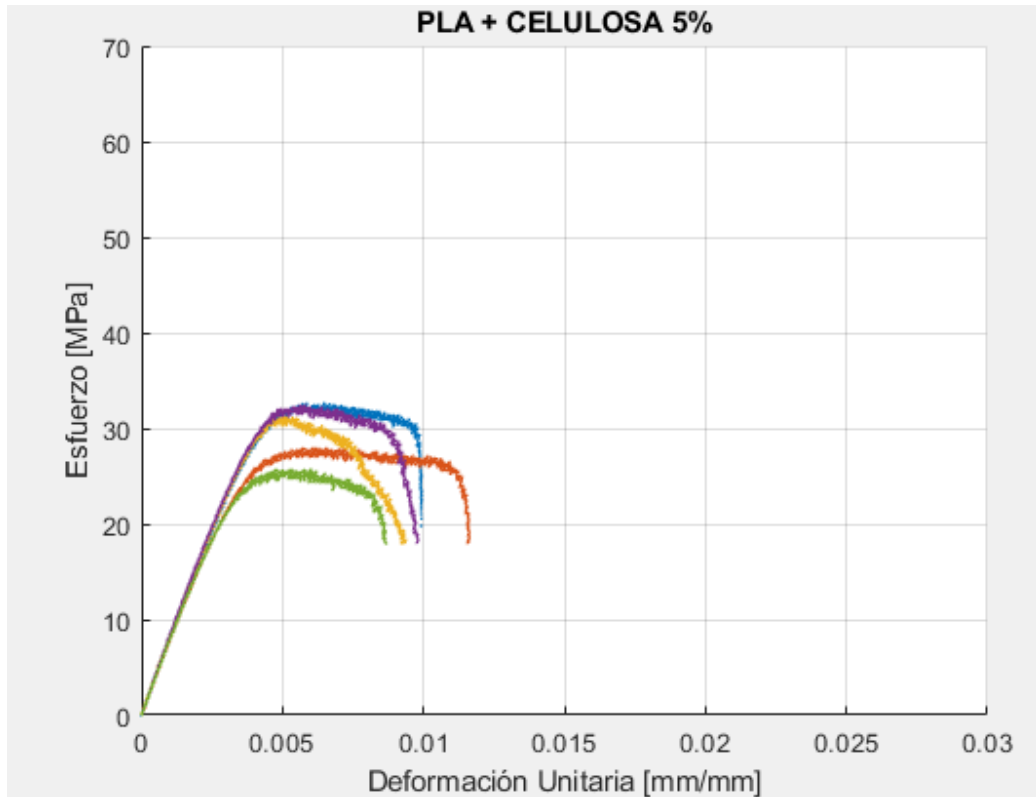
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA-Celulosa 3%

N° prueba	Esfuerzo máximo [MPa]	Modulo Young [Gpa]	% Deformación
1	62.591	9.071	2.151
2	54.991	8.277	1.302
3	57.260	8.756	1.557
4	54.393	7.874	1.332
5	66.572	8.510	1.460

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 7. Curva esfuerzo vs deformación PLA-Celulosa 5%



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Resultados del ensayo de tensión en probetas de PLA-Celulosa 5%

Nº prueba	Esfuerzo máximo (MPa)	Modulo Young (Gpa)	% Deformación
1	32.666	7.669	0.994
2	27.958	7.281	1.158
3	31.208	7.715	0.934
4	32.468	7.818	0.977
5	25.813	7.349	0.868

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes tablas se calculan los valores promedios (\bar{x}) y su desviación estándar (S) de los datos anteriores de las series de ensayos de tracción.

En la tabla 10 se registran los valores promedios del PLA puro, con un esfuerzo máximo $\sigma = 59,234$ MPa, módulo de Young $E=8,390$ y % deformación de 0,939, con sus desviaciones estándar $S_1=6,157$, $S_2=0,353$ y $S_3=0,098$, respectivamente. De igual manera en la tabla 11 se recopilan los datos promedios y desviación estándar de PLA-Lignina 1, 3 y 5%, por último, en la tabla 12 los valores promedios y desviación estándar de PLA-Celulosa 1, 3 y 5%.

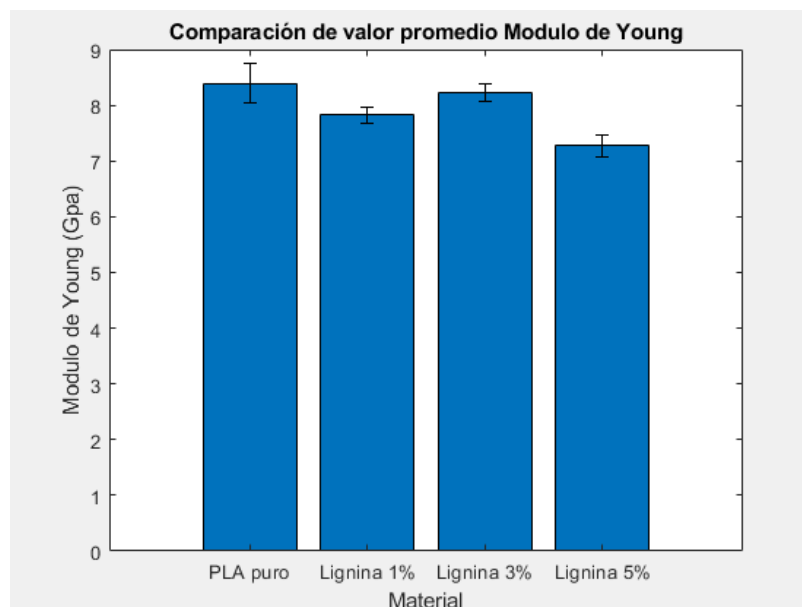
Tabla 10. Valores promedio del ensayo de tensión del PLA puro

Compuesto	Esfuerzo máximo (MPa)	Modulo Young (Gpa)	% deformación
PLA PURO	$59,234 \pm 6,157$	$8,390 \pm 0,353$	$0,939 \pm 0,098$

Fuente: Elaboración Propia

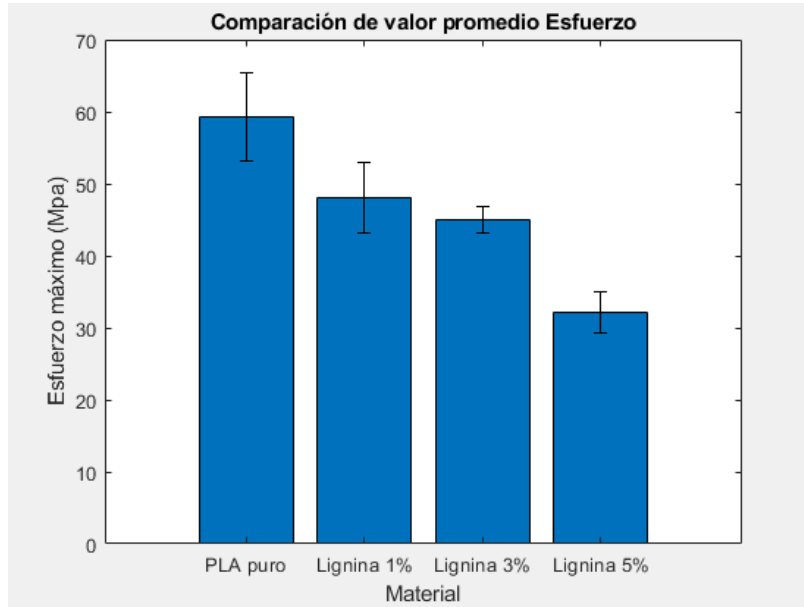
A continuación, se ilustran los gráficos comparativos de valores promedio y desviación estándar de las propiedades mecánicas (módulo de Young, esfuerzo máximo y porcentaje de deformación)

Grafico 8. Módulo de Young promedio (PLA puro y PLA-Lignina 1,3,5%)



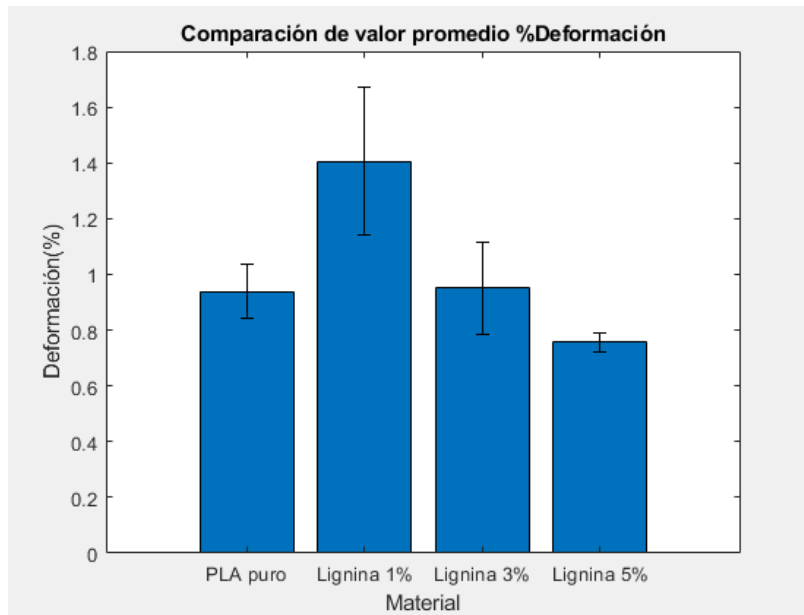
Fuente: Elaboración Propia

Grafico 9. Esfuerzo máximo promedio (PLA puro y PLA-Lignina 1,3,5%)



Fuente: Elaboración Propia

Grafico 10. Porcentaje de deformación promedio (PLA puro y PLA-Lignina 1,3,5%)



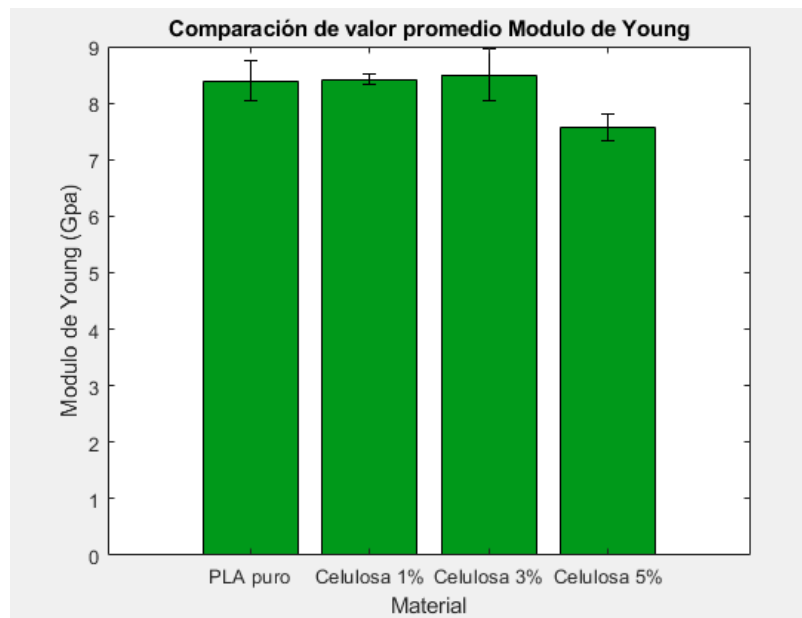
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11. Valores promedio del ensayo de tensión del PLA-Lignina

Compuesto	Esfuerzo máximo (MPa)	Modulo Young (Gpa)	% deformación
Lignina 1%	48,100 ± 4,906	7,829 ± 0,142	1,406 ± 0,267
Lignina 3%	44,941 ± 1,863	8,218 ± 0,158	0,950 ± 0,167
Lignina 5%	32,152 ± 2,840	7,272 ± 0,191	0,757 ± 0,035

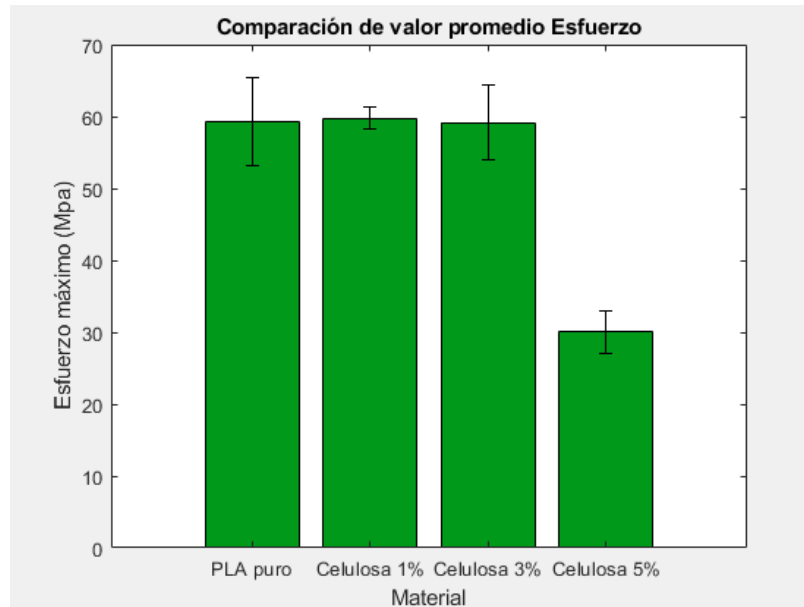
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 11. Módulo de Young promedio (PLA puro y PLA-Celulosa 1,3,5%)



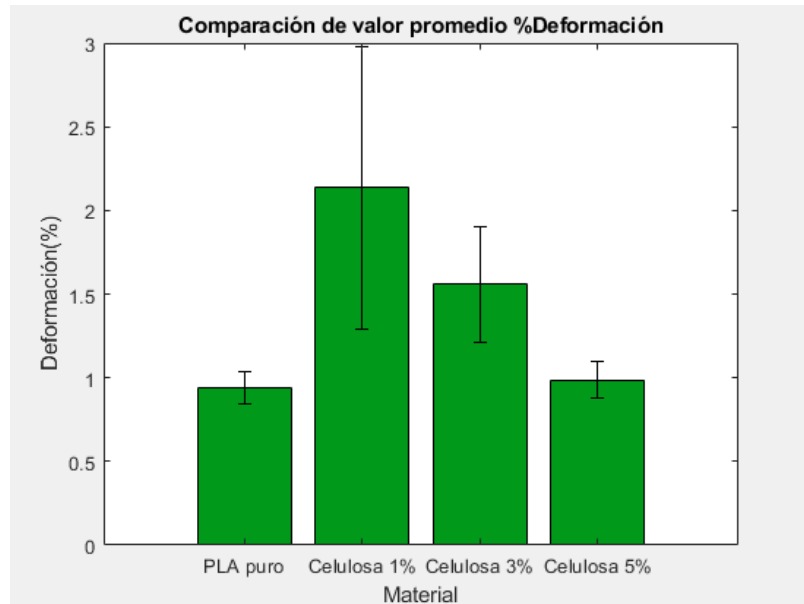
Fuente: Elaboración Propia

Grafico 12. Esfuerzo máximo promedio (PLA puro y PLA-Celulosa 1,3,5%)



Fuente: Elaboración Propia

Grafico 13. Porcentaje de deformación promedio (PLA puro y PLA-Celulosa 1,3,5%)



Fuente: Elaboración Propia

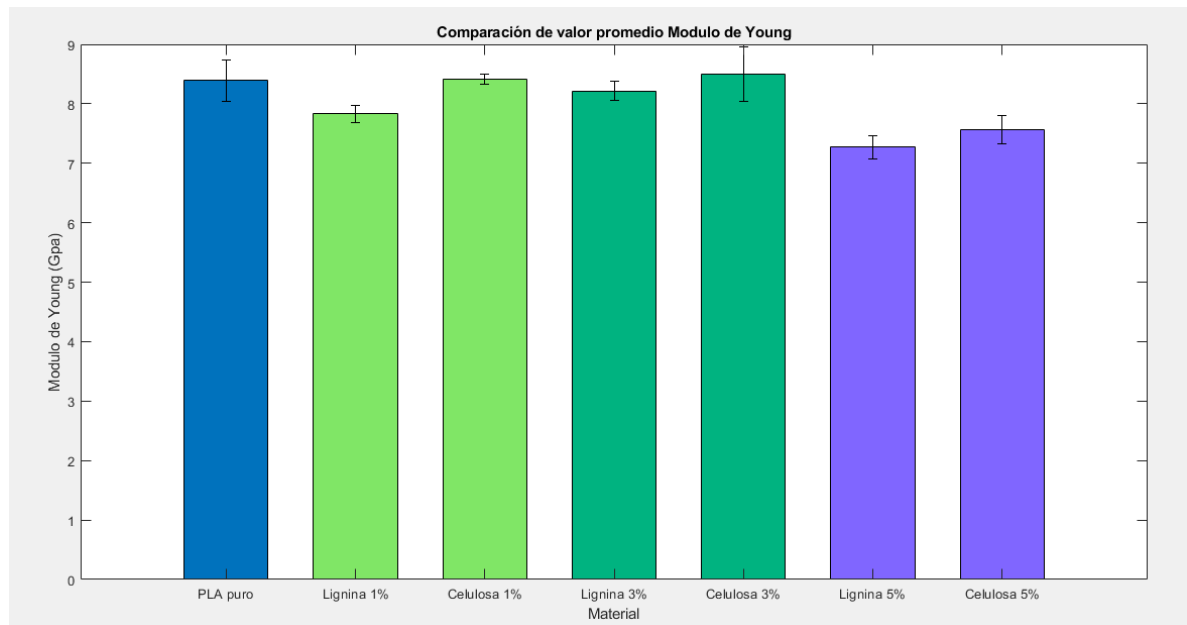
Tabla 12. Valores promedio del ensayo de tensión del PLA-Celulosa

Compuesto	Esfuerzo máximo (MPa)	Modulo Young (Gpa)	% deformación
Celulosa 1%	59,757 ± 1,541	8,420 ± 0,083	2,135 ± 0,844
Celulosa 3%	59,161 ± 5,254	8,498 ± 0,457	1,560 ± 0,346
Celulosa 5%	30,023 ± 3,015	7,566 ± 0,237	0,986 ± 0,108

Fuente: Elaboración Propia

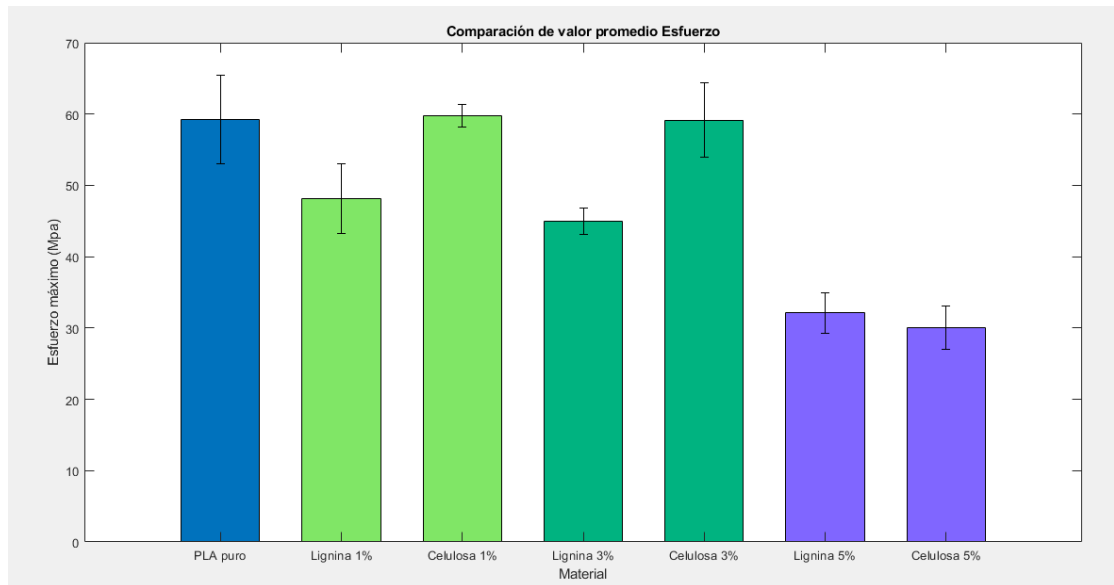
En resumen, desde la gráfica 14 hasta la gráfica 16, se aprecia el comportamiento de los dos materiales con sus respectivas concentraciones frente al PLA puro. En la tabla 13 se registran los valores promedios con su desviación estándar de los tipos de muestras.

Gráfico 14. Resultado módulo de Young promedio PLA, Lignina y Celulosa



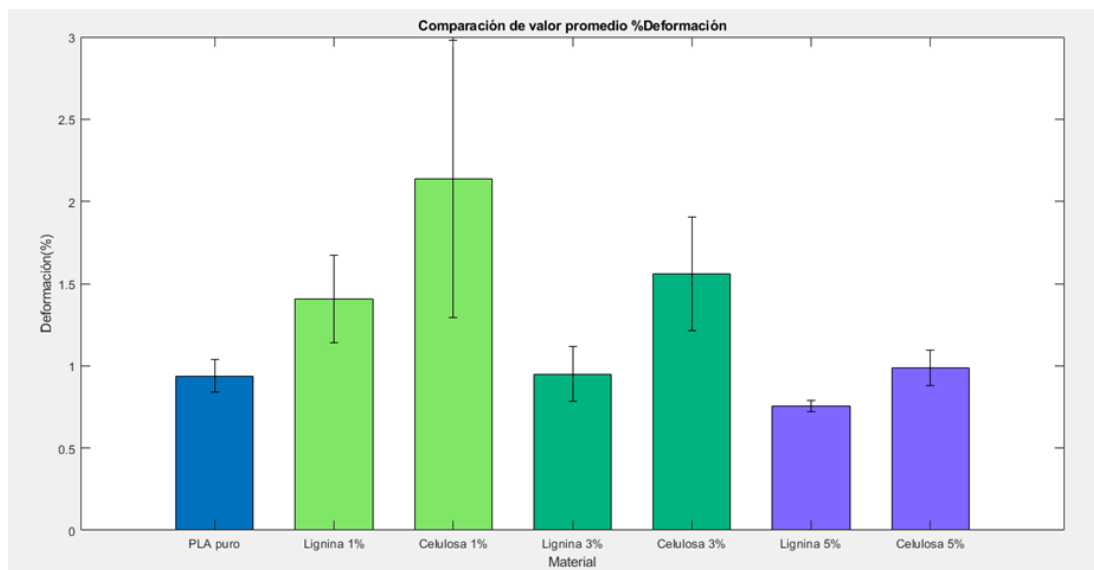
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 15. Resultado esfuerzo máximo promedio PLA, Lignina y Celulosa



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 16. Resultado deformación promedio PLA, lignina y celulosa



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resultados promedio del PLA, Lignina y Celulosa

Compuesto	Esfuerzo máximo [MPa]	Módulo de Young [GPa]	% Deformación
PLA Puro	59,234 ± 6,157	8,390 ± 0,353	0,939 ± 0,098
Lignina 1%	48,100 ± 4,906	7,829 ± 0,142	1,406 ± 0,267
Celulosa 1%	59.757 ± 1,541	8.420 ± 0,083	2.135 ± 0,844
Lignina 3%	44.941 ± 1,863	8.218 ± 0,158	0.950 ± 0,167
Celulosa 3%	59.161 ± 5,254	8.498 ± 0,457	1.560 ± 0,346
Lignina 5%	32.152 ± 2,840	7.272 ± 0,191	0.757 ± 0,035
Celulosa 5%	30.023 ± 3,015	7.566 ± 0,237	0.986 ± 0,108

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

A mayor concentración de lignina y celulosa menor esfuerzo último, al igual que el módulo de Young se ve afectado. Combinar estos materiales no beneficia en las propiedades de esfuerzo a la tracción en el módulo de Young, ya que pierde capacidad para soportar la carga, esto fue notorio en las concentraciones del 5% de los dos materiales. El esfuerzo máximo en los cuerpos de prueba de PLA-Lignina 5% disminuyó en un 45,7% y en el PLA-Celulosa 5% disminuyó 49,3%, aproximadamente. Por otra parte, el módulo de Young presentó valores bajos con una reducción del 13% para la combinación PLA-Lignina 5% y 9,8% para el PLA-Celulosa 5%, respecto al PLA puro.

Se evidenció que el PLA-Lignina 1% presenta mejores propiedades mecánicas en su capacidad de esfuerzo máximo y módulo de Young en relación con PLA-Lignina 3% y PLA-Lignina 5%. A bajas concentraciones las propiedades son buenas

Se concluye que el material compuesto PLA-Lignina 1% no es viable para aplicaciones similares de PLA puro en impresiones 3D, sin embargo, sus propiedades mecánicas se ajustan a aplicaciones donde requiera esfuerzos bajos y mayor capacidad de absorción de energía del material. Previamente se realizó la comparación del PLA-Lignina 1% con el PLA puro, determinando que la lignina 1% presentó una disminución de 18,8% en el esfuerzo máximo y 6,7% del módulo de Young. Es posible destacar el aumento en el porcentaje de deformación de 49,7%.

Las concentraciones de celulosa 1 y 3% presentaron similitud en sus propiedades mecánicas como lo es el esfuerzo máximo y módulo de Young respecto al PLA puro, sin embargo, el porcentaje de deformación en la fractura muestra un aumento significativo. El tipo de muestra con menor desviación estándar fue el PLA con modificación de celulosa 1%, es decir este ensayo obtuvo la mayor precisión de datos.

Se concluyó que la composición PLA-Celulosa 1% es factible para aplicaciones semejantes al PLA puro que requieran mayor ductilidad del material, altos esfuerzos y módulo de elasticidad en impresiones 3D. Dado lo anterior se realizó un análisis entre el PLA-Celulosa 1% con PLA puro de manera que el material con la concentración de celulosa 1% incremento su comportamiento en el esfuerzo máximo de 0,88%, módulo de Young de 0,36% y deformación de 1,27%

En conclusión, se determinó que, al incrementar el porcentaje de concentración en peso de lignina, disminuye significativamente las propiedades de esfuerzo, y deformación. Por otra parte, la celulosa al aumentar las concentraciones también decrece la deformación, pero a diferencia de la lignina, esta intenta mantener su esfuerzo hasta tal punto que si se continúa aumentando en gran proporción su concentración será notorio la disminución en el esfuerzo. Sin embargo, el módulo de Young en los dos materiales trata de conservar su pendiente al cambio de la capacidad de esfuerzo.

7. RECOMENDACIONES

Mejorar la metodología de la elaboración de los cuerpos de prueba para garantizar la homogeneidad del material y evitar los intersticios en el material que afecta en los resultados durante el proceso.

Incrementar la cantidad de probetas de ensayo por tipo de muestra para eliminar incertidumbre en los resultados, permitiendo una menor desviación estándar y así reducción en la dispersión en los valores del material.

Realizar el estudio de la degradación del material con la finalidad de proporcionar información sobre el comportamiento frente a ambientes corrosivos y biodegradabilidad.

Estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas a la tracción en la mezcla de la lignina 1% y Celulosa 1% con PLA.

Se recomienda continuar con el estudio del comportamiento de la lignina y celulosa con pruebas de flexión, torsión y TGA-DSC, para mejorar la caracterización del material y continuar con la búsqueda de nuevas aplicaciones.

De acuerdo con el comportamiento de las propiedades mecánicas a la tracción se recomienda el uso del PLA-Celulosa 1% en aplicaciones similares al PLA- puro en impresiones 3D, pero con deformaciones altas.

BIBLIOGRAFÍA

ARTEAGA MEDINA, Laura. Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3d a partir de materiales reciclados. Trabajo de grado: Universidad de la Laguna. Santa Cruz de Tenerife, España. 2015. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <http>

BELTRÁN GUARÍN, Sergio. Caracterización y predicción de las propiedades a tensión de componentes impresos en 3d con refuerzo de fibras. Trabajo de grado: Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander. 2017. Consultado 6 de octubre de 2018.

CHÁVEZ-SIFONES, Marvin y DOMINE, Marcelo. Lignina, Estructura y Aplicaciones: Métodos de Despolimerización Para la Obtención de Derivados Aromáticos de Interés Industrial. Avances en Ciencias e Ingeniería. Vol.4, Núm. 4, octubre-diciembre, 2013, pp. 15-46

CORTÉS CEDILLO, Arturo Raúl. caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3d. Trabajo de grado: Instituto politécnico nacional. México D.F. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/23>

GAÑAN, Piedad, et al. Celulosa: Un Polímero de Siempre con Mucho Futuro. Revista Colombiana de Materiales. 2017, Edición Especial, pp. 01-04. ISS 2256-1013

MAZÓN ORTIZ, Gabriel Eduardo. Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales. Trabajo de grado: Universidad

técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 2017. Consultado 1 de octubre de 2018. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25131>

MOLINA OSEJOS, Jaime Vinicio. Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos En 3D con cinco mallados internos diferentes. Trabajo de grado: Escuela politécnica nacional. Quito, Ecuador. 2016. Consultado 1 de octubre de 201

NATGEO National Geographic. Científicos mexicanos desarrollan plásticos biodegradables.[Sitio Web]. 9 de Agosto 2018. [consulta: 1 de Noviembre 2021].Disponible en: <https://www.ngenespanol.com/ciencia/desarrollo-de-plasticos-biodegradables-bioplasticos>

ONU Organizacion de Naciones Unidas. Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso.[Sitio Web]. 15 de Marzo 2019. [consulta: 1 de Noviembre 2021].Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>

ROA SIERRA, Jairo Andrés. Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión del ácido Poliláctico PLA procesado por manufactura aditiva FFF considerando la degradación por humedad y temperatura. Trabajo de grado: Universidad Santo Tomas. Bogotá. 201

SANZ TEJEDOR, Asensión. Medios de comunicación en internet: Química Orgánica Industrial. Tecnología de la celulosa. La industria papelera [en línea].2019 [Consultado 20 de Octubre 2021]. <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>

SERNA, Liliana; RODRÍGUEZ DE S, Aída y ALBAN, Fred. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. Ingeniería y Competitividad. Vol. 5 Núm. 1, Octubre, 2003, pp. 01-11. Disponible en:

https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301