



# **Simulación de análisis dinámicos de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno.**

**José Santiago Bohórquez Castañeda**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Tunja, Colombia  
2020



# **Simulación de análisis dinámicos de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno**

**José Santiago Bohórquez Castañeda**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Mecánico**

Directora:

Ingeniera Mercy Tatiana Villate Fonseca

Línea de Investigación:

Materiales

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020



*A mi madre y mi esposa por su constante  
apoyo y motivación*



## **Agradecimientos**

Primeramente, a mi madre que fue mi mayor apoyo y fortaleza en el transcurso de la carrera. A la ingeniera Mercy Tatiana Villate Fonseca, docente de la universidad UAN sede Tunja, que fue mi asesora y guía durante el proyecto de grado. Al Ingeniero William Sanabria, docente de la universidad, por su colaboración en el manejo del software utilizado en el presente trabajo. Al grupo de investigación DUNAM de la UPTC sede central Tunja por permitir el electrohilado de las membranas y las pruebas eléctricas al grupo de investigación GRIDSE de la UPTC sede Duitama dirigidas por el Ingeniero Juan Carlos Castro.



## Resumen

En este estudio se realizaron simulaciones de ensayos de tensión, vibraciones con frecuencias naturales y de fatiga, así como análisis de pruebas eléctricas de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno, con el fin de determinar si la adición en diferentes porcentajes de micro partículas presentaba alteraciones de las propiedades eléctricas y mecánicas del material. Para la simulación se utilizó el software de Autodesk Inventor y el módulo Nastran In Cad, esto fue con análisis de datos de pruebas eléctricas realizadas con Megger y de voltaje sostenido realizados en laboratorios de la UPTC sede Duitama y revisión bibliográfica de estudios previos. El resultado de la simulación permite concluir que el porcentaje del refuerzo de grafeno influye en las propiedades mecánicas y eléctricas de la membrana, disminuyendo la resistencia eléctrica de la membrana y la disminución en la resistencia última a tracción, respuesta a frecuencias senoidales y la vida en ciclos frente a cargas fluctuantes.

**Palabras clave: PLA, grafeno, fatiga, resistencia eléctrica.**

## Abstract

In this study we performed simulations of stress tests, vibrations with natural frequencies and fatigue, as well as analysis of electrical tests of electrolyzed polylactic acid membranes (PLA) with graphene, in order to determine whether the addition of different percentages of microparticles presented alterations in the electrical and mechanical properties of the material. For the simulation we used the software of Autodesk Inventor and the module Nastran In Cad, this was with analysis of data of electrical tests carried out with Megger and of sustained voltage made in laboratories of the UPTC headquarters Duitama and bibliographic review of previous studies. The result of the simulation leads to the conclusion that the percentage of graphene reinforcement influences the mechanical and electrical properties of the membrane, decreasing the electrical resistance of the membrane and the decrease in the ultimate tensile strength, response to sine frequencies and life in cycles against fluctuating loads.

**Keywords: (PLA, graphene, fatigue, electrical resistance)**

# Contenido

	<u>Pág.</u>
Contenido	
<b>1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>21</b>
1.1 Pregunta de investigación .....	21
<b>2. Justificación .....</b>	<b>23</b>
<b>3. Objetivos.....</b>	<b>25</b>
3.1 Objetivo general .....	25
3.2 Objetivos específicos .....	25
<b>4. Marco de referencia .....</b>	<b>26</b>
4.1 Marco teórico .....	26
4.1.1 Biopolímeros.....	26
4.1.2 Ácido poliláctico .....	28
4.1.3 Grafeno .....	31
4.1.4 Electrohilado .....	33
4.1.5 Materiales compuestos .....	35
4.1.6 Resistividad .....	36
4.1.7 Esfuerzo y deformación con carga axial .....	37
4.1.8 Falla a fatiga .....	39
4.2 Estado del arte .....	40
<b>5. Propiedades mecánicas y eléctricas de las membranas electrohiladas .....</b>	<b>43</b>
5.1 Propiedades eléctricas .....	43
5.2 Propiedades mecánicas .....	47
<b>6. Simulación dinámica.....</b>	<b>52</b>
6.1 Simulación respuesta transitoria no lineal .....	53
6.2 Simulación de respuesta de frecuencia modal .....	56
6.3 Ensayo multiaxial de fatiga.....	57
<b>7. Analisis de resultados .....</b>	<b>60</b>
7.1 Ensayo de tension.....	60
7.2 Ensayo modal .....	66
7.3 Ensayo de fatiga .....	70

---

<b>8. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>74</b>
8.1 Conclusiones.....	74
8.2 Recomendaciones.....	75

## Lista de figuras

	<b>Pag.</b>
<b>Figura 4-1:</b> producción anual bioplásticos 2013	27
<b>Figura 4-2:</b> Síntesis del ácido poliláctico a través de la lactida	28
<b>Figura 4-3:</b> Formas alotrópicas del grafeno. Diamante y grafito, grafeno Nanotubos y fullerenos	31
<b>Figura 4-4:</b> Cristal de grafeno suspendido por medio de electroscopía eléctrica.	32
<b>Figura 4-5:</b> Esquema de máquina de electrohilado con recolector plano	34
<b>Figura 4-6:</b> Esquema de máquina de electrohilado con recolector cilíndrico en movimiento	34
<b>Figura 4-7:</b> Clasificación de materiales de refuerzo en la matriz	35
<b>Figura 4-8:</b> Resistividad en diferentes materiales y coeficiente de variación con la temperatura	37
<b>Figura 4-9:</b> Gráfica esfuerzo vs de formación teórica y real del acero	38
<b>Figura 4-10:</b> Ruptura a tensión de un material frágil y uno dúctil	38

---

<b>Figura 4-11:</b> Avance de fisuras de acuerdo al ciclo de carga	39
<b>Figura 4.12:</b> Especificaciones de la orientación de las fibras y de las dimensiones de las placas de PLA con refuerzo en grafeno	40
<b>Figura 4-13:</b> Resultados del esfuerzo ultimo a tracción de láminas de PLA con refuerzo en grafeno	41
<b>Figura 4-14:</b> Composicion de nanocompositos de PLA con refuerzo en nanotubos y nanotubos de carbono	41
<b>Figura 4-15:</b> Resultados de conductividad electrica de compositos de PLA con refuerzo en grafeno y nanotubos de carbono	42
<b>Figura 5-1:</b> Porcentaje de grafeno vs corriente Megger	46
<b>Figura 5-2:</b> Porcentaje de grafeno vs resistencia voltaje sostenido	46
<b>Figura 5-3:</b> Porcentaje de grafeno vs voltaje de ruptura prueba voltaje sostenido	47
<b>Figura 5-4:</b> Diagrama S-N de polimeros convencionales	48
<b>Figura 5-5:</b> Fraccion de resistencia a la fatiga $f$ , de la resistencia ultima entre $10^3$ y $10^6$ ciclos	50
<b>Figura 5-6:</b> Grafica S-N de membranas de PLA con Gr	51
<b>Figura 6-1:</b> Membranas electrohiladas de PLA con grafeno	52
<b>Figura 6-2:</b> Dimensiones de membranas de PLA con grafeno	53
<b>Figura 6-3:</b> Propiedades mecanicas de membrana electrohilada de PLA con grafeno a) 0%, b) 1%, c) 2%, d) 5%	54
<b>Figura 6-4:</b> Factor de carga vs tiempo	55
<b>Figura 6-5:</b> Esfuerzos principales unitario	55
<b>Figura 6-6:</b> Diagrama de factor de carga vs la frecuencia	56

---

<b>Figura 6-7:</b> Interfaz de usuario para la preparación de la prueba	57
<b>Figura 6-8:</b> valores de interfaz de fatiga a) 0%, b) 1%, c) 2%, d) 5%	58
<b>Figura 6-9:</b> factor de carga vs tiempo	59
<b>Figura 7-1:</b> Desplazamiento membrana de 0% a) limite elástico b) ruptura	61
<b>Figura 7-2:</b> Desplazamiento membrana de 1% a) limite elástico b) ruptura	61
<b>Figura 7-3:</b> Desplazamiento membrana de 2% a) limite elástico b) ruptura	62
<b>Figura 7-4:</b> Desplazamiento membrana de 3% a) limite elástico b) ruptura	62
<b>Figura 7-5:</b> Grafica esfuerzo deformacion de membranas electrohiladas de PLA con grafeno	65
<b>Figura 7-6:</b> Esfuerzo y desplazamiento por vibración a membrana de 0% grafeno	66
<b>Figura 7-7:</b> Esfuerzo y desplazamiento por vibración a membrana de 1% grafeno	67
<b>Figura 7-8:</b> Esfuerzo y desplazamiento por vibración a membrana de 2% grafeno	67
<b>Figura 7-9:</b> Esfuerzo y desplazamiento por vibración a membrana de 5% grafeno	68
<b>Figura 7-10:</b> Porcentaje de grafeno vs frecuencia modal	69
<b>Figura 7-11:</b> Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 0% de grafeno	70
<b>Figura 7-12:</b> Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 0% de grafeno	71
<b>Figura 7-13:</b> Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 0% de grafeno	71
<b>Figura 7-14:</b> Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 0% de grafeno	72
<b>Figura 7-15:</b> Grafica de % grafeno vs número de ciclos de vida	73



## Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
<b>Tabla 4-1:</b> Potencial para reemplazar algunos polímeros fuentes por.....27 biopolímeros	27
<b>Tabla 4-2:</b> Propiedades físicas del PLA.....29	29
<b>Tabla 4-3:</b> Propiedades de tensión de PLA y plásticos convencionales.....30	30
<b>Tabla 4-4:</b> Propiedades eléctricas de películas acidas de PLA .....30	30
<b>Tabla 4-5:</b> Propiedades eléctricas de PLA y polímeros fósiles.....30	30
<b>Tabla 4-6:</b> Conductividad electrica del grafeno tratado con oxidoreduccion .....33	33
<b>Tabla 5-1:</b> Valores de corriente, resistencia y voltaje de prueba Megger.....45	45
<b>Tabla 5-2:</b> Valores de voltaje, corriente, resistencia y voltaje de ruptura.....45 en prueba de voltaje sostenido.	45
<b>Tabla 5-3:</b> Propiedades mecánicas de PLA con grafeno.....47	47
<b>Tabla 5-4:</b> Valores del diagrama S-N de las membranas electrohiladas.....50 de PLA con grafeno.	50
<b>Tabla 7-1:</b> Valores de esfuerzo desplazamiento y deformacion para .....63 la membrana de 0% de grafeno.	63
<b>Tabla 7-2:</b> Valores de esfuerzo desplazamiento y deformacion para la.....63 membrana de 1% de grafeno.	63
<b>Tabla 7-3:</b> Valores de esfuerzo desplazamiento y deformacion para .....64	64

la membrana de 2% de grafeno.

**Tabla 7-4:** Valores de esfuerzo desplazamiento y deformacion para la .....64

membrana de 5% de grafeno

**Tabla 7-5:** Resultados de la simulación de ensayo de respuesta transitoria modal....68

**Tabla 7-6:** Resultados de simulación de análisis de fatiga.....72

# Introducción

En la actualidad la problemática generada por los residuos de polímeros ha incrementado, se estima que en un 4% anualmente, y solo el 15% se recicla [1]. Esto se debe a que estos materiales presentan una fuerte resistencia a la corrosión y a la degradación, razón por la cual se le ha dado muchos usos en la industria. Desafortunadamente, debido a su composición se demoran bastantes años en ser reabsorbidos por la naturaleza y en algunos casos no se degradan completamente sino solo presentan una reducción microscópica de tamaño, otro inconveniente que generan es que al degradarse producen metano que es más tóxico que el CO<sub>2</sub>. [2]

Una alternativa para esta problemática ha sido el uso de biopolímeros, los cuales son biodegradables y amigables con el medio ambiente, según la norma ASTM D 5488-94 este proceso no puede superar los 30 días [3]. Se extraen de fuentes naturales por lo que su degradación es rápida y completa, sus características son comparables con los polímeros fósiles por lo que las nuevas investigaciones van encaminadas a la sustitución en la industria de los polímeros convencionales.

Uno de los biopolímeros que ha llamado la atención de los investigadores ha sido el ácido poliláctico (PLA) debido a sus propiedades físicas, mecánicas, fácil obtención y producción, biodegradabilidad y baja toxicidad, por lo que ha sido muy utilizado en la industria

biomédica y de alimentos. Sin embargo, se han desarrollado nano compuestos con otros materiales que permitan la modificación de algunas de sus propiedades y permitir nuevos desarrollos para su implementación en varios sectores de la industria como empaque de alimentos, biosensores, medicamentos, envolturas, conservantes, etc. En los últimos años se han llevado a cabo nuevos rellenos con metales o fibras, logrando el incremento de propiedades de conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la tensión, deformación, propiedades antibacterianas etc.[4]

EL grafeno es un derivado del carbón el cual posee una estructura en forma de una fina lámina de tamaño manométrico convirtiéndolo en un nano material llamativo para su investigación. Fue descubierto en el año 2004 por medio de exfoliación mecánica, posee características muy similares a los nanotubos de carbono, pero su costo es mucho menor, presenta propiedades conductoras elevadas de electricidad y calor, dureza superior al acero y cercana al diamante, elasticidad, flexibilidad, etc. Algunas de sus aplicaciones son pantallas de celulares, chips, pintura, paneles fotovoltaicos, raquetas, lentes de contacto; sin embargo es utilizado como relleno debido a la forma tan reducida en la que se encuentra en la naturaleza [5].

El ácido poliláctico al ser relleno con grafeno ha obtenido importantes mejorías en sus propiedades mecánicas y eléctricas, pero estas dependerán del porcentaje de grafeno, de la preparación que se lleve a cabo para la elaboración de cada compuesto y la dispersión de estas partículas en la base polimérica [6].

Este estudio realiza simulaciones dinámicas de tensión, frecuencia modal y fatiga en software de diseño y análisis de pruebas eléctricas realizadas a membranas electrohiladas de PLA con grafeno para verificar el comportamiento que presenta la matriz polimérica con el aumento hasta el 5% de relleno de grafeno.

# 1. Planteamiento del problema

El PLA es uno de los biopolímeros que mayor potencial presenta para el reemplazo de los polímeros convencionales debido a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, es de fácil producción y posee gran versatilidad para su formación, por lo que se puede obtener durante diferentes procesos, además que permite formar materiales compuestos con otros polímeros o metales para mejorar sus propiedades [7].

El grafeno es un material relativamente nuevo ya que se obtuvo por medio de exfoliación micro mecánica del grafito en el 2004. Al provenir del carbón que es un no metal se esperaría que tuviera mala conductividad eléctrica, sin embargo posee características de un metal por lo que es un buen conductor térmico y eléctrico, y esto lo ha llevado a numerosas investigaciones para su aplicación en diversos campos.[8]

Por estas razones en la Universidad Pedagógica y Tecnológica (UPTC) sede Tunja se está desarrollando un proyecto de maestría el cual busca la aplicación de membranas electrohiladas de PLA con grafeno a biosensores. Con el nuevo software de diseño se pueden desarrollar simulaciones para observar el comportamiento mecánico del material frente a cargas aplicadas y esfuerzos de diferentes clases, y así predecir su respuesta.

## 1.1 Pregunta de investigación

¿Cómo se puede determinar el comportamiento mecánico de membranas electrohiladas de PLA con refuerzo de grafeno?



## 2. Justificación

En la actualidad una parte de los nuevos desarrollos y avances de ingeniería ha sido gracias al descubrimiento de nuevos materiales o a un mayor entendimiento de estos, por lo que se busca estandarizar que características mecánicas y físicas presentan. Los ensayos y pruebas ayudan a descubrir estas propiedades y permiten la comparación con diferentes materiales para poder determinar posibles usos y aplicaciones. Dependiendo de la investigación o el resultado que se espera en el material se usarán determinados procesos de análisis para la obtención de datos acerca de su estructura, propiedades mecánicas, propiedades físicas, propiedades químicas, etc. [9].

El PLA por ser un biopolímero presenta propiedades de este grupo tales como buena resistencia a la conducción eléctrica, mala conductividad térmica, ruptura dieléctrica a un rango de temperatura de 343 K, resistencia a tracción de 50 MPa [10]. Como se puede ver frente al comportamiento eléctrico el PLA es un material con propiedades aislantes impidiendo su aplicación eléctricas, por lo tanto se esperaría que la unión con algún compuesto que posea grandes propiedades eléctricas aportara características conductivas al material, sin embargo habría una alteración en la estructura que afectaría las propiedades mecánicas [11].

Un material que puede usarse con este fin es el grafeno ya que presenta propiedades eléctricas y mecánicas elevadas, incluso más que varios metales. El resultado de la mezcla de estos compuestos es directamente afectado por varios factores como el proceso de disolución de la mezcla, las rpm a las que gira mientras se diluye, temperatura de disolución, tiempo de duración, proceso de obtención de la película, membrana o placa, tiempo en el que se lleva a cabo este proceso, etc. [12]. Por lo que el desarrollar un estudio de sus propiedades permitirá conocer como es el comportamiento del compuesto dando una visión más objetiva de sus características y posibles aplicaciones.

En cuanto al comportamiento de biocompatibilidad tanto el grafeno como el PLA han demostrado ser muy buenos materiales para aplicaciones biomédicas. El PLA se ha utilizado con fines biomédicos como prótesis, implantes, ingeniería del tejido, equipos quirúrgicos, etc. [13]. El grafeno ha tenido aplicaciones en biosensores debido a su fuerte interacción con moléculas DNA mono catenario que le permite una interacción con este y varias moléculas, sin embargo su toxicidad no es perjudicial ya que acumula en el hígado y vaso y permite su fácil expulsión del cuerpo [14]. La unión entre el PLA y grafeno presentaría grandes posibilidades de aplicaciones biomédicas o industriales como biosensor, que es precisamente el proyecto macro que se está desarrollando en la UPTC Tunja.

Debido a la crisis de salud pública generada por el covid 19 se dificulta el desarrollo de un estudio experimental del comportamiento mecánico del compuesto entre PLA y grafeno, debido a las restricciones de desplazamientos, materias primas y disponibilidad de laboratorios. El uso de herramientas digitales como el software de diseño Autodesk Inventor permite desarrollar varios ensayos dinámicos de tensión por medio de elementos finitos de la pieza, permitiendo el desarrollo del proyecto.

La aplicación de software en ingeniería ha permitido el desarrollo de ensayos mecánicos de diferentes tipos ya que permite versatilidad en los parámetros previos para la simulación, ofreciendo un mayor rango de aplicaciones. En el caso de nuevos materiales se puede aplicar simulaciones de ensayos de esfuerzo, deformación, fatiga, cargas multiaxiales; y verificar el comportamiento que presenta. Permite el diseño de ensayos sin la necesidad de poseer laboratorios requeridos para cada tipo de prueba, y realizar modificaciones al compuesto en caso de resultados no esperados [15].

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

- Simular los ensayos estáticos y dinámicos de tensión, frecuencia modal y fatiga multiaxial a las membranas electrohiladas de ácido poliláctico con grafeno

### **3.2 Objetivos específicos**

- Revisión y síntesis de las condiciones iniciales de resistencia eléctrica, resistencia a tracción y fatiga de las membranas electro hiladas de PLA-Grafeno con las que se hará las simulaciones.
- Simular mediante el software Inventor.
- Análisis y comparación de los resultados de los ensayos dinámicos simulados en Inventor que se realizan a las membranas de PLA con grafeno.

## **4. Marco de referencia**

### **4.1 Marco teórico**

#### **4.1.1 Biopolímeros**

Los biopolímeros provienen de fuentes renovables que pasan por una serie de procesos para adquirir plastificación y transformarse en polímero, esto otorga ciertas propiedades mecánicas, físicas y eléctricas que definen su aplicación en la industria y las ciencias, sin embargo, a diferencia de los polímeros convencionales su impacto frente al medio ambiente es considerablemente menor. Las principales fuentes naturales de obtención de la materia prima provienen de 4 fuentes: origen animal, origen marino, origen agrícola y origen microbiano. [16]

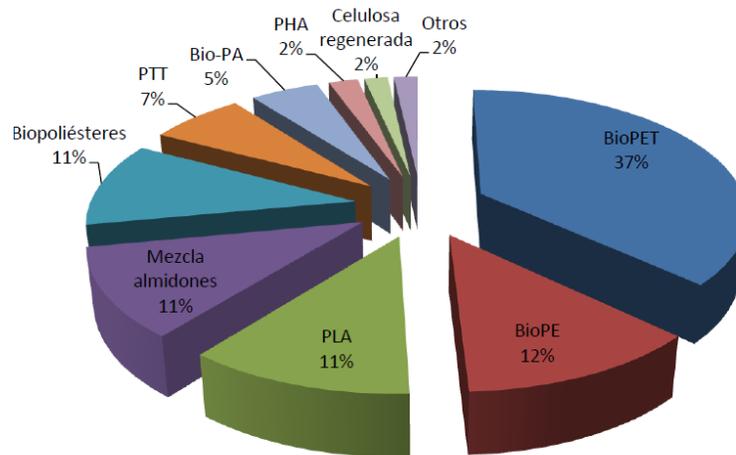
El avance y desarrollo de nuevas materias primas y nuevas aplicación de los biopolímeros se deben a que presentan propiedades muy comparables con los polímeros fósiles, pero con una alta biocompatibilidad que permite una fuerte bioadhesión entre microorganismos y el biopolímero. Sin embargo poseen algunas limitaciones técnicas que dificultan su aplicación final, por lo que se ha buscado nuevas estrategias de fabricación o la posible adición de otros compuestos que le brinden mejoras estructurales, esto ha permitido que se extienda sus usos y aplicaciones a otros campos como lo muestra la figura 1 [17].

**Tabla 4-1:** Potencial para reemplazar algunos polímeros fuentes por biopolímeros [17]

Polímero	PVC	PEAD	PEBD	PP	PS	PMMA	PA	PET	PC
Amido	-	+	+	+	+	-	-	-	-
PLA	-	+	-	+	+	-	+	+	-
PHB	-	+	-	++	+	-	-	-	-
PHBX	+	++	++	++	+	-	-	+	-

En la actualidad los biopolímeros son muy utilizados en la industria de alimentos y de bebidas preservando y protegiendo los productos, donde se utiliza en recubrimientos comestibles de alimentos, clarificadores, aditivos en los alimentos, empaquetado, etc.[18]. En biomedicina se ha utilizado en farmacología y en mecánica biomédica en prótesis, dispositivos terapéuticos cardiovasculares, ortopédicos, oftalmológicos, injertos de piel, ingeniería de tejidos, biosensores etc. [19].

**Figura 4-1:** Producción anual bioplásticos 2013 [20].

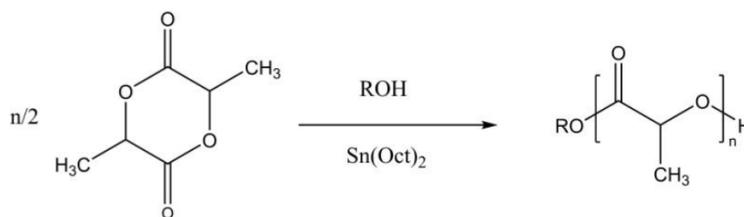


### 4.1.2 Ácido poliláctico

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero que se extrae del ácido láctico, esta es una biomolécula presente en los seres vivos y es un componente normal de la sangre y los músculos de los animales; también se encuentra de forma vegetal como el almidón de yuca, sacarosa de azúcar de caña, remolacha azucarera etc. La producción mundial se estima entre 35000 y 40000 toneladas al año, donde los principales productores son EE. UU., Japón y Brasil con un 60 % de esta producción, aunque países como china, Holanda, Inglaterra y España son productores considerables, se calcula que el 85% del ácido poliláctico es utilizado en la industria alimentaria como acidulante y perseverante. Dependiendo de la pureza presentan modificaciones estructurales que caracterizan las características del PLA, produciendo que tenga diferentes aplicaciones en la industria por lo que los métodos de obtención y tratamiento están custodiados bajo patente de cada empresa [7].

El PLA se puede obtener de tres maneras el L-poliláctico (PLLA), el D-poliláctico (PDLA) y la mezcla de estos dos generando DL-poliláctico, de los cuales los dos primeros poseen una estructura cristalina que los vuelve transparentes y brillantes mientras que en el último la estructura es amorfa dándole un aspecto opaco y blanco. EL PLLA se puede producir de dos maneras de bajo o alto peso molecular, para el primer caso se poli condensa el ácido láctico a temperaturas aproximadas a 150 °C y presiones entre 40 y 60 torr produciendo bloques blandos moldeables manualmente. Para alto peso molecular se polimeriza con catalizador (generalmente 2-etilhexanoato) obteniendo bloques rígidos, por su parte el D-poliláctico se obtiene mediante poli condensación y posteriormente sublimación [13].

**Figura 4-2:** Síntesis del ácido mpolilactico a travez de la lactida [20].



Las propiedades físicas y mecánicas del PLA dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad, esta puede controlarse desde 0 a 40%. Entre sus propiedades mecánicas se puede equiparar a los polímeros fósiles ya que presentan propiedades muy similares, sin embargo el PLA posee baja elongación siendo un material quebradizo cuando se somete a esfuerzos de tensión, en la figura 4-4 y 4-5 se muestran propiedades físicas y mecánicas en comparación con polímeros convencionales[20].

Ya que el PLA pertenece a la categoría de biopolímero comparte sus propiedades eléctricas tales como alta resistividad, constante dieléctrica, pérdida dieléctrica, etc. sin embargo dichas propiedades no han podido ser muy concretas en los biopolímeros, y en el caso del PLA estas propiedades varían de acuerdo a su método de fabricación, tamaño, composición y diversidad de otros factores, por lo que en la mayoría de los casos se necesita el desarrollo de un estado eléctrico para obtener valores eléctricos reales [21]. En las figuras 4-6 y 4-7 se evidencian algunas de las propiedades eléctricas del PLA, en la primera se compararon 3 diferentes películas acidas con una composición de PLLA, en el segundo se utilizó una película orientada biaxialmente para aplicar en aislantes de cables eléctricos.

El PLA es un material que posee baja toxicidad ya que es absorbido en su totalidad por los tejidos vivos por medio de hidrolisis química, primero hay una pérdida de peso molecular y luego de masa para que al final sea expulsado del cuerpo como CO<sub>2</sub> [22].

**Tabla 4-2:** Propiedades físicas del PLA [22].

<b>Masa molecular (Kda)</b>	<b>% cristalinidad</b>	<b>Viscosidad (dL/g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
L-PLA 50 a 756	15 a 74	0.61 a 8.2	1.25
DL PLA 21 a 550	0 (amorfo)	0.25 a 2.01	1.29
PLA – PGA 20 a 145	46 a 52	0.5 a 1.6	1.50 a 1.64

**Tabla 4-3:** Propiedades de tensión de PLA y plásticos convencionales [20]

Propiedad	PLA	PET	PS	PP	HDPE
Esfuerzo máximo (Mpa)	40	55	40	40	26
Modulo elástico (Gpa)	2,5 – 3	2,8 – 4,1	3 -3 ,5	1,5 - 2	0,8
% deformación a rotura	3 - 5	60 -150	40	100	500

**Tabla 4-4:** Propiedades eléctricas de películas acidas de PLA [23].

Material	c-PLLA	a-PLLA	XLPE
Resistividad	55x10 <sup>16</sup>	49x10 <sup>16</sup>	46 x 10 <sup>16</sup>
Constante dieléctrica	3,8	3	2,4
Perdida dieléctrica	0,02	0,022	0,018

**Tabla 4-5:** Propiedades eléctricas de PLA y polímeros fósiles [24].

Ítems	PLA	PE	Poliéster	PP
p(Ω*cm)	>5x10 <sup>18</sup>	>10 <sup>16</sup>	>10 <sup>16</sup>	>10 <sup>16</sup>
ε 1(KHz)	2,46 – 2,59	2,3	3,2	2,4
100(KHz)	2,43 – 2,65	-----	-----	-----
tanδ 1(KHz)	2,6 – 3*10 <sup>-3</sup>	2*10 <sup>-3</sup>	5*10 <sup>-3</sup>	1,2*10 <sup>-3</sup>
100(KHz)	4,9 – 9*10 <sup>-3</sup>			

Debido a que se pueden obtener varios tipos de PLA tanto rígidos como flexibles, con propiedades eléctricas que se pueden alterar por medio de rellenos o del proceso de fabricación y con una elevada biocompatibilidad es un material que tiene un gran potencial para reemplazar a los polímeros fósiles. Es muy usado en medicina como ingeniería de tejidos, prótesis, implantes, equipos quirúrgicos, placas absorbibles. En la industria alimentaria se usa como conservante, empaques de alimentos, biosensores y envolturas [7].

### 4.1.3 Grafeno

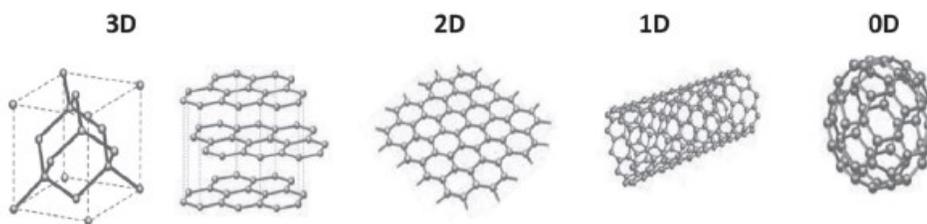
El carbono es un elemento químico que posee varias formas de encontrarse en la naturaleza debido a la alotropía que presenta, una de ellas es el grafeno que presenta una estructura plana bidimensional y que fue descubierto en el 2004 (Novoselom y Geim), otras formas estructurales son:

Cero dimensionales: fullerenos (1985)

Mono dimensional: nanotubos (1991)

Tridimensionales: grafito (1784) y diamante (1762)

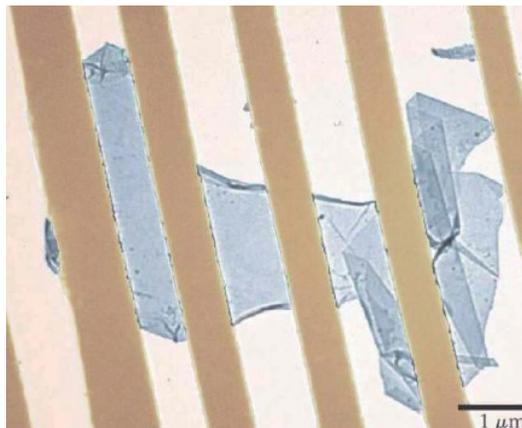
**Figura 4-3:** Formas alotrópicas del grafeno. Diamante y grafito, grafeno. Nanotubos y fullerenos [25].



El grafeno hasta el momento se ha encontrado en medio de las capas que posee el grafito, se presenta como una capa plana que puede llegar a medir varios centímetros de largo y que posee un átomo de espesor, debido a esta condición se clasifica como un nano material. Ha tenido un reciente interés debido a las propiedades que presenta ya que sus átomos están fuertemente cohesionados entre sí y una configuración en forma hexagonal, compitiendo con los nanotubos de carbono ya que sus propiedades son muy semejantes pero su producción es a más bajo costo [25].

Ya que el grafeno es una de las capas entrecruzadas del grafito se debe retirar las capas superiores y el método más usado para este proceso es la exfoliación mecánica. Consiste en el raspado superficial de cada capa de grafito hasta dejar al descubierto el grafeno, luego se usa microscopía óptica para la comprobación de la estructura bidimensional del grafeno debido a una reacción que se logra con oxido de silicio y que contrasta con el grafito, por último, se somete a electroscopía eléctrica para determinar el grosor de la capa como se muestra en la figura 4.9. este proceso fue por el cual se obtuvo por primera vez esta estructura del carbono en el 2004 [8].

**Figura 4-4:** Cristal de grafeno suspendido por medio de electroscopía eléctrica [8].



El grafeno no pertenece al grupo de los metales, sin embargo, presenta características muy similares en sus propiedades mecánicas y eléctricas. Respecto a sus propiedades mecánicas el grafeno es capaz de alongarse un 10% de su tamaño original, posee valores de módulo de Young de 1 TPa y resistencia última a tracción de 130 MPa. En la parte eléctrica debido a la red hexagonal plana genera un camino lineal para que el electrón pueda desplazarse libremente por su superficie, su movilidad eléctrica equivale a  $200000 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ , y posee una conductividad térmica de  $300 \text{ w/mK}$  [26]. Si se le hace un tratamiento por oxidación-reducción se tendrán diferentes valores de conductividad dependiendo del reductor que se aplique como muestra la figura 4-10 donde los mejores reductores fueron por medio de vitamina C y termo-reducción [27].

**Tabla 4-6:** Conductividad eléctrica del grafeno tratado con oxidoreduccion [27].

Muestra	Conductividad eléctrica (S/cm)
GO	$2,3 \times 10^{-6}$
RGO	$6,96 \times 10^{-4}$
CMG-BH	$4,9 \times 10^{-4}$
CMG-VC	$3,16 \times 10$
TRGO	$1,52 \times 10$

Ya que el grafeno posee grandes capacidades conductoras sus usos suelen estar enfocados en esta dirección. En el campo biomédico como biosensores, control de crecimiento celular, rectificadores de onda completa y duplicadores de frecuencia, transistores, multiplicadores de frecuencia, optoelectrónica, etc. En la industria como sensores de gases en la atmosfera, transistores balísticos, baterías, computación cuántica, etc. [28].

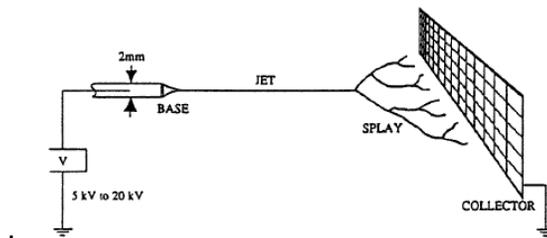
#### 4.1.4 Electrohilado

El electrohilado es una técnica donde se producen hilos y fibras de dimensiones manométricas por medio de un campo eléctrico. Este método se ha ido extendiendo ya que los nano materiales han demostrado tener propiedades mecánicas y físicas con grandes aplicaciones en diferentes campos de la ciencia, además es una técnica muy sencilla de aplicar a soluciones poliméricas (fósiles o biodegradables). Entre las partes de una electro hiladora se encuentra la fuente, un dosificador, una aguja con punta metálica y un recolector que debe tener buena conductividad [29].

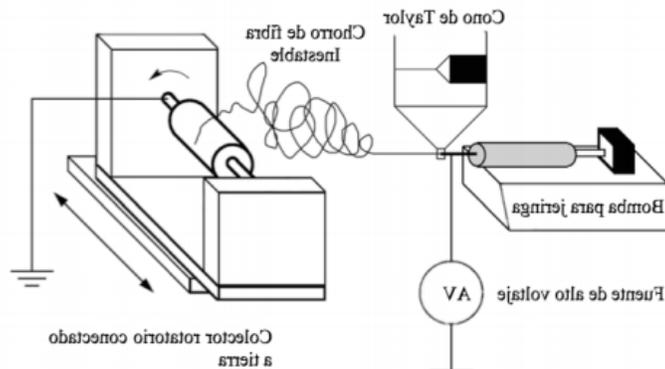
Se puede descomponer este proceso en 4 partes base, jet, reproducción y recolector. La base es la punta de la aguja donde se aplica una carga eléctrica que produce que la solución polimérica supere la resistencia dieléctrica y transite por ella cargas del mismo

signo, por la repulsión producida se empiezan a separar las moléculas del polímero y se crea el cono de Taylor donde comienza el viaje hasta el colector. El jet es la parte en la cual el campo eléctrico estira la gota del polímero volviéndola un hilo, la elongación que presenta se da cuando la velocidad con la que el chorro viaja es mayor a la velocidad con la que las cargas viajan por el polímero por lo que se transmite la fuerza eléctrica a la masa. En el reproductor la fuerza centrípeta se hace mayor a la fuerza de cohesión debido al tener más cercanía con la placa, esto produce que el chorro se divida en varias ramificaciones en igual proporción. Por último el recolector sirve de base a donde llegan los hilos y se van posicionando, dependiendo del tipo de recolector se pueden obtener membranas o cilindros de material, en la figura 4-11 y 4-12 se presentan los dos casos [30].

**Figura 4-5:** Esquema de máquina de electrohilado con recolector plano [30].



**Figura 4-6:** Esquema de máquina de electrohilado con recolector cilíndrico en movimiento [31].

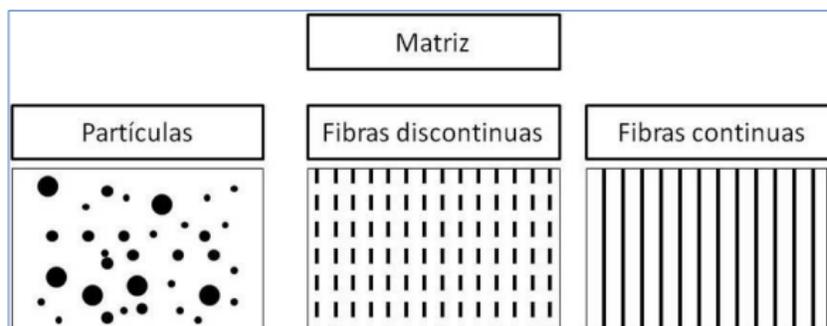


La obtención de un hilo determinado dependerá de los valores que se le den al campo eléctrico y las condiciones del polímero, ya que el campo eléctrico se ve afectado por el voltaje que se aplique, la distancia entre la placa y el recolector son parámetro para tener en cuenta al momento de electro hilar. Entre sus usos más frecuentes se encuentran los campos como la biomedicina (tejidos, prótesis, nano sensores), textiles, industria de alimentos (bebidas personalizadas, sensores inteligentes, filtros inteligentes) [31].

### 4.1.5 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos en los que dos o más materiales (polímeros, metales, cerámicos), o fases distintas se combinan para producir un compuesto, de aquí se producen combinaciones de propiedades físicas y mecánicas características de cada unión. En la actualidad se conocen bastante a fondo las propiedades de los metales, cerámicos y polímeros, pero de materiales compuestos son muchas las investigaciones que se realizan para conocer más a fondo sus características y comportamiento. Se componen de una matriz y uno o más refuerzos de otro material, se podrían clasificar según la matriz que posea y sus refuerzos generalmente son en partículas, laminados o fibras. Su comportamiento frente a las propiedades que presente dependerá de los parámetros de construcción del compuesto como los materiales constituyentes, su geometría y su distribución de fases [32].

**Figura 4-7:** Clasificación de materiales de refuerzo en la matriz [32].



### 4.1.6 Resistividad

La resistencia eléctrica se define como la oposición al flujo de corriente eléctrica que pasa por un material, su unidad es el ohm ( $\Omega$ ). Fue descrita por el físico alemán simón Ohm en 1827 donde describió este fenómeno con la formula  $V=IR$  donde  $V$  es voltaje,  $R$  resistencia eléctrica e  $I$  la corriente eléctrica. Suele tomarse la resistencia eléctrica como un valor constante en teoría pero en la práctica se ha visto que los valores varían de acuerdo al voltaje aplicado [33].

La resistividad hace referencia a la resistencia eléctrica específica que posee un material, sus unidades de medidas son los  $\Omega\text{m}$ , es el valor inverso de la conductividad y está dado por la ecuación:

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{1}{\sigma}$$

$\rho$  = resistividad eléctrica

$R$ = resistencia eléctrica

$A$ =

área perpendicular al flujo de corriente-

$l$ = longitud

$\sigma$

= conductividad eléctrica

Una de las variables que afectan la resistividad de un material es la temperatura, por lo que siempre se debe tener la referencia de esta en las mediciones, en la figura 4-14 se muestran valores de resistividad de diferentes materiales a 20 °C y el coeficiente de variación con la temperatura [34].

**Figura 4-8:** Resistividad en diferentes materiales y coeficiente de variación con la temperatura [34].

Material	Resistencia específica a 20°C en CM · Ω/ft	Coefficiente de variación con la temperatura α, en Ω por °C
Aluminio	17	0.004
Carbono	+	-0.0003
Constantán	295	(promedio)
Cobre	10.4	0.004
Oro	14	0.004
Fierro	58	0.006
Nicromel	676	0.0002
Níquel	52	0.005
Plata	9.8	0.004
Tungsteno	33.8	0.005

#### 4.1.7 Esfuerzo y deformación con carga axial

Una característica muy importante al momento de caracterizar un material es caracterizar la deformación unitaria que sufre el material debido a un esfuerzo axial, se puede calcular con la fórmula:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{\sigma}{E}$$

ε= deformación axial

σ= esfuerzo

δ= deformación

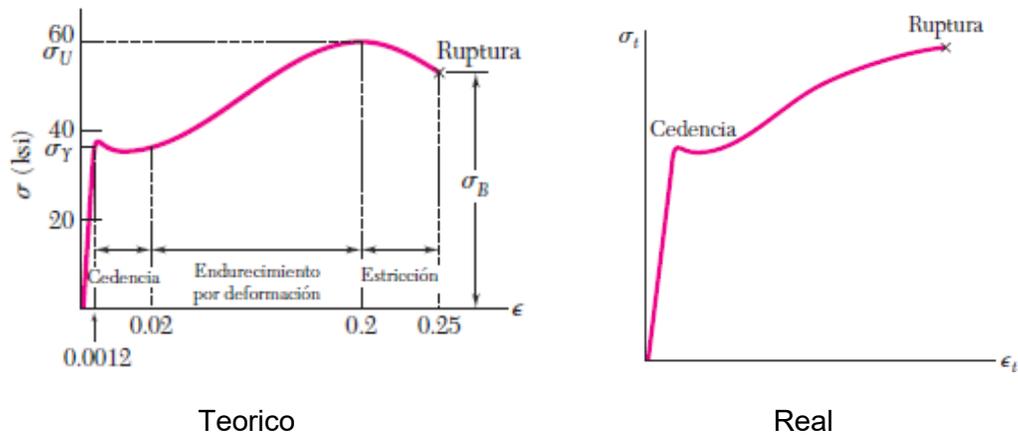
E= módulo de elasticidad

L= longitud

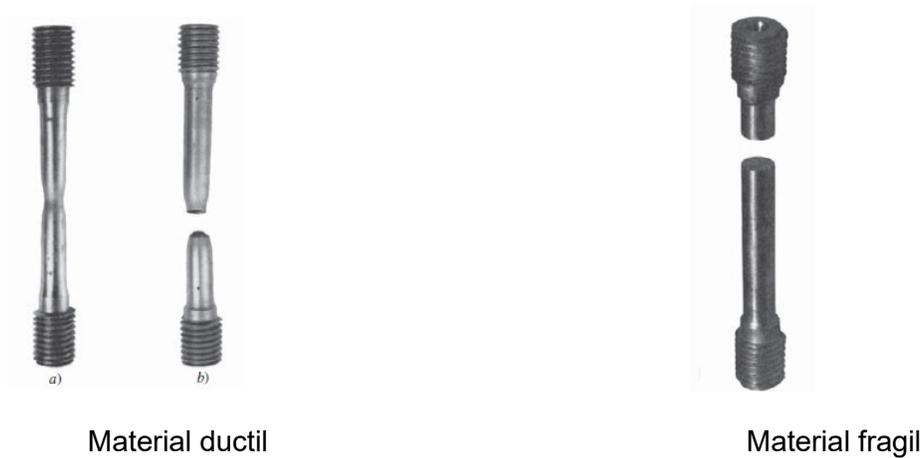
La grafica esfuerzo deformación permite conocer el comportamiento de un material, su zona elástica y zona plástica con sus respectivos esfuerzos, el esfuerzo máximo y el esfuerzo ultimo de ruptura, etc. Si se toma el área transversal inicial como constante se tendrá un esfuerzo teórico mientras que para el cálculo del esfuerzo real se debe tener en cuenta la disminución del área debido a la elongación de la pieza que presenta la pieza.

Un material frágil es aquel que posee una zona elástica muy corta por lo que no se alongara demasiado antes de fallar a diferencia de un material elástico el cual se deformara formando un pico de botella, en la imagen 4-15 y 4-16 se muestra la gráfica esfuerzo deformación real y teórico del acero con sus zonas de análisis; y la diferencia entre un material frágil con uno dúctil [35].

**Figura 4-9:** Grafica esfuerzo vs de formación teórica y real del acero [35].



**Figura 4-10:** Ruptura a tension de un material fragil y uno ductil [35].

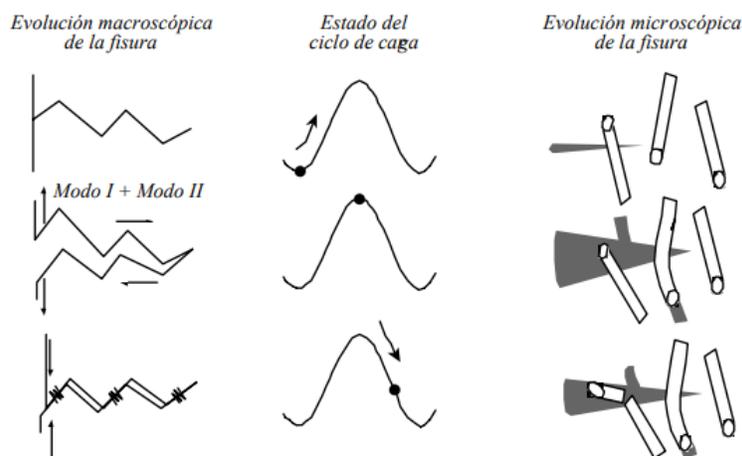


### 4.1.8 Falla a fatiga

El esfuerzo a fatiga se describe como el esfuerzo que soporta un material debido a cargas cíclicas debido a que estas provocan un desgaste progresivo hasta llevar el material a falla, el valor del esfuerzo en el ciclo de falla se le conoce como límite de fatiga [36]. Los compuestos del material son un factor importante ya que pueden ser las que generan las grietas en su límite de grano, si la deformación se acerca al punto de ruptura puede generar endurecimiento del material incrementando su fragilidad y cambio de sus propiedades elásticas [37].

Por lo tanto es importante conocer los puntos de esfuerzos y de número de ciclos al cual el material presenta este límite de esfuerzo, para cada material se genera un diagrama de esfuerzo a fatiga vs número de ciclos o S.N. el cual permite observar los límites en los que se puede trabajar el material sin presentar fallas o grietas. Para el diseño de este gráfico se usa el mismo procedimiento que en los metales. En la figura 4-17 se muestra el avance de las fisuras locales de acuerdo a la posición del ciclo de carga [37].

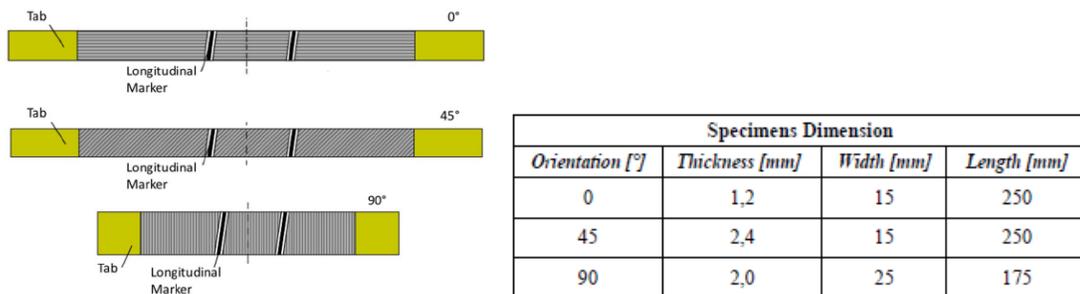
**Figura 4-11:** Avance de fisuras de acuerdo al ciclo de carga [37].



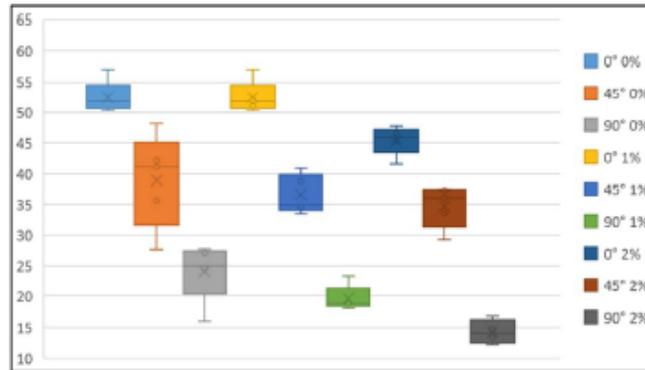
## 4.2 Estado del arte

Un estudio llevado a cabo por Marconi S, Alaimo G, Mauri V, Torre M, Auricchio f, de la universidad de Pavia Italia; en el cual evaluaban si existía variación en las propiedades mecánicas de placas de matriz PLA y refuerzo con grafeno. El método por el cual se obtuvieron las muestras fue por medio de impresión 3D, la extrusión se realizó con temperaturas de 200 °C sobre una placa sobrecalentada a 50 °C para una fácil remoción. Los porcentajes seleccionados fueron de 0%, 1% y 2% de peso en grafeno, y con 3 orientaciones de las direcciones de las placas 0°, 45° y 90°, En la figura 4-18 se detallan estas configuraciones. Los resultados obtenidos mostraron una disminución del esfuerzo ultimo a tracción y del módulo de elasticidad mediante el aumento de los porcentajes de grafeno, la mayor variabilidad se obtuvo en las muestras ubicadas a 0° y 90° con 2% de grafeno, donde el esfuerzo paso de 52 a 45 MPa y de 24 a 14 MPa respectivamente, la figura 4-19 muestra los resultados del estudio [38],

**Figura 4-12:** Especificaciones de la orientación de las fibras y de las dimensiones de las placas de PLA con refuerzo en grafeno [38].



**Figura 4-13:** Resultados del esfuerzo ultimo a tracción de láminas de PLA con refuerzo en grafeno [38].

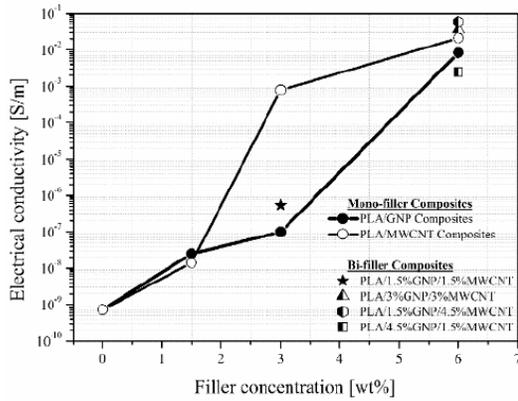


Se llevo a cabo un estudio de las propiedades eléctricas de composites con matriz de PLA y refuerzo con grafeno y nanotubos de carbono por medio de impresión 3D, en la figura 4-19 se especifican la composicion y los porcentajes de los composites. Para las mediciones eléctricas se utilizo un picoamperimetro, los electrodos fueron conectados a 2 placas de aluminio en la que en medio se encontraba los composites, de aquí se obtuvieron resultados de resistencia de donde se calculo la conductividad. Como resultado se obtuvo un aumento en la conductividad térmica y electrica con el aumento de los porcentajes de los materiales de relleno, donde los nanotubos de carbono obtuvieron una mayor influencia en la matriz polimerica. sin embargo el grafeno tambien demostro aumentar considerablemente estas propiedades, en la figura 4.21 se evidencian dichos valores [39].

**Figura 4-14:** Composición de nanocompositos de PLA con refuerzo en nanotubos y nanotubos de carbono [39].

Composition Code (wt.%)	GNP Content (wt.%)	MWCNT Content (wt.%)	PLA Content (wt.%)	Name
PLA	-	-	100	referent
PLA/1.5% GNP	1.5	-	98.5	mono-filler
PLA/3% GNP	3	-	97	mono-filler
PLA/6% GNP	6	-	94	mono-filler
PLA/1.5% MWCNT	-	1.5	98.5	mono-filler
PLA/3% MWCNT	-	3	97	mono-filler
PLA/6% MWCNT	-	6	94	mono-filler
PLA/1.5% GNP/1.5% MWCNT	1.5	1.5	97	bi-filler
PLA/1.5% GNP/4.5% MWCNT	1.5	4.5	94	bi-filler
PLA/3% GNP/3% MWCNT	3	3	94	bi-filler
PLA/4.5% GNP/1.5% MWCNT	4.5	1.5	94	bi-filler

**Figura 4-15:** Resultados de conductividad eléctrica de composites de PLA con refuerzo en grafeno y nanotubos de carbono [39].



Composition Code (wt.%)	Electrical Conductivity (S/m)
PLA	$7.3 \times 10^{-10} (\pm 3.39 \times 10^{-10})$
PLA/1.5% GNP	$2.51 \times 10^{-8} (\pm 1.48 \times 10^{-9})$
PLA/3% GNP	$9.9 \times 10^{-8} (2.97 \times 10^{-8})$
PLA/6% GNP	0.00835 ( $\pm 0.00233$ )
PLA/1.5% MWCNT	$1.4 \times 10^{-8} (\pm 2.83 \times 10^{-9})$
PLA/3% MWCNT	$7.86 \times 10^{-4} (\pm 4.86 \times 10^{-4})$
PLA/6% MWCNT	0.021 (0.00707)
PLA/1.5% GNP/1.5% MWCNT	$5.4 \times 10^{-7} (\pm 7.07 \times 10^{-8})$
PLA/1.5% GNP/4.5% MWCNT	0.0585 ( $\pm 0.0318$ )
PLA/3% GNP/3% MWCNT	0.036 ( $\pm 0.0112$ )
PLA/4.5% GNP/1.5% MWCNT	$0.00244 (\pm 8.56 \times 10^{-4})$

## 5. Propiedades mecánicas y eléctricas de las membranas electrohiladas

### 5.1 Propiedades eléctricas

Del proyecto de maestría de la UPTC sede Tunja se desarrollaron membranas de PLA con refuerzo en grafeno por medio de electrohilado, donde se categorizaron según el porcentaje de grafeno.

Las condiciones de electrohilado fueron las mismas para todas las membranas donde el voltaje aplicado fue de 15000 V a una distancia de 0,15 m, se determinara el campo eléctrico, la fuerza eléctrica y la carga distribuida en la aguja que contiene la solución de PLA con grafeno.

$$E = \frac{|V_b - V_a|}{d} = \frac{15000V}{0.15m} = 100000 \frac{V}{m} = 100000 \frac{N}{C}$$

E = campo eléctrico

$V_b - V_a$  = voltaje de la fuente

d = distancia

Debido a que se tiene una carga uniforme en la aguja de la jeringa se usara una distribución de carga uniforme, la magnitud de la aguja es de 40 mm, el valor de la fuerza y la carga distribuida fueron los siguientes:

$$E = \frac{kQ}{d(l + d)}$$

E= campo eléctrico

k = constante de Coulomb

Q = carga eléctrica

d = distancia entre las placas

l+d = distancia entre la placa y la longitud de carga distribuida

$$100000 \frac{N}{C} = \frac{9 * 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} * Q}{0.15m(0.19m)}$$

$$Q = \frac{100000(0.0285)}{9 * 10^9} C = 3.17 * 10^{-7} C$$

$$F = EQ = 100000 \frac{N}{C} * 3.17 * 10^{-7} C = 0.0317 N$$

F= fuerza eléctrica

E=campo eléctrico

Q= carga eléctrica

Las membranas elaboradas tenían porcentajes de grafeno del 0%, 1%, 2%, 5% y 10%. Los valores eléctricos que presentan las membranas de PLA con grafeno fueron extraídos de ensayos eléctricos llevados a cabo en la UPTC de Duitama. Se realizaron dos pruebas, Megger y de voltaje sostenido, la primera usa corriente directa y la segunda corriente alterna, los resultados obtenidos se representan en la tabla 5.2.

**Tabla 5-1:** Valores de corriente, resistencia y voltaje de prueba Megger (Autor).

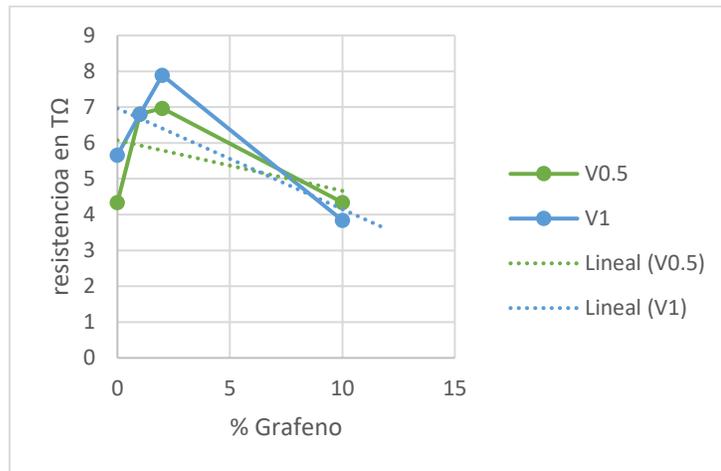
Membrana porcentaje grafeno	Volumen (ml)	Voltaje (V)	Corriente (nA)	Resistencia (TΩ)
0 %	0.5	1000	0,23	4,34
	1		0,51	5,66
1%	0.5	1000	0,147	6,81
	1		0,147	6,81
2%	0.5	1000	0,143	6,97
	1		0,127	7,89
10%	0.5	1000	0,23	4,34
	1		0,26	3,84

**Tabla 5-2:** Valores de voltaje, corriente, resistencia y voltaje de ruptura en prueba de voltaje sostenido (Autor).

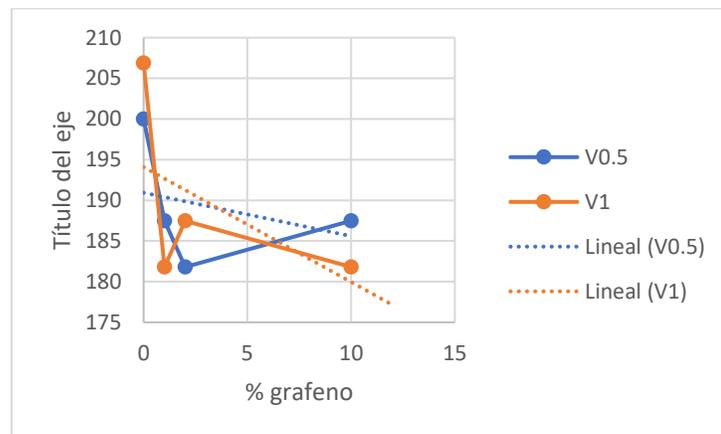
Porcentaje de grafeno	Volumen (ml)	Voltaje (v)	Corriente (μA)	Resistencia (Ω)	Voltaje de ruptura (v)
0	0.5	600	3	200	1556
	1		2,9	206,9	2033
1	0.5	600	3,2	187,5	1556
	1		3,3	181,8	904
2	0.5	600	3,3	181,8	930
	1		3,2	187,5	1241
10	0.5	600	3,2	187,5	1151

	1		3,3	181,8	1077
--	---	--	-----	-------	------

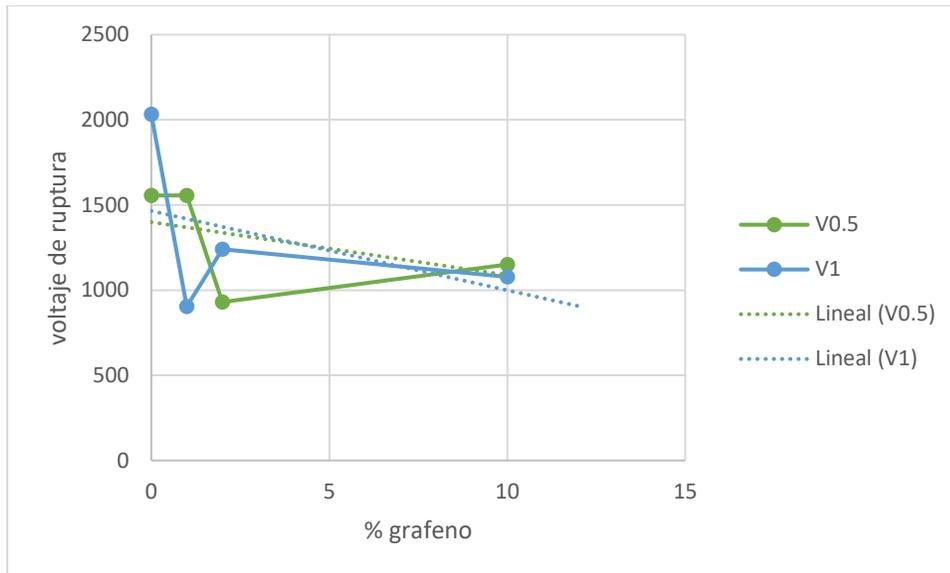
**Figura 5-1:** Porcentaje de grafeno vs corriente Megger (Autor).



**Figura 5-2:** Porcentaje de grafeno vs resistencia voltaje sostenido



**Figura 5-3:** Porcentaje de grafeno vs voltaje de ruptura prueba voltaje sostenido



## 5.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se obtienen de una recopilación de estudios realizados con PLA y grafeno por medio de impresión 3D, debido a que no se obtuvo resultados al 10% de grafeno no se realizó la simulación de esta membrana. En la tabla 5-3 se muestran los valores que se usaron en la simulación, en el anexo A se detalla el modo de obtención de estas propiedades mecánicas.

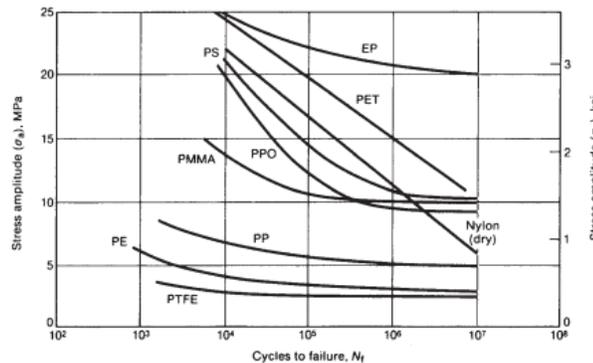
**Tabla 5-3:** Propiedades mecánicas de PLA con grafeno (Autor).

Membrana	Resistencia de ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Resistencia del módulo elástico (MPa)	Deformación unitaria módulo de elasticidad
0 %	43,1	2930	50	0,0147

1 %	35	2846	43	0,0123
2 %	32	2963	40	0,0108
5 %	21,53	2912	30	0,0074

Otro de las propiedades que se van a investigar es la resistencia a la fatiga, permitiendo conocer la vida útil del material y su comportamiento frente a cargas fluctuantes. Por lo que se realizaron los análisis numéricos para la elaboración de la gráfica S-N. En la figura 5-4 se muestra la gráfica S-N para algunos polímeros convencionales, de los cuales el PLA debe obtener un comportamiento parecido y no muy alejado a estos.

**Figura 5-4:** Diagrama S-N de polimeros convencionales [40].



Para el calculo de la resistencia a la fatiga se utilizo el metodo vida - No de ciclos, el cual ofrece mayor sencillas y es el mas comun en las graficas de fatiga, sin embargo es el metodo menos preciso. Se uso de referencia el libro de Diseño en Ingenieria mecanica de Shigley capitulo 6 de donde se relaciona el numero de ciclos y la resistencia a fatiga de la siguiente manera

$$S_f = aN^b$$

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{f S_{ut}}{s_e} \right)$$

Sf= resistencia a la fatiga

Sut= resistencia a ruptura

F= fraccion de resistencia a la fatiga de Sut figura 5-2.

Se= 0,4Sut

Para la fraccion de resistencia de fatiga se utilizo la figura 5-5 y se determino un valor para Se= 0,4\*sut debido a que los polimeros presentan un menor rendimiento a la fatiga que los metales, en el cual el factor es de 0,5\*Sut. Se utilizaron los numeros de ciclo de  $10^3$  y  $10^7$  para el intervalo finito de ciclos, debido a que la mayoria de materiales presentan dichos valores. Por ultimo se realizo el calculo de B, que es un parametro de pendiente de la grafica que requiere el software para la simulacion, mediante la siguiente formula [41]:

$$B = \frac{\log(S_u) - \log(S_f)}{\log(N_1) - \log(N_2)}$$

Su= esfuerzo maximo de resistencia a fatiga

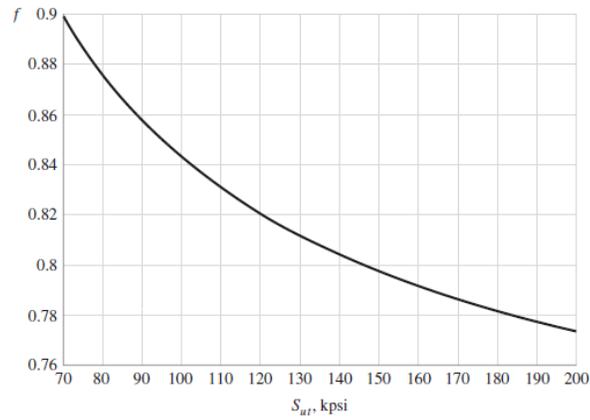
Sf=resistencia a fatiga

N1= numero de ciclos del comienzo de etapa finita

N2= numero de ciclos del final de etapa finita

En la tabla 5-4 se presentan los resultados obtenido de los calculos realizados.

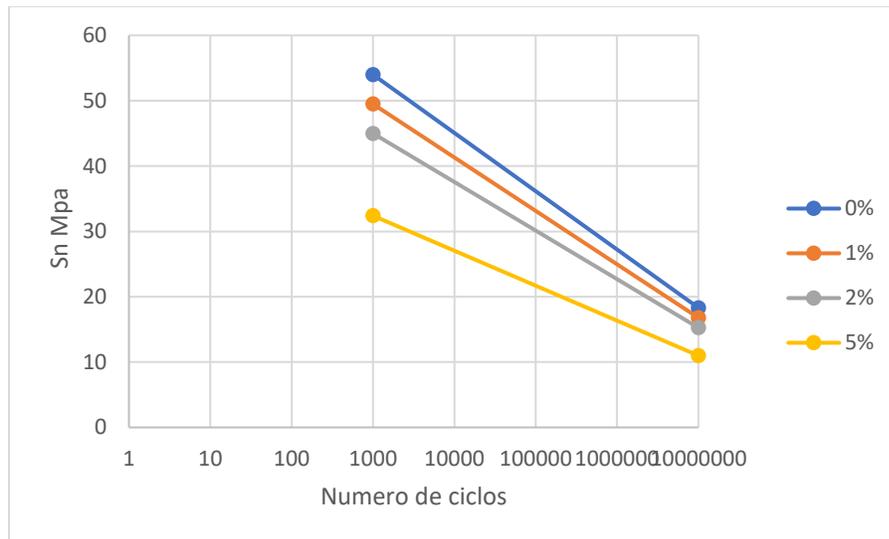
**Figura 5-5:** Fracción de resistencia a la fatiga  $f$ , de la resistencia ultima entre  $10^3$  y  $10^6$  ciclos [42].



**Tabla 5-4:** Valores calculados del diagrama S-N de las membranas electrohiladas de PLA con grafeno (Autor).

Membrana	N máx.	N min	Su (MPa)	Sf (MPa)	B
0%	10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup>	54	18,31	0,11742
1%			49,5	16,79	0,1173
2%			45	15,26	0,1174
5%			32,4	10,99	0,11738

**Figura 5-6:** Grafica S-N de membranas de PLA con Gr (Autor).

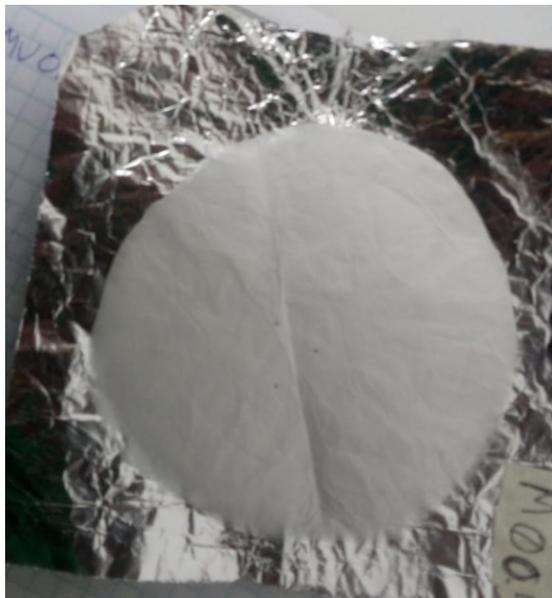


Cabe resaltar que los valores obtenidos para llevar a cabo la gráfica S-N de la figura 5-6 se obtuvieron calculando el esfuerzo a fatiga teóricamente plasmados en la tabla 5-4, y no se llevaron a cabo ensayos físicos para la obtención de estos valores.

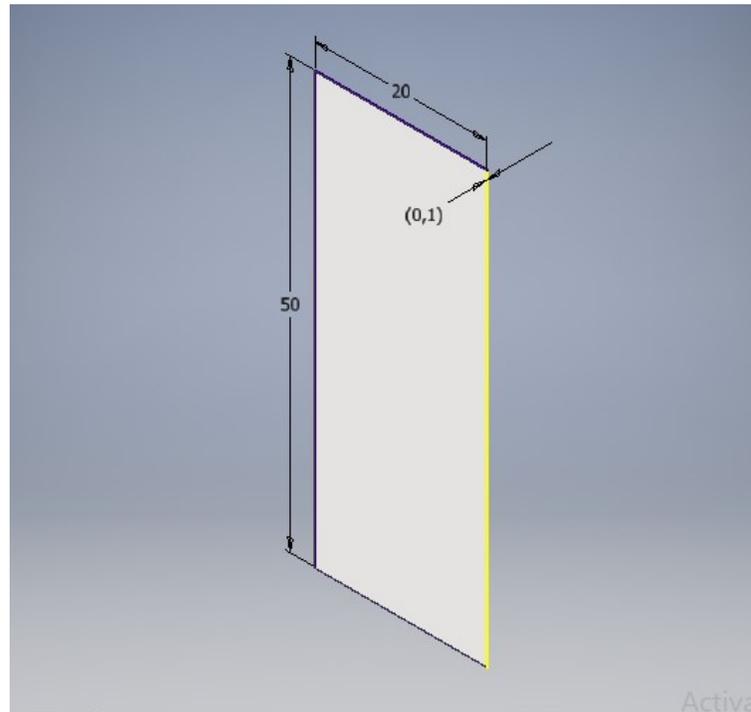
## 6. Simulación dinámica

La simulación se llevó a cabo en el software de Autodesk Inventor 2018 con el módulo Nastran In Cad, pasando de un análisis de tensión convencional a un análisis por elementos finitos; entre los ensayos que se pueden realizar están estáticos, modales, fatiga, respuesta transitoria, transferencia de calor. Los análisis que se llevaron a cabo son los de respuesta transitoria no lineal, respuesta a frecuencia modal y fatiga multiaxial. La membrana generada por el electrohilado se muestra en la figura 6-1, para las 3 simulaciones se utilizó una probeta con dimensiones de 20 mm de ancho por 50 mm de alto y un espesor de 0,1 mm como se muestra en la figura 6-2 [43].

**Figura 6-1:** Membrana electrohilada de PLA con grafeno (Autor).



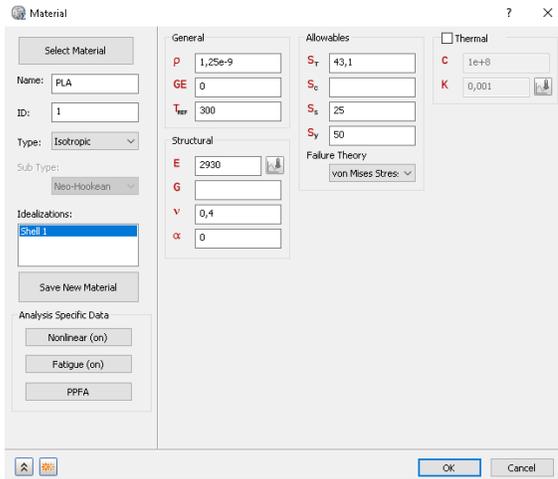
**Figura 6-2:** Dimensiones de membranas de PLA con grafeno (Autor).



## 6.1 Simulación respuesta transitoria no lineal

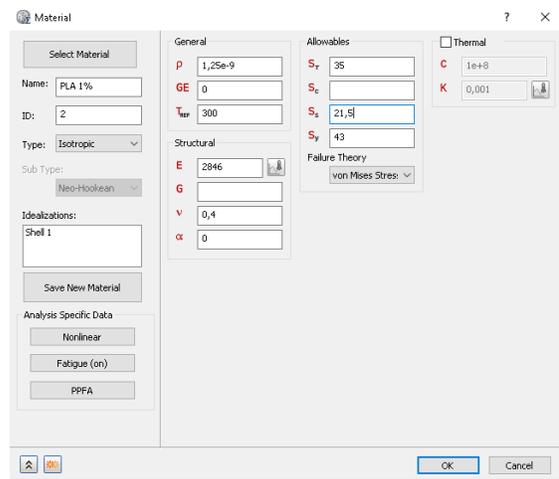
El análisis de respuesta transitoria no lineal permite verificar el comportamiento de materiales que poseen una deformación no lineal frente a una carga que aumenta con el transcurso del tiempo, desarrollando una prueba de esfuerzo deformación del material. Para el desarrollo primero se le asignaron las propiedades no lineales de la membrana de acuerdo a la información recopilada de estudios previos, ver tabla 5-3, como se muestra en la figura 6-3. La carga aumentaba proporcionalmente con los pasos como se ve en la figura 6-4, en total se realizaron 20 pasos y se analizaron los puntos críticos de deformación que son el límite elástico y la resistencia última a tracción. El software presenta una respuesta esfuerzo deformación real por lo que la resistencia última a tensión es la misma que la resistencia máxima.

**Figura 6-3:** Propiedades mecánicas de membrana electrohilada de PLA con grafeno a) 0%, b) 1%, c) 2%, d) 5% (Autor)



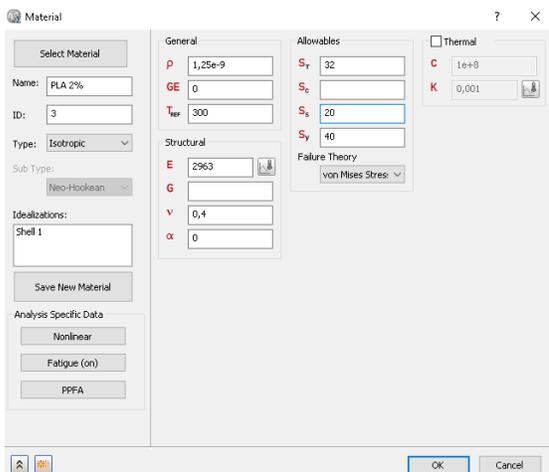
Property	Value
Name	PLA
ID	1
Type	Isotropic
Sub Type	Neo-Hookean
Idealizations	Shell 1
Analysis Specific Data	Nonlinear (on), Fatigue (on), PFFA
General	P: 1,25e-9, GE: 0, T <sub>ref</sub> : 300
Structural	E: 2930, G: , v: 0,4, α: 0
Allowables	S <sub>t</sub> : 43,1, S <sub>c</sub> : , S <sub>s</sub> : 25, S <sub>y</sub> : 50
Failure Theory	von Mises Stress
Thermal	C: 1e+8, K: 0,001

a) 0% grafeno



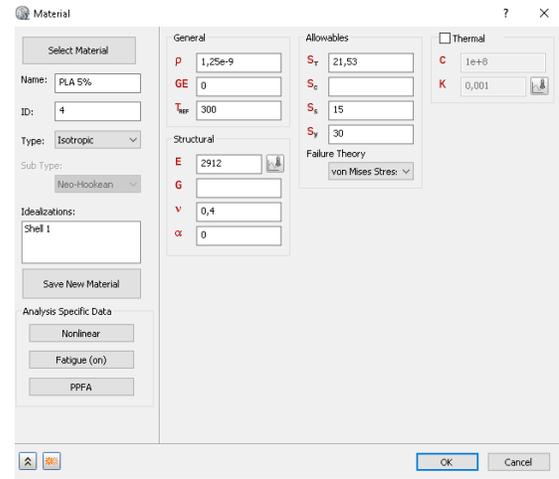
Property	Value
Name	PLA 1%
ID	2
Type	Isotropic
Sub Type	Neo-Hookean
Idealizations	Shell 1
Analysis Specific Data	Nonlinear, Fatigue (on), PFFA
General	P: 1,25e-9, GE: 0, T <sub>ref</sub> : 300
Structural	E: 2846, G: , v: 0,4, α: 0
Allowables	S <sub>t</sub> : 35, S <sub>c</sub> : , S <sub>s</sub> : 21,5, S <sub>y</sub> : 43
Failure Theory	von Mises Stress
Thermal	C: 1e+8, K: 0,001

b) 1% grafeno



Property	Value
Name	PLA 2%
ID	3
Type	Isotropic
Sub Type	Neo-Hookean
Idealizations	Shell 1
Analysis Specific Data	Nonlinear, Fatigue (on), PFFA
General	P: 1,25e-9, GE: 0, T <sub>ref</sub> : 300
Structural	E: 2963, G: , v: 0,4, α: 0
Allowables	S <sub>t</sub> : 32, S <sub>c</sub> : , S <sub>s</sub> : 20, S <sub>y</sub> : 40
Failure Theory	von Mises Stress
Thermal	C: 1e+8, K: 0,001

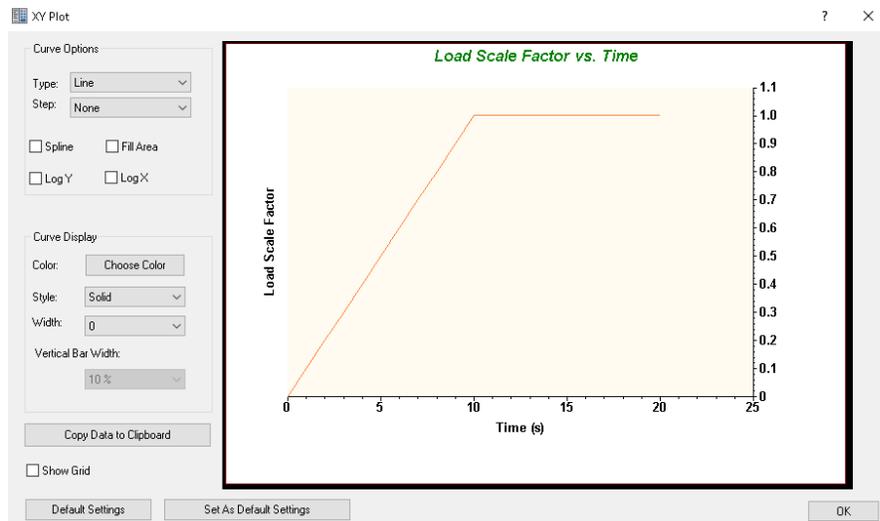
c) 2% grafeno



Property	Value
Name	PLA 5%
ID	4
Type	Isotropic
Sub Type	Neo-Hookean
Idealizations	Shell 1
Analysis Specific Data	Nonlinear, Fatigue (on), PFFA
General	P: 1,25e-9, GE: 0, T <sub>ref</sub> : 300
Structural	E: 2912, G: , v: 0,4, α: 0
Allowables	S <sub>t</sub> : 21,53, S <sub>c</sub> : , S <sub>s</sub> : 15, S <sub>y</sub> : 30
Failure Theory	von Mises Stress
Thermal	C: 1e+8, K: 0,001

d) 5% grafeno

**Figura 6-4:** Factor de carga vs tiempo (Autor)



El software utiliza el metodo de Von Misses para calcular el esfuerzo generado en la membrana de PLA con grafeno. Este metodo predijo que la falla por fluencia en materiales ductiles se generaban cuando la energia de deformacion total por unidad de volumen alcanza o supera la energia de deformacion correspondiente a la resistencia de fluencia y se calcula con la siguiente ecuacion [42].

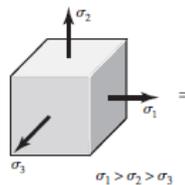
$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq S_y$$

$\sigma_1$  = esfuerzo en x

$\sigma_2$  = esfuerzo en y

$\sigma_3$  = esfuerzo en z

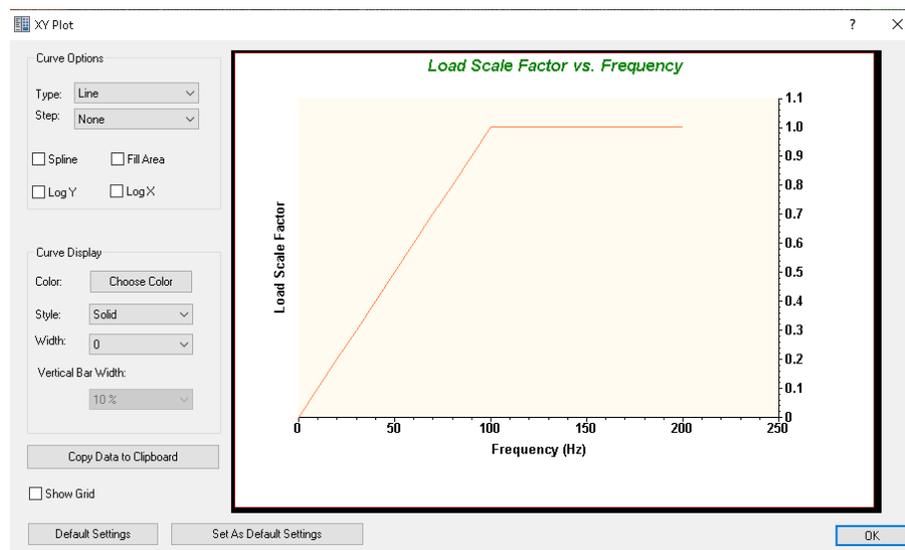
**Figura 6-5:** Esfuerzos principales unitarios [42].



## 6.2 Simulación de respuesta de frecuencia modal

La simulación de frecuencia modal corresponde a la aplicación de una carga y una vibración senoidal el cual afectara el material llevándolo a la deformación y en algunos casos a su falla. Para este estudio los parámetros de carga se muestran en la figura 6-8, donde la carga para todas las membranas fue de 10 N que genera un esfuerzo de 5 MPa y se analizó el punto en el que llegan al límite elástico, obteniendo los valores en los que las membranas se deforma en su zona elástica. La frecuencia con la que inicia el ensayo es 0 y aumenta hasta 100 Hz con intervalos de 5 Hz para un total de 20 pasos, el aumento de la frecuencia se realizó de forma lineal, en la figura se ve la interfaz de usuario del programa.

**Figura 6-6:** Diagrama de factor de carga vs la frecuencia (Autor).



El análisis modal utiliza un análisis dinámico donde se toma el modo como un vector y se requiere un análisis matricial donde las variables que interfieren son la masa del sistema, la rigidez, la amortiguación y las cargas aplicadas. La ecuación utilizada por el sistema se describe en la siguiente ecuación [44].

$$|[k] - \lambda[M]|\{\phi\} = 0$$

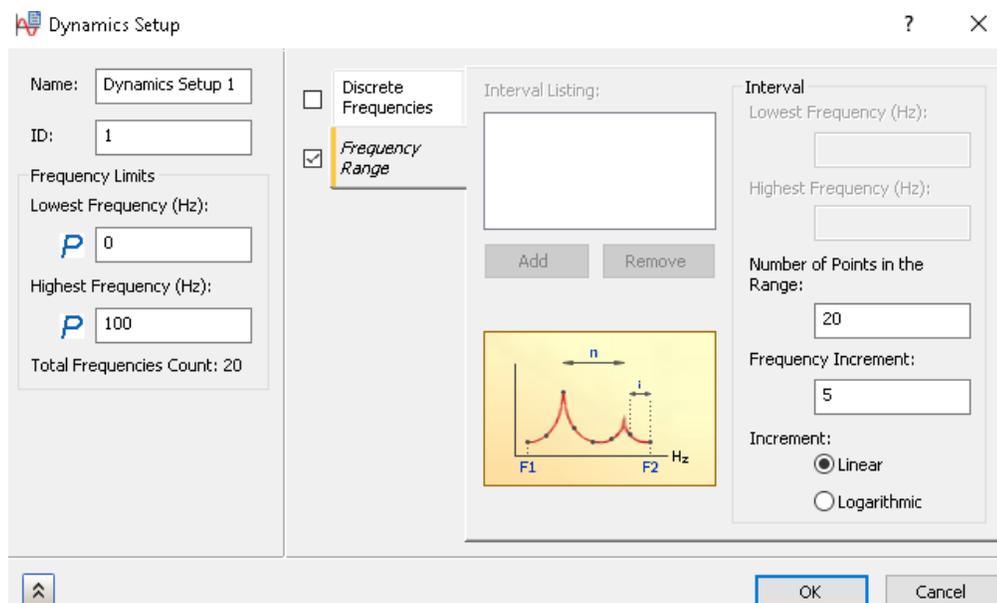
$[K]$  = matriz de rigidez lineal global

$\lambda$  = valor propio para cada modo que produce la frecuencia natural

$[M]$  = matriz de masa global

$\{\Phi\}$  = vector propio para cada modo que presenta la forma de modo natural

**Figura 6-7:** Interfaz de usuario para la preparación de la prueba (Autor).

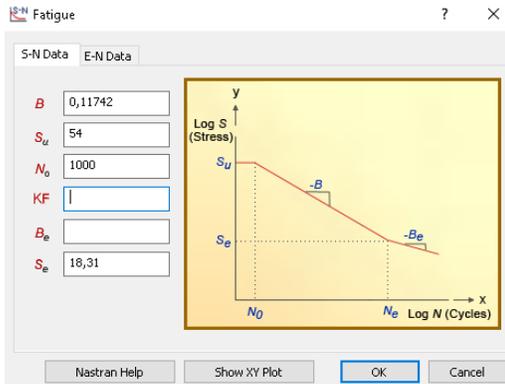


### 6.3 Ensayo multiaxial de fatiga

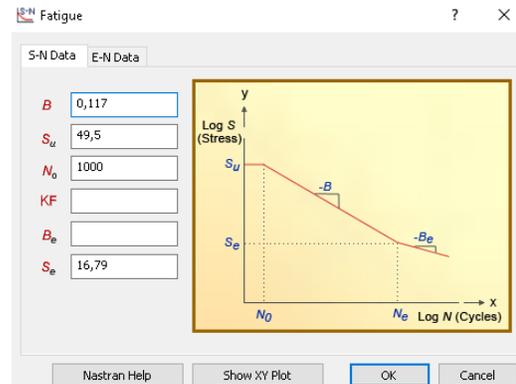
El ensayo de fatiga multiaxial permite verificar la vida útil del material frente a diversas cargas fluctuantes, en el caso del proyecto solo se analizará una carga que es perpendicular al eje x. En el capítulo 5 se encontraron los valores de la gráfica S-N con los cuales el software desarrollará la simulación, la carga aplicada genera un esfuerzo de 30 Mpa en todas las membranas y se realiza una fluctuación entre un rango de 0 y 100% de la carga total como lo muestra la figura 6-8. Debido a que la membrana no opone resistencia a tracción por las dimensiones que posee no se realizará una carga fluctuante

a compresion. Se obtuvo el numero de ciclos en los cuales se encuentra el material y se hizo una comparacion de los resultados en el capitulo 7, y los valores de interfaz de fatiga corresponden a los hallados en la tbla 5-4.

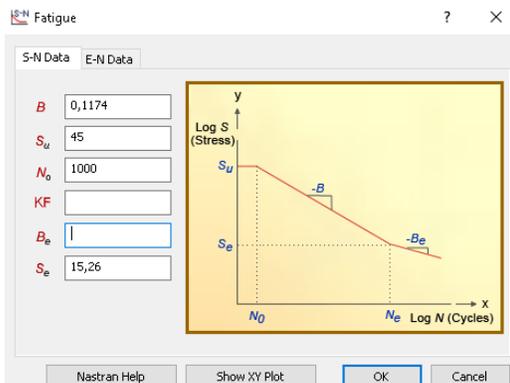
**Figura 6-8:** Valores de interfaz de fatiga a) 0%, b) 1%, c) 2%, d) 5% (Autor)



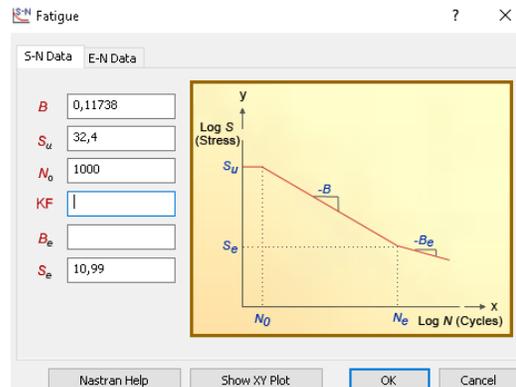
a) 0% grafeno



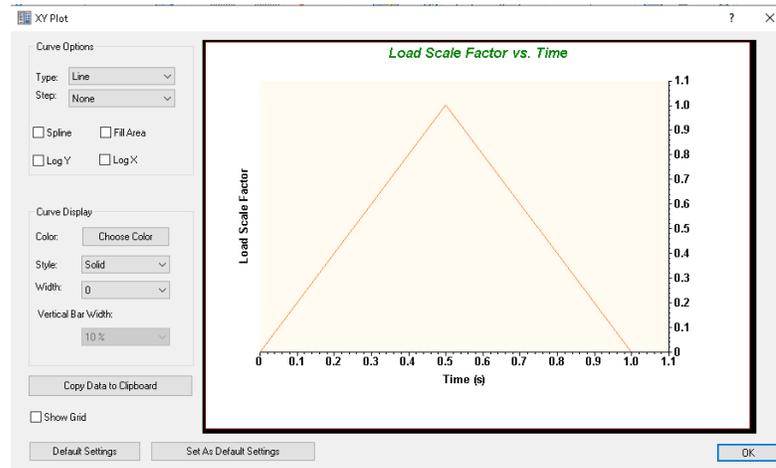
b) 1% grafeno



c) 2% grafeno



d) 5% grafeno

**Figura 6-9:** Factor de carga vs tiempo (Autor).

Los resultados que se analizarán serán los de el número de ciclos que soportan las diferentes membranas a un esfuerzo de 30 Mpa, el software al calculara el valor de esfuerzo teniendo en cuenta la culminación de cada ciclo, por lo tanto el esfuerzo estará entre valores cercanos a 30 Mpa. Este es un valor arbitrario en el que se encuentran las cuatro membranas de la gráfica S–N, por lo que en el ensayo se tendrá un número de ciclos en todas las membranas.

El modelo matemático utilizado por el software es el mismo descrito en el capítulo 5 sección de propiedades mecánicas de las membranas de PLA con grafeno, por lo tanto no se describirá en este capítulo [41].

## 7. Analisis de resultados

### 7.1 Ensayo de tension

Los resultados obtenidos por el software de la deformacion de la membrana en el limite elastico y en el limite de ruptura se presentan a continuacion, la tabla 7-1 muestra mas detalladamente la deformacion que iba sufriendo la membrana a medida que aumentaba el esfuerzo generado por la carga, y la deformacion unitaria que se calcula con la siguiente ecuacion.

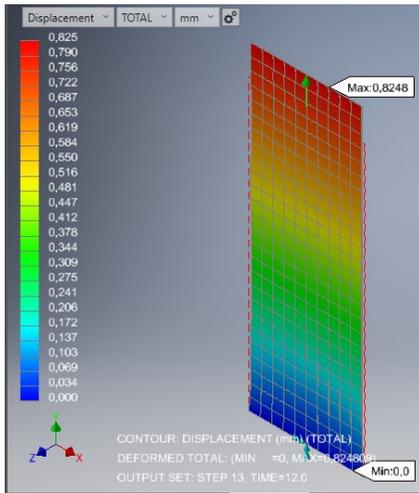
$$\delta = \frac{L_f - L_i}{L_i}$$

$\delta$  = deformacion unitaria

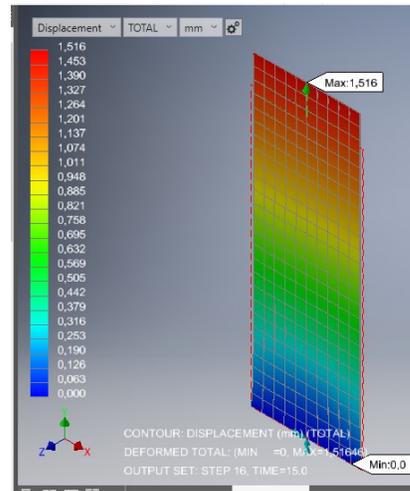
$L_i$  = longitud inicial

$L_f$  = longitud final

**Figura 7-1:** Desplazamiento membrana de 0% a) limite elástico b) ruptura (Autor).

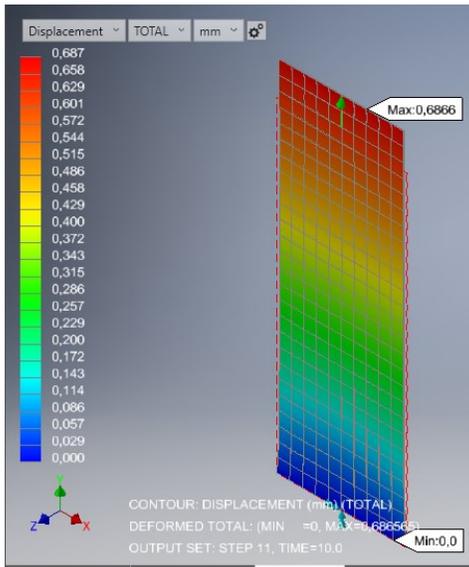


a) Limite elástico

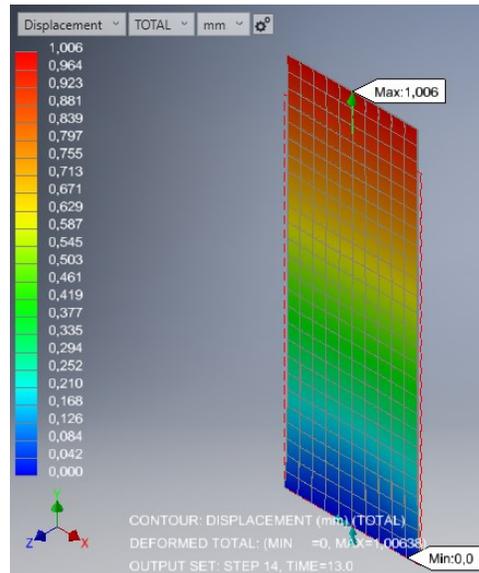


b) ruptura

**Figura 7-2:** Desplazamiento membrana de 1% a) limite elástico b) ruptura (Autor)

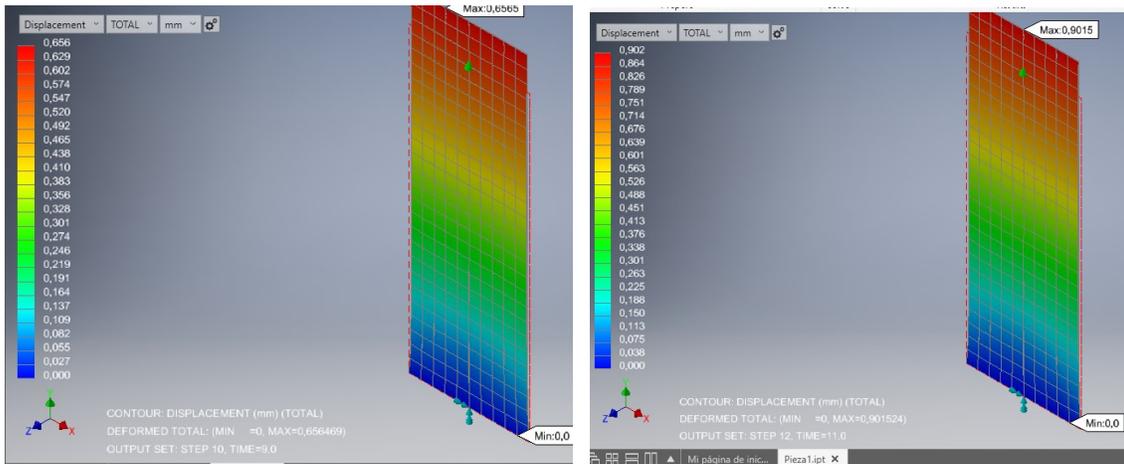


a) Limite elástico

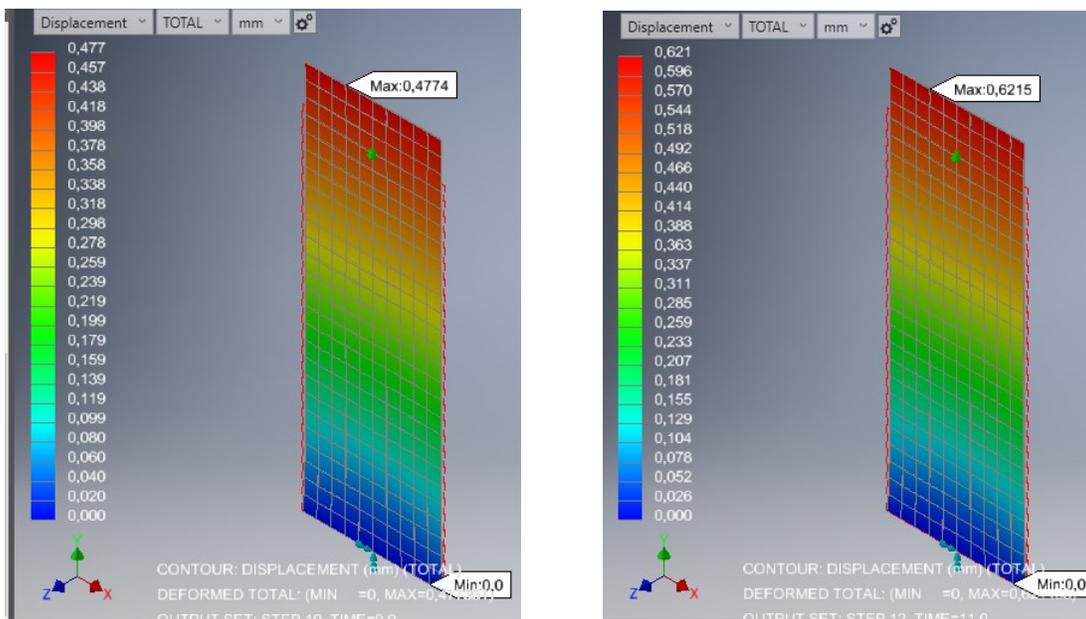


b) ruptura

**Figura 7-3:** Desplazamiento membrana de 2% a) limite elástico b) ruptura (Autor).



**Figura 7-4:** Desplazamiento de membrana de 5% a) limite elástico b) ruptura (Autor)



**Tabla 7-1:** Valores de esfuerzo, desplazamiento y deformación para la membrana de 0% de grafeno.

<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
0	0	0
50,917	0,825	0,0165
54,96	1	0,02
58,36	1,259	0,02518
62,405	1,516	0,03032

**Tabla 7-2:** Valores de esfuerzo, desplazamiento y deformación para la membrana de 1% de grafeno.

<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
0	0	0
43	0,687	0,01374
45,572	0,759	0,01518
50,917	0,825	0,0165
53,959	1,1	0,022

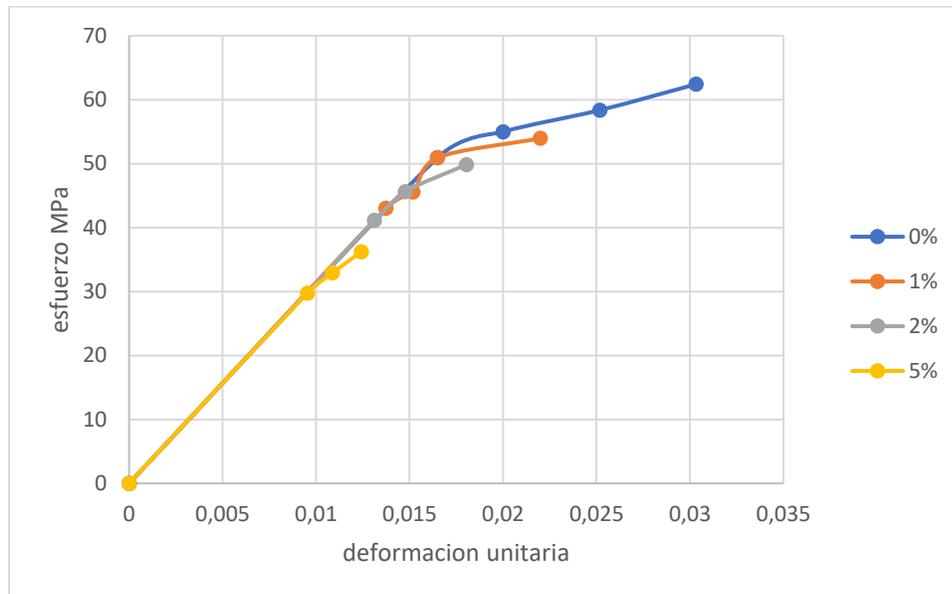
**Tabla 7-3:** Valores de esfuerzo, desplazamiento y deformación para la membrana de 2% de grafeno.

<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
0	0	0
41,107	0,656	0,01312
45,613	0,739	0,01478
49,84	0,902	0,01804

**Tabla 7-4:** Valores de esfuerzo, desplazamiento y deformación para la membrana de 5% de grafeno.

<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	<b>Desplazamiento (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
0	0	0
29,744	0,477	0,00954
32,899	0,544	0,01088
36,209	0,621	0,01242

**Figura 7-5:** Grafica esfuerzo deformacion de membranas electrohiladas de PLA con grafeno (Autor).



Como se evidencia en los valores de las tabla 7-1 a 7-4 se redujo el esfuerzo ultimo a tension de 60 Mpa con 0% de grafeno a 36 Mpa con 5% de grafeno; igual se evidencia una disminucion de la resistencia del limite de elasticidad de 50 Mpa a 30 Mpa. Por otra parte se tiene una reduccion en la deformacion unitaria pasando de 3% a 1,24% y por medio de la figura 7-5 se puede ver una tendencia a que el material se comporte como fragil ya que a medida que pasa el limite elastico se tiene una pendiente mas empinada y mas corta.

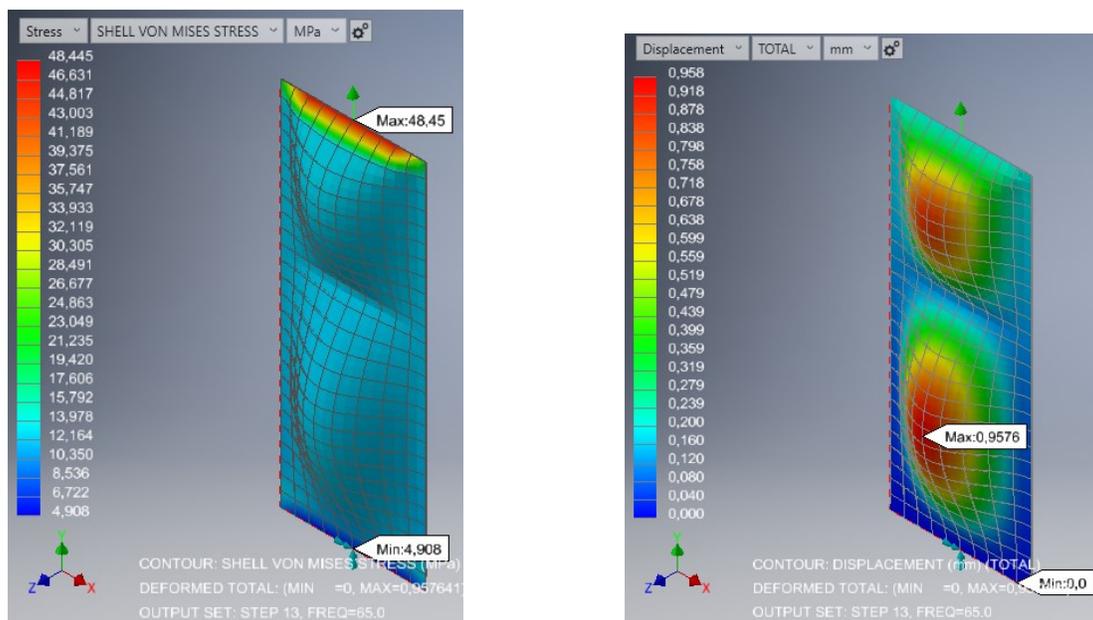
Entre mayor sea el porcentaje de grafeno hasta un 5% en las membranas de PLA las características de esfuerzo y deformación muestran una tendencia a disminuir, esto ocurre por la estructura del grafeno debido a que posee bordes hexagonales puntudos y al no se generar una adecuada dispersion de las moleculas de grafeno en la matriz de PLA [11]. Por otra parte se posee un aumento en las propiedades mecanicas con adiccion de grafeno superior al 20% para tener un aumento en las propiedades de efuerzo a tension, como lo sugiere un estudio realizado en la universidad de cartagena [45].

De la recopilación obtenida de las propiedades mecánicas se puede observar una disminución en la resistencia última de tensión y en la deformación unitaria. Los resultados obtenidos por Nastran In Cad coinciden con los valores recopilados y están dentro de los resultados esperados para la simulación ver anexo A.

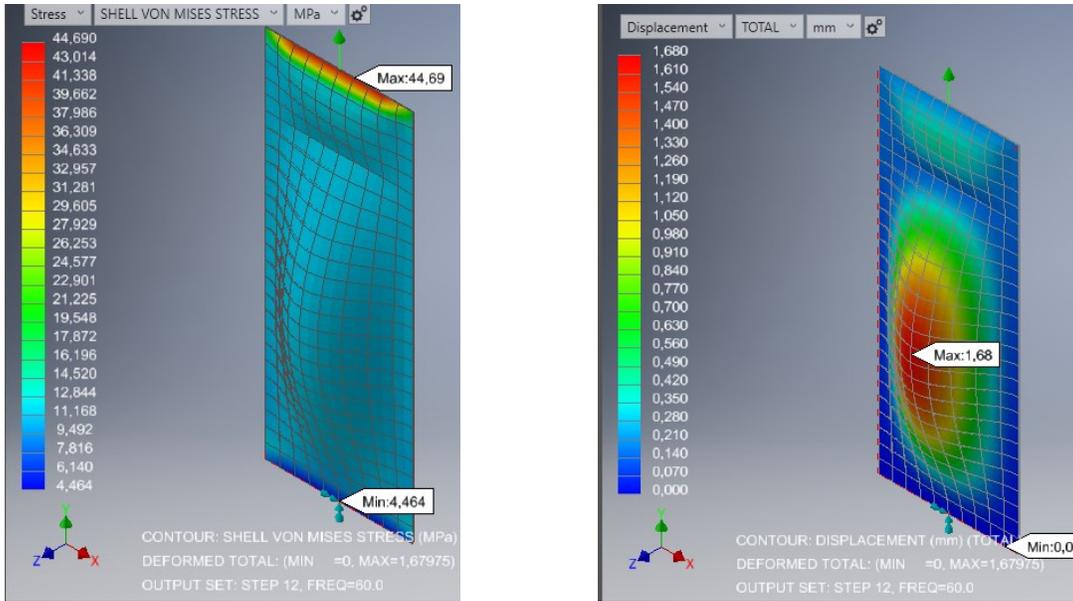
## 7.2 Ensayo modal

Los resultados del software permiten determinar el paso en el que se genera el esfuerzo del límite elástico, por lo que se obtuvo el valor de la frecuencia en y la deformación que generó la frecuencia modal, en las figuras 7-6 a 7-9 se muestra el resultado obtenido en la simulación.

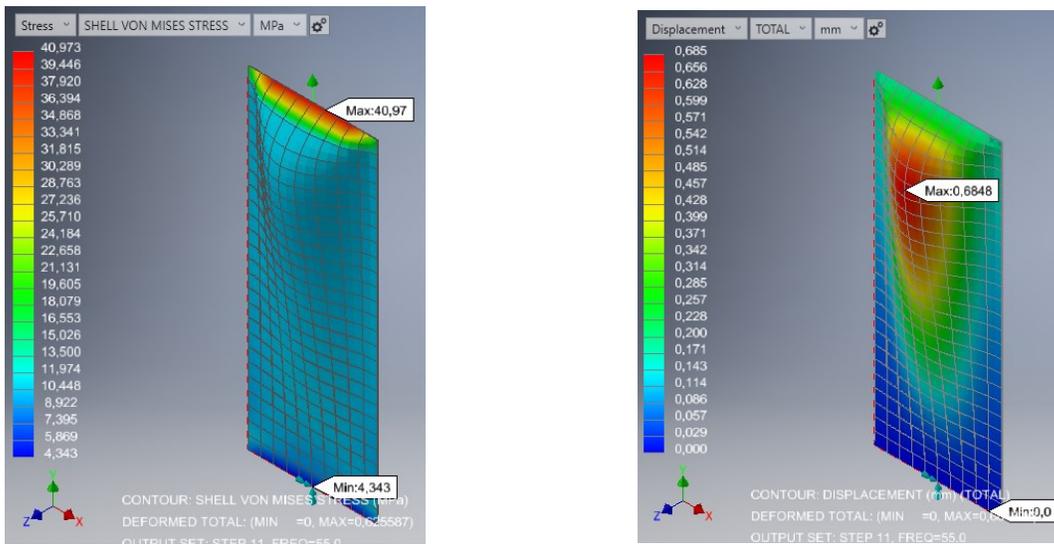
**Figura 7-6:** Esfuerzo y desplazamiento por vibración a membrana de 0% grafeno (Autor).



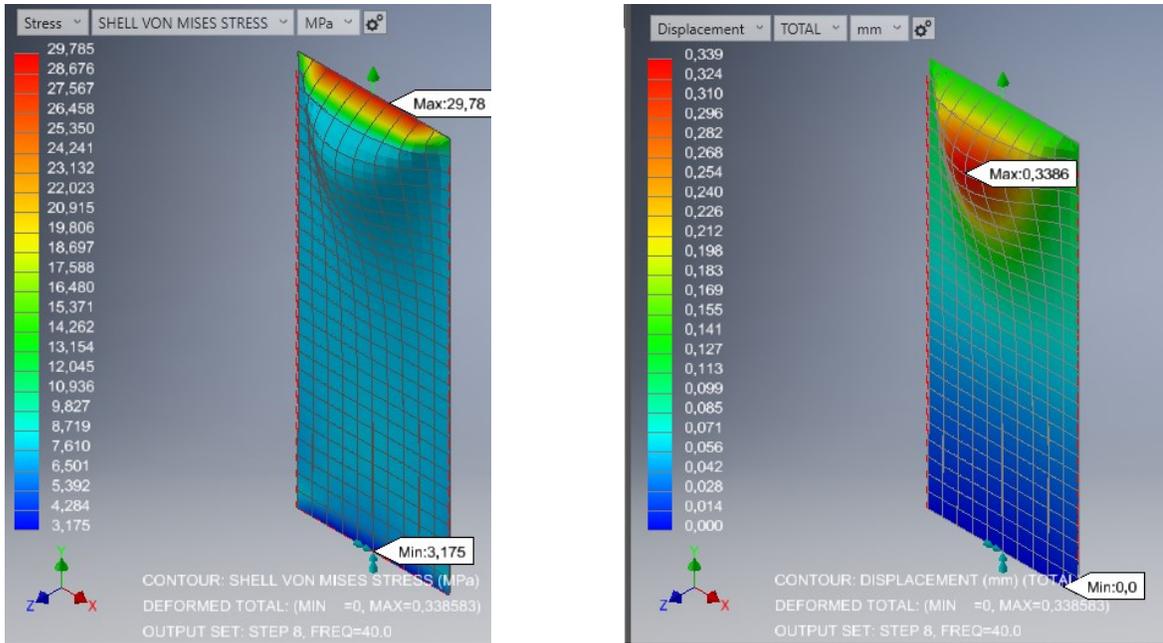
**Figura 7-7:** Esfuerzo y desplazamiento .por vibraciones para membranas de 1% de grafeno (Autor).



**Figura 7-8:** Esfuerzo y desplazamiento .por vibraciones a membrana de 2% de grafeno (Autor).



**Figura 7-9:** Esfuerzo y desplazamiento por vibraciones a membrana de 5% grafeno (Autor).



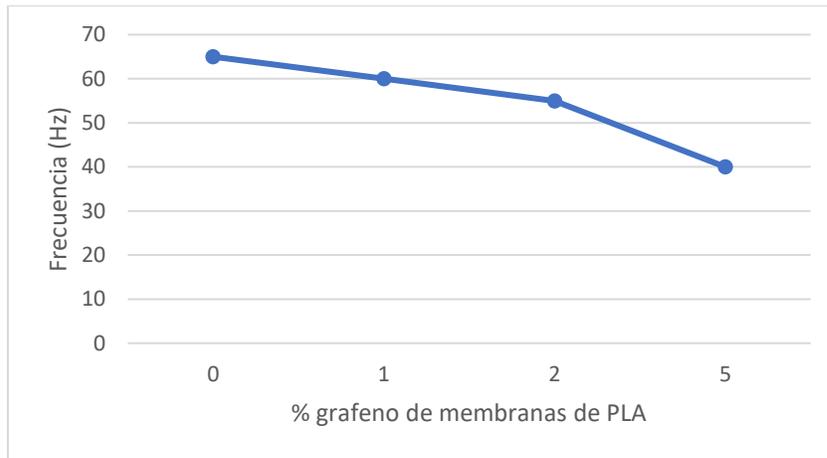
Se tabularon los valores de esfuerzo, deformación, frecuencia modal y la magnitud de la fuerza obtenida por el software, en la tabla 7-5 se presentan estos resultados.

**Tabla 7-5:** Resultados de la simulación de ensayo de respuesta transitoria modal (Autor).

Membrana de PLA con refuerzo en % de grafeno	Esfuerzo (Mpa)	Desplazamiento (mm)	Frecuencia modal (Hz)	Carga a tensión (N)
0	48,445	0,958	65	6,5
1	44,69	1,68	60	6
2	40,973	0,665	55	5,5

5	29,785	0,339	40	4
---	--------	-------	----	---

**Figura 7-10:** Porcentaje de grafeno vs frecuencia modal (Autor).

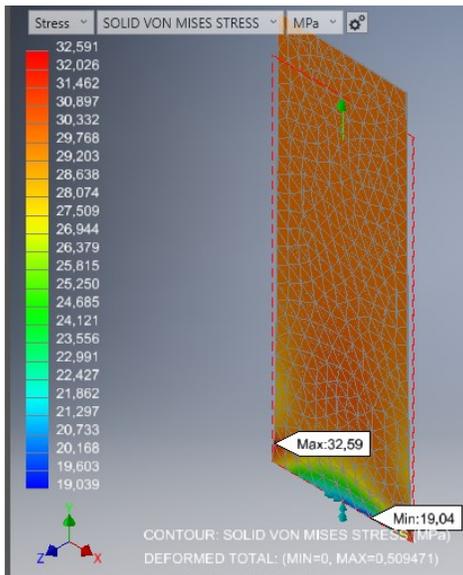


Se puede evidenciar en la figura 7-10 hay un descenso de la frecuencia a la que el material presenta la resistencia al límite de elasticidad, pasando de 65 Hz a 40 Hz. Por otra parte, en la tabla 7-5 se observa una disminución en el desplazamiento y en la carga a la cual se produce la frecuencia, donde en la membrana de 0% de grafeno presenta una carga de 6,5 N y la de 5% de grafeno de 4 N. Esto se debe a que el aumento en el porcentaje de grafeno y una mala dispersión en la matriz polimérica genera una disminución en la ductilidad del material por lo tanto se tiende a la fragilidad [46]. Las cargas aplicadas a la membrana no alcanzan a los 5 Mpa a tensión por lo tanto la membrana no soporta bajas vibraciones a cargas pequeñas.

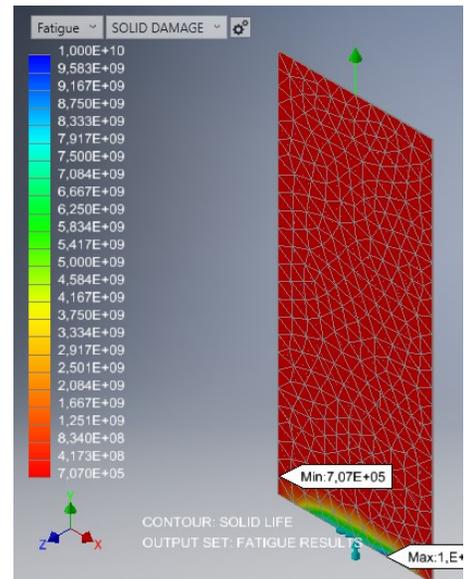
### 7.3 Ensayo de fatiga

Se obtuvieron los valores del número de ciclos de vida frente al esfuerzo aplicado de 30 Mpa, de la figura 7-11 a 7-14 se muestra el resultado obtenido por el simulador, donde se presenta el número de ciclos y el esfuerzo generado.

**Figura 7-11:** Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 0% de grafeno (Autor).

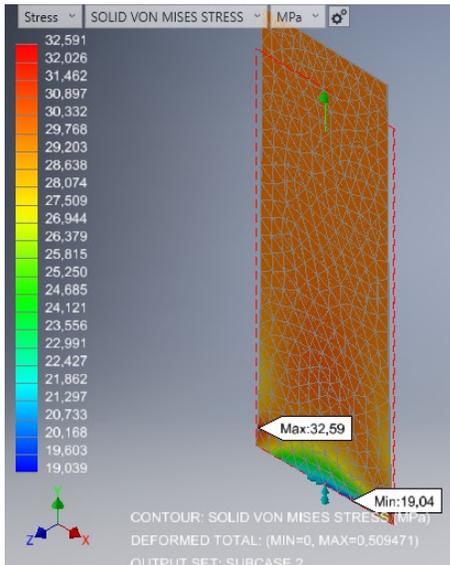


**a)** esfuerzo a fatiga

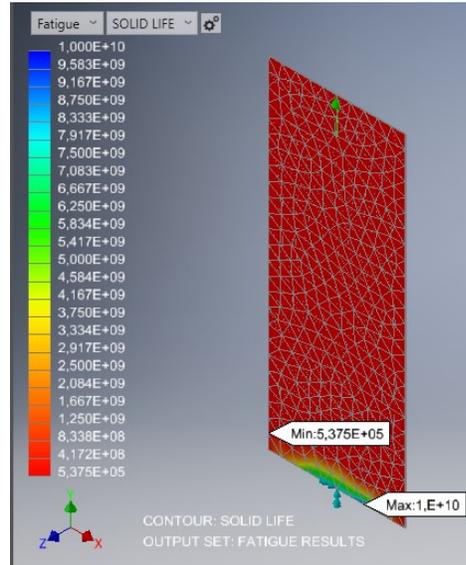


**b)** numero de ciclos

**Figura 7-12:** Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 1% grafeno (Autor).

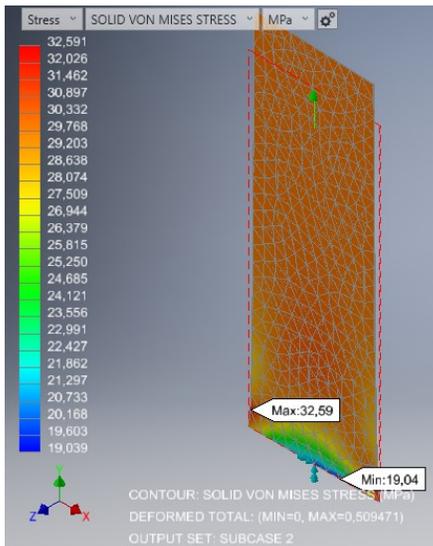


**a)** esfuerzo a fatiga

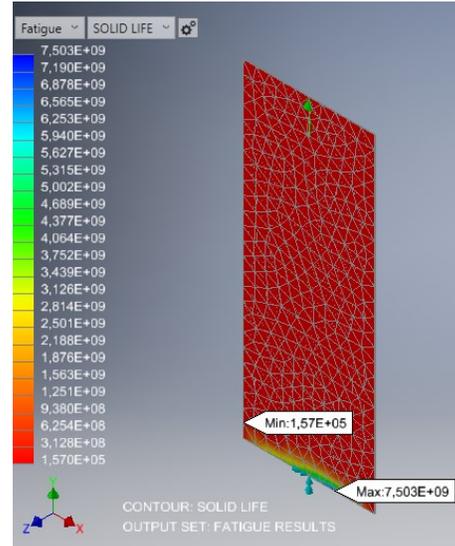


**b)** numero de ciclos

**Figura 7-13:** Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 2% de grafeno (Autor).

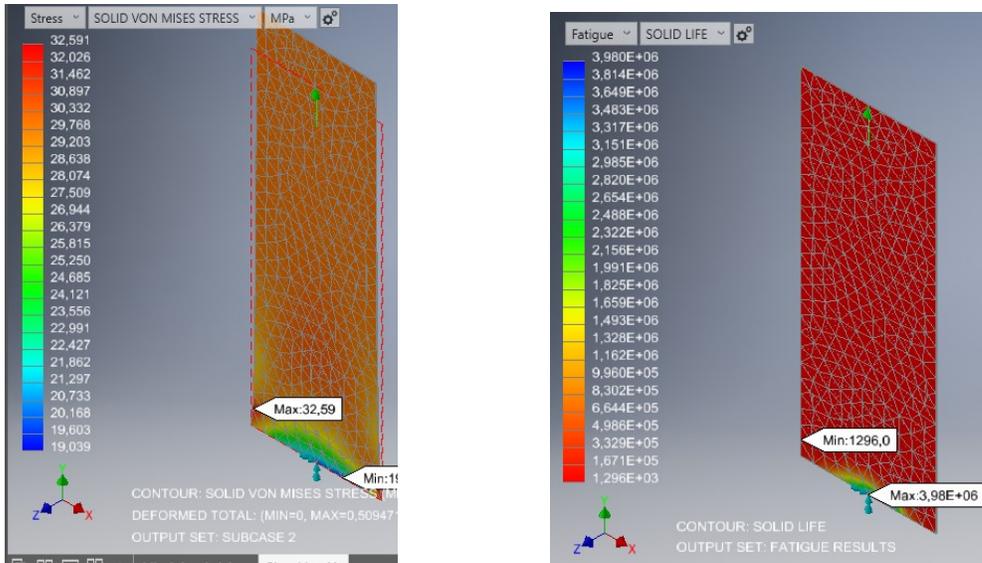


**a)** esfuerzo a fatiga



**b)** numero de ciclos

**Figura 7-14:** Esfuerzo y numero de ciclos de membrana de PLA con 5% de grafeno (Autor).



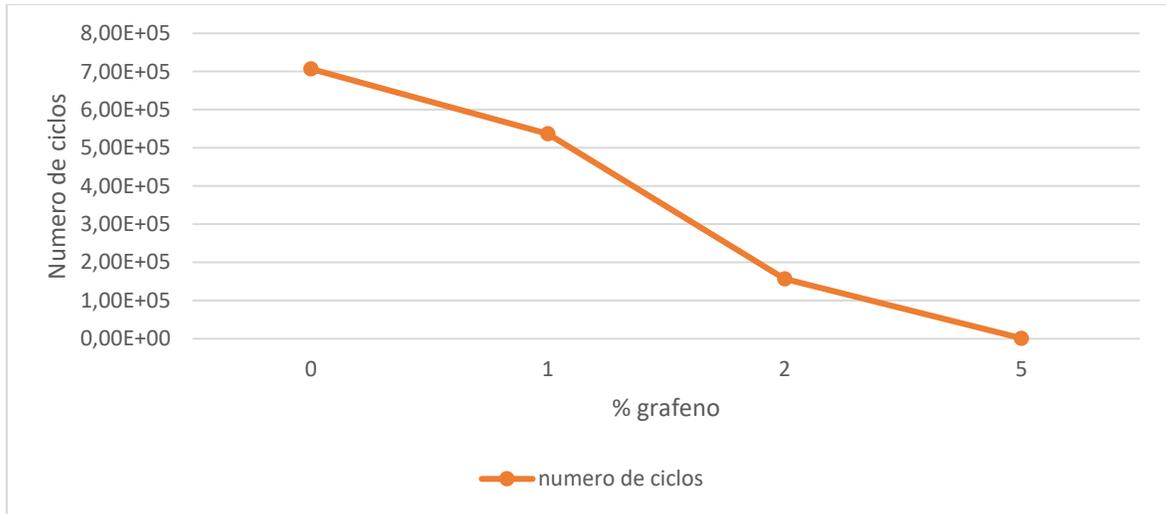
**a)** esfuerzo a fatiga

**b)** numero de ciclos

Se puede observar que el esfuerzo generado es mayor a 30 Mpa, esto se debe a que el programa trabaja con el método de Von Mises y toma en cuenta la reducción del área transversal donde esta aplicada la carga a tensión. Los resultados obtenidos por el software se presentan en la tabla 7-6.

**Tabla 7-6:** Resultados de simulación de análisis de fatiga.

Membrana de PLA con % de grafeno	Sf (MPa)	Numero de ciclos de vida
0	32,591	7,07E+5
1		5,37E+5
2		1,57E+5
5		1,296E+3

**Figura 7-15:** Grafica de % grafeno vs número de ciclos de vida.

Se observa una disminución del número de ciclos de vida que presentan las membranas de PLA con el aumento del grafeno de donde se disminuye de  $7,07E+5$  a  $1,296E+3$  de ciclos. Si se comparan los valores obtenidos con la gráfica S-N, capítulo 5 del presente estudio, se encuentra una gran similitud del número de ciclos de la simulación con los valores teóricos obtenidos. La deformación generada por el ensayo se analizó con la simulación de respuesta directa no lineal, por lo tanto, la deformación corresponde a 0,544 mm, ver sección 7-1.

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

### **8.1 Conclusiones**

Se puede concluir que las membranas electrohiladas de PLA con Gr muestran un aumento en la conductividad eléctrica ya que presenta una disminución en la resistencia al flujo de corriente, por lo tanto, se puede aplicar en ambientes donde se desee alguna interacción eléctrica.

El software Inventor y el módulo Nastran in Cad mostro resultados esperados, por lo que sirve para verificar el comportamiento mecánico de las membranas.

Las membranas de PLA se comportan como materiales frágiles a medida que aumenta el porcentaje de relleno debido a que no se genera una adecuada dispersión del este en la matriz y genera perdida de ductilidad del polímero, esto produce una disminución en los valores de la deformación unitaria impidiendo la generación de pico de botella que presentan sin relleno. Por otra parte, presenta deformaciones significativas a cargas relativamente pequeñas,

Frente al comportamiento que presenta el material a frecuencias senoidales se encuentra una disminución de la frecuencia a la cual las membranas alcanzan el límite elástico de acuerdo con el aumento del porcentaje de grafeno. Estas membranas no presentaran fallo mientras las vibraciones sean de poca intensidad y la carga sea pequeña, se debe tener en cuenta al momento de su aplicación para no tener fallos en la medición.

Se encontró que el aumento del porcentaje de grafeno hasta el 5% de relleno presenta una disminución de los ciclos de vida de la membrana, debido a la fragilidad que va adquiriendo el polímero.

## **8.2 Recomendaciones**

Se recomienda llevar a cabo estudios experimentales a las membranas electrohiladas de PLA con Grafeno para determinar con mayor exactitud del comportamiento mecánico, ya que se recurrió a otros materiales similares para la extracción de las propiedades requeridas para las simulaciones dinámicas y de tensión. También se recomienda realizar estas membranas con mayores porcentajes de grafeno y determinar el porcentaje en el cual se logra una adecuada distribución del relleno en la matriz polimérica [45].







## Bibliografía

- [1] J. M. Arandes, J. Bilbao, y D. L. Valerio, «RECICLADO DE RESIDUOS PLÁSTICOS», p. 18, 2004.
- [2] D. Segura, «Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables», p. 13.
- [3] F. Zuluaga, «ALGUNAS APLICACIONES DEL ÁCIDO POLI-L-LÁCTICO», p. 18, 2013.
- [4] A. González y P. Andrés, «Desarrollo de compósitos de ácido poliláctico y derivados del grafito para aplicaciones biomédicas», 2016, Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140679>.
- [5] R. A. Delgado, «Grafeno (Material del futuro)», *México Inst. Tecnológico Super. Zacatecas Sur Obtenido Silicon Es Httpswww Silicon Esal-Final.-El-Adamantium-Compuesto--Grafeno-500-Veces-Mas-Resist.-Que-Laversion-Orig.-112384*, 2015.
- [6] P. A. A. GONZÁLEZ, «DESARROLLO DE COMPÓSITOS DE ÁCIDO POLILÁCTICO Y DERIVADOS DEL GRAFITO PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS», PhD Thesis, UNIVERSIDAD DE CHILE, 2016.
- [7] M. H. Munilla y G. B. Carracedo, «Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias», *ICIDCA Sobre Los Deriv. Caña Azúcar*, vol. 39, n.º 1, pp. 49–59, 2005.
- [8] C. R. González y O. V. Kharissova, «Propiedades y aplicaciones del grafeno», n.º 38, p. 7, 2008.
- [9] F. S. William y J. Hashemi, «Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales», *Editor. McGraw-Hill*, 1998.
- [10] K. Shinyama y S. Fujita, «Mechanical and Dielectric Breakdown Properties of Biodegradable Plastics», *電気学会論文誌 a (基礎・材料・共通部門誌)*, vol. 126, n.º 1, pp. 31-36, 2006, doi: 10.1541/ieejfms.126.31.
- [11] A. M. Pinto, J. Cabral, D. A. P. Tanaka, A. M. Mendes, y F. D. Magalhães, «Effect of incorporation of graphene oxide and graphene nanoplatelets on mechanical and gas permeability properties of poly(lactic acid) films», *Polym. Int.*, vol. 62, n.º 1, pp. 33-40, 2013, doi: 10.1002/pi.4290.
- [12] C. Gonçalves, A. Pinto, A. V. Machado, J. Moreira, I. C. Gonçalves, y F. Magalhães, «Biocompatible reinforcement of poly(Lactic acid) with graphene nanoplatelets», *Polym. Compos.*, vol. 39, n.º S1, pp. E308-E320, 2018, doi: 10.1002/pc.24050.
- [13] F. Zuluaga, «ALGUNAS APLICACIONES DEL ÁCIDO POLI-L-LÁCTICO», *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Físicas Nat.*, vol. 37, n.º 142, pp. 125-142, mar. 2013.
- [14] A. R. Villalón y I. I. Barba, «GRAFENO: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES BIOMÉDICAS», p. 19.
- [15] B. Calderín Pérez, R. A. González Carbonell, M. Landín Sorí, y E. Nápoles Padrón, «Aplicabilidad de la simulación computacional en la biomecánica del disco Óptico», *Rev. Arch. Méd. Camagüey*, vol. 19, n.º 1, pp. 73-82, feb. 2015.
- [16] A. K. Mohanty, M. Misra, y L. T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, 2005.

- [17] G. F. Brito, P. Agrawal, E. M. Araújo, y T. J. A. Mélo, «Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes», *Rev. Eletrônica Mater. E Process.*, vol. 6, n.º 2, pp. 127–139, 2011.
- [18] H. S. Villada, H. Acosta, y R. Velasco, «Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables», *Temas Agrar.*, pp. 5-19, jul. 2007, doi: 10.21897/rta.v12i2.652.
- [19] M. G. R. Cortés y B. M. V. Díaz, «Los biopolímeros como materiales para el desarrollo de productos en aplicaciones farmacéuticas y de uso biomédico», p. 16.
- [20] José David Cortés Manrique, «Evaluación del uso de aditivos de origen natural sobre la propiedades del ácido poliláctico (PLA) para su uso como empaque de alimentos», Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia, 2016.
- [21] E. Huber, M. Mirzaee, J. Bjorgaard, M. Hoyack, S. Noghianian, y I. Chang, «Dielectric property measurement of PLA», en *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2016, pp. 0788–0792.
- [22] L. Serna C., A. Rodríguez de S., y F. Albán A., «Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones», *Ing. Compet.*, vol. 5, n.º 1, p. 16, jun. 2011, doi: 10.25100/iyc.v5i1.2301.
- [23] T. Nakagawa, T. Nakiri, R. Hosoya, y Y. Tajitsu, «Electrical properties of biodegradable polylactic acid film», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, n.º 4, pp. 1020–1024, 2004.
- [24] K. Shinyama y S. Fujita, «Study on the electrical properties of a biodegradable plastic», en *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 03CH37417)*, 2003, vol. 2, pp. 707–710.
- [25] Ma. G. Méndez Medrano, H. C. Rosu, y L. A. Torres González, «Grafeno: el alótropo más prometedor del carbono», *Acta Univ.*, vol. 22, n.º 3, pp. 20-23, may 2012, doi: 10.15174/au.2012.381.
- [26] A. Dubey, S. Dave, M. Lakhani, y A. Sharma, «Applications of graphene for communication, electronics and medical fields: A review», en *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, India, mar. 2016, pp. 2435-2439, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755131.
- [27] A. Castro-Beltrán y S. Sepúlveda-Guzmán, «Obtención de grafeno mediante la reducción química del óxido de grafito», n.º 52, p. 9, 2011.
- [28] H. J. S. Muñoz, «Grafeno, el material del futuro y sus aplicaciones médicas», *Rev. Cienc. Tecnol.*, vol. 31, n.º 2, 2015.
- [29] C.-Y. Chen, J.-W. Zheng, K.-P. Hsu, y C.-L. Chung, «A Hollow Nanostructure of Silicon-Based can be produced by Using Electrospinning process», en *2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, Niigata, Japan, abr. 2019, pp. 407-410, doi: 10.23919/ICEP.2019.8733522.
- [30] D. H. Reneker y I. Chun, «Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning», *Nanotechnology*, vol. 7, n.º 3, pp. 216-223, sep. 1996, doi: 10.1088/0957-4484/7/3/009.
- [31] M. A. Robles-García, R.-F. Francisco, E. Márquez-Ríos, A. Barrera-Rodríguez, J. Aguilar-Martínez, y C. L. Del toro-Sánchez, «APLICACIONES BIOMÉDICAS, TEXTILES Y ALIMENTARIAS DE NANOESTRUCTURAS ELABORADAS POR ELECTROHILADO», *BIOtecnia*, vol. 16, n.º 2, p. 44, ago. 2014, doi: 10.18633/bt.v16i2.46.

- [32] C. A. Rodríguez Vázquez, «Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras», PhD Thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2013.
- [33] R. A. Serway y J. W. Jewett, *Electricidad y magnetismo*. McGraw-Hill, 2005.
- [34] M. Gussow, «Fundamentos de Electricidad Schaum», Año, 1988.
- [35] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, y D. F. Mazurek, «Mecánica de materiales», Mc Graw Hill, 2010.
- [36] R. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas, 3ª Edición, Edit.* Prentice Hall, México, 2004.
- [37] J. A. Casado del Prado, *Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta*. Universidad de Cantabria, 2010.
- [38] S. Marconi, G. Alaimo, V. Mauri, M. Torre, y F. Auricchio, «Impact of graphene reinforcement on mechanical properties of PLA 3D printed materials», en *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2017, pp. 1–3.
- [39] E. Ivanov *et al.*, «PLA/graphene/MWCNT composites with improved electrical and thermal properties suitable for FDM 3D printing applications», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 6, p. 1209, 2019.
- [40] S. Ebnesaajad, *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications*. William Andrew, 2012.
- [41] I. Sanz Montero, «Simulación de fallo a fatiga en distintos elementos de máquina», 2019.
- [42] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, vol. 6. McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [43] N. A. S. Cardenas, «ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL ACIDO POLI- LÁCTICO CON GRAFENO OBTENIDO POR ELECTROHILADO», p. 89, 2018.
- [44] «Section 21: Modal or Natural Frequency Analysis | Inventor Nastran 2018 | Autodesk Knowledge Network». <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-nastran/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/NINCAD-SelfTraining/files/GUID-978425AB-D2FA-491B-8D39-BD1A757F3BBD-htm.html> (accedido may 26, 2020).
- [45] G. Velázquez Martínez, «Fabricación aditiva con materiales compuestos de grafeno: estudio de la resistencia mecánica a tracción», 2018.
- [46] R. B. Valapa, G. Pugazhenti, y V. Katiyar, «Effect of graphene content on the properties of poly (lactic acid) nanocomposites», *Rsc Adv.*, vol. 5, n.º 36, pp. 28410–28423, 2015.
- [47] I.-H. Kim y Y. G. Jeong, «Polylactide/exfoliated graphite nanocomposites with enhanced thermal stability, mechanical modulus, and electrical conductivity», *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 48, n.º 8, pp. 850–858, 2010.

## A. Anexo: Calculo de propiedades mecánicas del grafeno

Se muestran las fuentes de donde se obtuvieron varios valores de propiedades mecánicas.

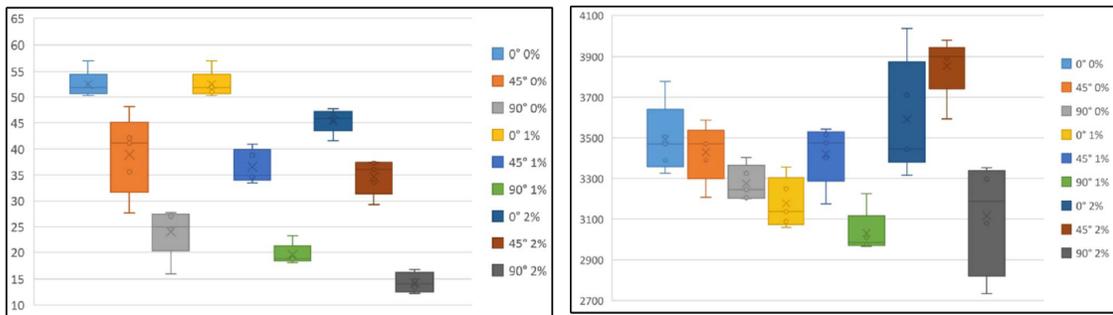
**Figura 1:** Algunas propiedades del PLA [22].

Polímero	Fuerza de Tensión (Mpa)	Módulo de Tensión (Gpa)	Temperatura Máx. Usada (°C)
LDPE	6.2 - 17.2	0.14 - 0.19	65
HDPE	20 - 37.2		121
PET	68.9	2.8 - 4.1	204
PS	41.3 - 51.7	3.1	78
PA	62 - 82.7	1.2 - 2.8	-
PP	33 - 37.9	1.1 - 1.5	121
<b>PLA (L+)</b>	<b>40 - 60</b>	<b>3 - 4</b>	<b>50 - 60</b>

**Figura A-2:** Propiedades a tensión algunos plásticos [20].

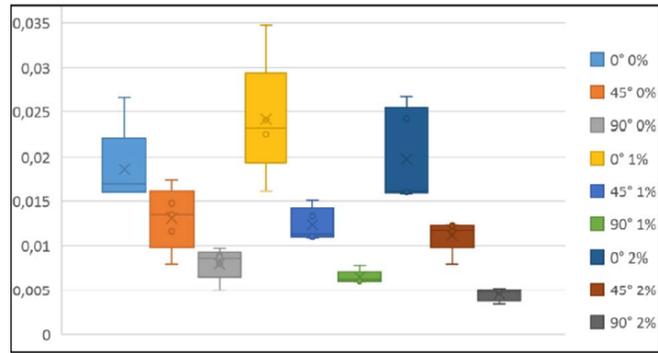
Propiedad	PLA	PET	PS	PP	HDPE
Esfuerzo máximo (Mpa)	40	55	40	40	26
Módulo elástico (Mpa)	2500 - 3000	2800 - 4100	3000 - 3500	1500 - 2000	800
% deformación a rotura	3 - 5	60 - 150	40	100	500

**Figura A-3:** a) tensión de ruptura, b) módulo de Young, c) deformación de ruptura de PLA con grafeno de fibras orientadas a 0°, 45° 90° [38].



a) tensión a ruptura

b) Modulo de Young



c) % deformación a ruptura

Figura A-4: Modulo de elasticidad y elongación de ruptura de PLA con grafeno[47].

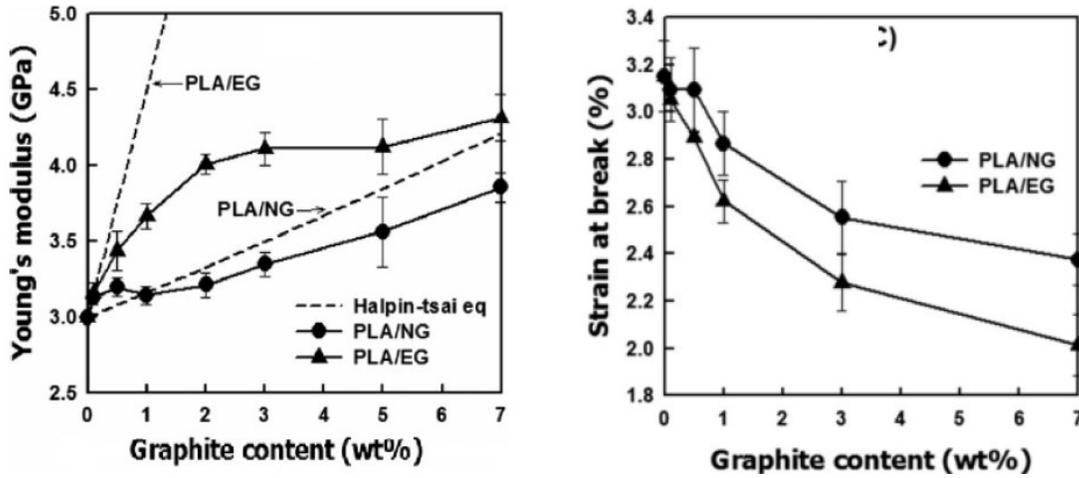
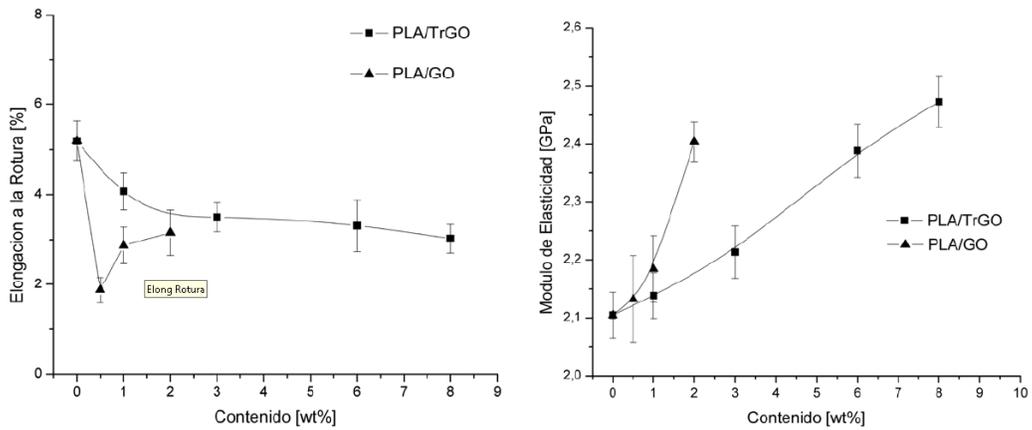


Figura A-5: Módulo de elasticidad y elongación a ruptura de PLA con composites de grafeno [4].



Se promediaron los valores de resistencia a la ruptura, módulo de Young y porcentaje de elongación.

**Tabla A-1:** Propiedades mecánicas de diferentes de PLA con grafeno

Figura	% grafeno	Resistencia a ruptura (MPa)	Módulo de Young (MPa)	% de elongación
A-1	0 %	50	3500	3.5
A2	0 %	40	2750	4
A-3	0 %	39.3	3300	1.33
	1 %	35	3200	1.4
	2 %	32.3	3500	1.1
A-4	0 %		3000	3.2
	1 %		3200	2.9
	2 %		3250	2.75
	5 %		3500	2.5
A-5	0 %		2100	5
	1 %		2140	4
	2 %		2170	3.7
	5 %		2325	3.5

Se promediarán los valores recopilados para la obtención de los valores que se usarán en la simulación.