

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL ELASTÓMERO
TERMOPLÁSTICO UTILIZADO EN LA IMPRESIÓN 3D PARA EL
AMORTIGUAMIENTO PASIVO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS**

**JOHANNA ANDREA LAGUNA BELTRAN
RAFAEL ALEXIS PINTO FLOREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2020

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL ELASTÓMERO
TERMOPLÁSTICO UTILIZADO EN LA IMPRESIÓN 3D PARA EL
AMORTIGUAMIENTO PASIVO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS**

**JOHANNA ANDREA LAGUNA BELTRAN
RAFAEL ALEXIS PINTO FLOREZ**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

**WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ
PhD. en Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y la sabiduría para alcanzar mis metas.

A mi mamá, Nury Beltrán Restrepo, por su apoyo absoluto, por ser mi mayor fuente de motivación y la razón de mis logros.

A mi Papito, Javier Pedroza, por su amor incondicional, sus enseñanzas y principios han hecho de mí la persona que soy hoy.

A mi abuela Marlene Díaz, por su inmenso amor y entrega, siempre velando por mi bienestar.

A mis hermanas Bengy y valentina, quienes han sido mi mayor motivación para no rendirme y me impulsan a ser mejor persona.

A mi compañero de proyecto y amigo Rafael Pinto Flórez, una persona persistente, entusiasta y entregada por el proyecto.

A mis amigos, familiares y Profesores, gracias por su apoyo y comprensión. A todas las personas que hicieron parte de este proyecto.

Johanna Laguna

DEDICATORIA

Al ser todo poderoso, creador de este mundo por guiarme y ayudarme en todo momento a cumplir mis metas.

A mi mamá, Nancy Flórez Moreno, por su amor y apoyo incondicional en todas las situaciones.

A mi papá, Rafael Orlando Pinto Ariza, por sus enseñanzas y apoyo económico.

A mi hermano David Santiago, esa personita que me cambia el día, siendo mi mayor motivación.

A mi compañera de proyecto y amiga Johanna Andrea Laguna, por su amistad incondicional y su gran labor con el proyecto a pesar de su larga jornada en las pasantías.

A mis compañeros, amigos, familiares y profesores, gracias por su apoyo y comprensión.

A todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron parte de esta tesis y este proyecto de vida.

Rafael Pinto

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de grado “CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL ELASTÓMERO TERMOPLÁSTICO UTILIZADO EN LA IMPRESIÓN 3D PARA EL AMORTIGUAMIENTO PASIVO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS” agradecen a la siguientes personas y entidades que aportaron para la realización de este trabajo:

A nuestro director de proyecto de grado, El ingeniero y docente WILLIAM PINTO HERNANDEZ, por la confianza, el apoyo, asesoría y constante guía para la realización de este proyecto.

Al PERSONAL DE LABORATORIO de ensayos mecánicos y vibraciones, por la disposición de tiempo y paciencia durante las pruebas que se realizaron para la recolección de datos los experimentales.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER Y ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA por la formación integral impartida y orientación profesional por parte del personal docente, sus instalaciones y acceso a documentación que permitieron llevar a cabo los objetivos de este proyecto.

A nuestras FAMILIAS, AMIGOS, COMPAÑEROS y a todas las personas que de una forma u otra aportaron para la realización de este proyecto de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	20
2.2 REFERENTES TEORICOS	24
2.2.1 Materiales viscoelásticos.	24
2.2.2 Elastomero termoplástico.....	25
2.2.3 Modelos reológicos para materiales viscoelástico.	26
2.2.4 Amortiguamiento.....	35
2.2.5 Impresión 3D.....	36
2.2.5.1 Tipos de impresora 3D.....	37
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	39
3.1 METODOLOGÍA	39
3.1.1 Etapa 1: Preparación del material.....	39
3.1.2 Etapa 2: Elaboración de probetas.....	41
3.1.3 Etapa 3: Ensayo de análisis dinámico según la norma ASTM D5026-15.	44
3.1.4 Etapa 4. Análisis de datos experimentales.	46
4. CALIBRACION Y AJUSTE DEL MODELO	57
5. VALIDACION	62
5.1 FASE 1.....	64
5.2 FASE 2.....	65
5.3 FASE 3.....	66
6. CONCLUSIONES	69

BIBLIOGRAFIA.....70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.Comportamiento a) elástico b) viscoso y c) viscoelástico	25
Figura 2.Esquema del modelo viscoelástico de Maxwell	28
Figura 3.Comportamiento de un cuerpo viscoelástico según el modelo de Maxwell	30
Figura 4.Esquema del Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt.....	30
Figura 5. Comportamiento del cuerpo viscoelástico según el modelo de Kelvin-Voigt.....	32
Figura 6.Esquema del modelo viscoelástico de Burgers o modelo combinado	33
Figura 7.Comportamiento de un Material Viscoelástico	35
Figura 8.Tecnologías de Fabricación aditiva.....	37
Figura 9.Impresion 3D	38
Figura 10. Carrete de Material NinjaFlex™	40
Figura 11. Ficha Técnica del NinjaFlex™	41
Figura 12.Impresora Geeetech A10.....	42
<i>Figura 13.Diseño de la Probeta</i>	43
Figura 14.Probetas de Muestra (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°.....	43
Figura 15.(a) Mechanical Testing Systems (MTS) , (b) Montaje de la probeta	45
Figura 16.Probetas después de los ensayos (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°	46
Figura 17.Graficas Modulo Vs Frecuencia (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°	47
Figura 18.Grafica Modulo Promedio Vs Frecuencia	49
Figura 19.Grafica Desfase Vs Frecuencia	50
Figura 20.Graficas Parámetro η_1	53
Figura 21. Graficas Parámetro η_2	54
Figura 22.Graficas parámetros E_1	55
Figura 23.Graficas Parámetro E_2	56

Figura 24. Calibración y Ajuste de la Probeta 0°	58
Figura 25. Calibración y Ajuste de la Probeta 90°	59
Figura 26. Ajuste y calibración de la probeta 45°	60
Figura 27. Diseño del Banco de Laboratorio	63
Figura 28. Diseño del Resorte	63
Figura 29. Frecuencias Naturales Traslacional	64
Figura 30. Frecuencias Naturales Rotacionales	65
Figura 31. Análisis de vibraciones del Banco sin amortiguamiento	66
Figura 32. Comportamiento disipativo del banco. (a) Dirección x ; (b) Dirección Y ; (c) Dirección (z)	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ajuste y Calibración de las Probetas	60

LISTA DE ANEXOS

Ver anexos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Anexo A. Planos del Banco de Laboratorio

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL ELASTÓMERO TERMOPLÁSTICO UTILIZADO EN LA IMPRESIÓN 3D PARA EL AMORTIGUAMIENTO PASIVO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS*.

AUTORES: LAGUNA BELTRAN JOHANNA ANDREA, PINTO FLOREZ RAFAEL ALEXIS**

PALABRAS CLAVES: Caracterización, Dinámico, Modelo, Viscoelástico, Amortiguamiento, Pasivo, Impresión 3D.

DESCRIPCION:

Actualmente el estudio dinámico de los materiales viscoelásticos ha venido tomando fuerza, desarrollando alternativas a los tipos de amortiguamiento convencionales, por otro lado, la evolución de las tecnologías de impresión 3D ha permitido contribuir con una variedad de aplicaciones en los campos de ingeniería de la industria, como estructuras, aeroespacial, automotriz y marina. En este proyecto se caracterizó el comportamiento viscoelástico del material NinjaFlex™ por medio de probetas elaboradas en impresión 3D con diferentes orientaciones de fibras 0°, 45° y 90° para evaluar su capacidad disipativa amortiguando vibraciones.

Se realizaron ensayos dinámicos a tensión, en total se realizaron 7 pruebas para cada tipo de probeta, con el propósito de obtener un promedio adecuado de datos y caracterizar este material mediante el modelo viscoelástico de Burgers. La calibración y ajuste del modelo se realizó con el método de mínimos cuadrados no lineales, por medio del software de programación Matlab. Finalmente, para la validación del comportamiento del material se diseñó y construyó un pequeño banco de laboratorio con el fin de realizar el análisis de vibraciones en su estructura, donde se comparó el alcance disipativo del material y se estableció que las probetas con orientación de fibras a 90° tiene una mayor capacidad de amortiguación pasiva.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica. Director William Pinto Hernández PhD. en ingeniería mecánica

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A THERMOPLASTIC ELASTOMER MATERIAL USED IN 3D PRINTING FOR THE PASSIVE DAMPING OF MECHANICAL SYSTEMS*.

AUTHORS: LAGUNA BELTRAN JOHANNA ANDREA, PINTO FLOREZ RAFAEL ALEXIS**.

KETWORDS: Characterization, Dynamic, Model, Viscoelastic, Passive damping, 3D print and

DESCRIPTION:

Currently, the Dynamic study of viscoelastic materials has been gaining strength, looking for alternative to conventional types of damping. Furthermore, the evolution of 3D printing technologies has contributed to a variety of applications in the engineering fields of industry, such as structures, aerospace, automotive and marine. In this project, the viscoelastic behavior of the NinjaFlex™ material was characterized by means of specimens made in 3D printing with different fiber orientations (0°, 45° and 90°) to evaluate its dissipative capacity by damping vibrations.

Dynamic tension tests were performed, in total 7 tests were performed for each type of specimen, in order to obtain an adequate average of data and characterize this material by means of the viscoelastic Burgers model. The calibration and adjustment of the model was carried out with the method of non-linear square parameters, through the MATLAB programming software. Finally, for the validation of the behavior of the material, a small laboratory bench was designed and built in order to perform the analysis of vibrations in its structure, where the dissipative scope of the material was compared and it was established that the fiber-oriented specimens 90° has a higher passive damping capacity.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica. Director William Pinto Hernández PhD. en ingeniería mecánica

INTRODUCCIÓN

Los sistemas mecánicos son sometidos a varios tipos de carga que cambian con el tiempo, generando oscilaciones en el material conocidas como vibraciones. Las causas principales son las cargas externas cíclicas, movimientos entre las superficies en contacto o la misma naturaleza de la máquina, produciendo así un desplazamiento del sistema pudiendo ocasionar daños por fatiga, desgaste en los materiales, desajuste de piezas y ruidos, en consecuencia, se acorta la vida útil de los componentes de la máquina.

La mayor parte de estas perturbaciones son indeseables, sin embargo, se pueden controlar mediante mecanismos de amortiguamiento. Todos los materiales y sistemas mecánicos poseen amortiguamiento, unos de mayor grado que otros. Por lo tanto, para evitar daños por efecto de alguna perturbación se utilizan mecanismos de amortiguamiento, en los que sobresale, el amortiguamiento pasivo, aprovecha la naturaleza de un material para amortiguar el sistema.

Actualmente se encuentran distintos materiales en la industria que pueden ser utilizados en configuraciones de amortiguamiento pasivo, entre ellos se destacan los materiales visco elásticos, los cuales poseen unas propiedades de almacenamiento de energía característica de los sólidos y unas propiedades disipativas representativas de los fluidos. Los materiales elastómeros se utilizan en los núcleos de vigas tipo sándwich, con el fin de absorber la energía provocada por vibraciones y evitar la amplitud excesiva dentro de la estructura.

Hoy en día la impresión 3D ha venido tomando fuerza y atraído un gran interés en la industria, es un tipo de manufactura innovadora capaz de generar un objeto sólido tridimensional. Además, se ha desarrollado rápidamente con cualidades de alta

impresión permitiendo el diseño y la fabricación de prototipos en diferentes materiales, optimizando tiempo y costos de producción y mejorando eficientemente el sector de la manufactura. Las impresoras 3D pueden ser utilizadas para elaborar elementos de disipación pasiva, siempre y cuando se utilice un material adecuado, como es el caso de los elastómeros.

En consecuencia, se planteó la necesidad, en este proyecto de grado, de caracterizar mecánicamente el material NinjaFlex™ (Elastómero termoplástico) enfocado a una aplicación de amortiguamiento pasivo, analizando los modelos que describan el comportamiento disipativo de este tipo de material variando las orientaciones de sus fibras.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mecánicamente las condiciones de amortiguamiento pasivo de un elastómero termoplástico utilizado en la impresión 3D, con el fin de contribuir la misión de la universidad Industrial de Santander construyendo conocimiento por medio de la investigación e innovación, en busca de soluciones a las necesidades de la industria.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Modelar matemáticamente el comportamiento de un material visco elástico utilizando el modelo matemático de Burgers para materiales viscoelásticos
- Determinar el comportamiento disipativo del material variando sentido de orientación de las fibras ($\theta=0,45,90^\circ$) impresas en 3D para el elastómero termoplástico NinjaFlex™.
- Caracterizar y calibrar los modelos matemáticos utilizados en el estudio de los materiales viscoelásticos a partir de pruebas experimentales en el dominio de la frecuencia.
- Aplicar y evaluar en un modelo practico Motor-estructura el desempeño del material viscoelástico a diferentes orientaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

- **Microstructural topology optimization of viscoelastic materials of damped structures subjected to dynamic loads.¹**

En este artículo, se presenta la optimización topológica microestructural de los materiales viscoelásticos para mejorar los rendimientos dinámicos de las estructuras amortiguadas. A través de la homogeneización numérica, un método para calcular las propiedades efectivas de los materiales viscoelásticos compuestos de células unitarias periódicas. Como conclusión el autor establece que las estructuras amortiguadas ligeras con altas capacidades de amortiguación se pueden diseñar a través del método propuesto, obteniendo como resultado mínimos niveles de vibración de la estructura amortiguada y satisfaciendo las restricciones de volumen del material viscoelástico.

- **Topology optimization of viscoelastic materials on damping and frequency of macrostructures.²**

Este artículo propone un algoritmo de optimización de topología basado en el método de optimización estructural evolutiva bidireccional (BESO) para diseñar materiales viscoelásticos. El objetivo de la optimización es buscar las distribuciones óptimas de material dentro de la PUC (células unitarias periódicas) con el volumen prescrito, para mejorar la amortiguación modal macroscópica y la frecuencia natural

¹ KYEONG-SOO, Yun. SUNG-KIE, Youn . Department of Mechanical Engineering,KAIST.2017.

² QIMING, Liu. DONG, Ruan. XIAODONG, Huang. Faculty of Science, Engineering and Technology, Swinburne University of Technology.2017.

de las estructuras construidas con materiales viscoelásticos optimizados. Las propiedades efectivas de los materiales viscoelásticos se calcularon a través de la teoría de la homogeneización y se integraron en el análisis de la macro estructura. El autor presenta el diseño optimizado de materiales viscoelásticos celulares para la capa de amortiguación tipo sándwich dando como resultado un equilibrio entre el amortiguamiento y la frecuencia natural de la estructura, demostrando la validez del algoritmo de optimización propuesto y mostró varios patrones interesantes de material Microestructuras, que proporcionan las guías útiles para el diseño de materiales viscoelásticos celulares o compuestos.

- **Characterization and Modeling of the Viscoelastic Behavior of a Self-Adhesive Rubber Using Dynamic Mechanical Analysis Tests³**

El objetivo de este artículo es identificar los parámetros de un modelo viscoelástico que represente con precisión las propiedades mecánicas dependientes de la frecuencia y caracterizar sus propiedades basándose en un análisis dinámico mecánico. El autor concluyo que el grosor de las muestras y los efectos de la expansión térmica tienen una influencia insignificante en las propiedades mecánicas medidas por el análisis dinámico-mecánico e identifica dos modelos viscoelásticos: un modelo de Maxwell generalizado, utilizado clásicamente para modelar materiales viscoelásticos en software industrial, y un modelo derivado fraccional, que se basa en solo cuatro parámetros, ambos modelos permiten una representación precisa de las propiedades del material dependientes de la frecuencia.

³ ROULEAU, Lucie. PRIK, Rogério. PLUYMERS, Bert. DESMET, Wim. Department of mechanical engineering, Katholieke Universiteit Leuven. 2015.

- **Additive manufacturing of multi-material structures⁴**

En este artículo se busca resaltar la gama de aplicaciones de polímeros impresos en 3D, metal-metal y metal-cerámica al tiempo que se analizan las ventajas y los desafíos con las estructuras de materiales múltiples de fabricación aditiva. El autor concluyó la viabilidad y las grandes ventajas que se pueden obtener futuramente con la invención de materiales y nuevas técnicas en la impresión 3D para generar estructuras que cumplan las necesidades de cada proyecto. Este proyecto nos sirve como guía y referente de la gran oportunidad para aprovechar estos materiales generados por la impresión 3D para la amortiguación de sistemas pasivos, además de la necesidad de caracterizarlos previamente para conocer su comportamiento cuando es sometido a distintos esfuerzos.

- **Quantifying microstructural, thermal, mechanical and solid-state viscoelastic properties of polyolefin blend type thermoplastic elastomer compounds⁵**

En este artículo, se hallaron las propiedades viscoelásticas microestructurales, morfológicas, térmicas, mecánicas y de estado sólido de los compuestos se investigaron con SEM, XRD, DSC, DMA y pruebas de tracción dependiendo de la diferencia estructural de la fase de elastómero y las variaciones de composición. Se puede concluir que la cantidad de elastómero en la composición afecta dramáticamente las propiedades mecánicas a corto plazo de los compuestos tales como el módulo elástico, la tensión de rendimiento y la deformación del rendimiento, mientras que el tipo de elastómero no influye significativamente en tales propiedades. Por otro lado, el tipo de elastómero, específicamente el contenido de segmentos duros posee un gran efecto en los rendimientos físicos a largo plazo de

⁴ BANDYOPADHYAY, Amit. HEER, Bryan. W. M. Keck Biomedical Materials Research Laboratory, School of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University, Pullman.

⁵ BEGUM, Mine. DURMUS, Ali. Istanbul University, Engineering Faculty, Department of Chemical Engineering.

los compuestos. Para nuestro trabajo sirve como guía en la caracterización mecánica de un material elastómero termoplástico.

- **Composites Part Production with Additive Manufacturing Technologies⁶**

Este trabajo presenta cuatro principios de diseño que mejoran la producción de piezas compuestas durante el proceso de preparación, curado y post procesamiento en el proceso de configuración. Los resultados muestran que AM puede reducir el conteo de piezas, los pasos de ensamblaje y las deformaciones durante el curado.

- **Vibration analysis of functionally graded material sandwich structures with passive damping⁷**

En este trabajo, se desarrolla un modelo de elementos finitos para el análisis de vibración de estructuras de material puramente graduado funcionalmente (MGF), y para estructuras de sándwich amortiguadas pasivas, con un núcleo viscoelástico suave entre las capas de MGF. El análisis dinámico de estos tipos de estructuras se realiza en el dominio de la frecuencia para obtener las frecuencias naturales y, para el caso de un núcleo viscoelástico.

- **Uncertainty propagation analysis in laminated structures with viscoelastic core⁸**

El desarrollo de este artículo se enfoca en el análisis de los factores de incertidumbre, que se generan en la simulación de estructuras compuestas con

⁶ TÜRK, Daniel. KUSSMAUL, Ralph. Product Development Group Zürich pd|z, ETH Zurich, Leonhardstr. 21, 8092 Zürich, Switzerland. Inspire AG, Technoparkstrasse.

⁷ MOITA, José. ARAÚJO, Aurélio. IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa Av. Rovisco Pais, 2017.

⁸ PINTO, William. CASTELLO, Daniel. RITTO, Thiago. Mechanical Engineering Department, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

núcleo viscoelástico. Para el desarrollo del modelo de elementos finitos, que le permitió a los autores alcanzar el objetivo principal del artículo, se empleó el método de muestro de Monte Carlo.

2.2 REFERENTES TEORICOS

2.2.1 Materiales viscoelásticos. La viscoelasticidad es la propiedad de los materiales que exhiben características tanto viscosas como elásticas cuando sufren deformación.⁹

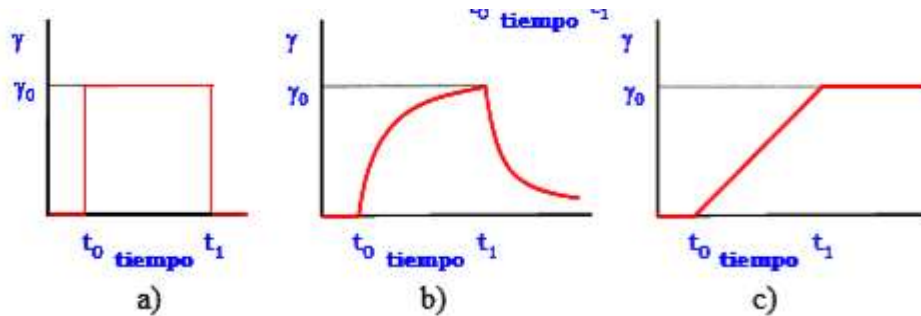
La teoría clásica de la elasticidad considera las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos de acuerdo con la ley de Hooke, es decir, la deformación conseguida es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Por otra parte, la teoría hidrodinámica trata las propiedades de los líquidos viscosos para los que, de acuerdo con la ley de Newton, el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de deformación, pero independiente de la deformación misma.

Estas dos teorías son idealizaciones, aunque el comportamiento de muchos sólidos se aproxima a la ley de Hooke (comportamiento elástico) en infinitesimales deformaciones y el de muchos líquidos se aproximan a la ley de Newton (comportamiento viscoso) para velocidades de deformación bajas, como observamos en la *figura 1*, si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial. Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso éste se deforma, pero no recupera nada de lo que se deforma. Un comportamiento intermedio es el

⁹ Materiales Viscoelásticos . [Revisado 8 de junio de 2019]. Disponible en la web: <https://es.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticidad>

comportamiento viscoelástico, en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada.¹⁰

Figura 1. Comportamiento a) elástico b) viscoso y c) viscoelástico



Fuente: Visco elasticidad. [Revisado 8 de junio de 2019]. Disponible en la web: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>

2.2.2 Elastomero termoplástico. Los elastómeros termoplásticos (TPE), a veces referidos como cauchos termoplásticos, son una clase de copolímeros o una mezcla física de polímeros (usualmente un plástico y un caucho) los cuales se comportan con las mismas propiedades de los termoplásticos y de los elastómeros. Mientras que la mayoría los elastómeros son termoestables, los termoplásticos son, en contraste, relativamente fácil de moldear por los métodos habituales de transformación, como, por ejemplo, por moldeo por inyección. Los elastómeros termoplásticos muestran las ventajas típicas de ambos materiales. La diferencia principal entre elastómeros termoestable y elastómeros termoplásticos es el tipo de reticulación en sus estructuras.

Con el fin de calificar como un elastómero termoplástico, un material debe tener estas tres características esenciales:

- La capacidad de ser estirado a alargamientos moderados y, tras la eliminación del esfuerzo, volver a su forma original.

¹⁰ Viscoelasticidad.[Revisado 8 de junio de 2019].Disponible en la web: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>

- Procesable como una masa fundida a una temperatura elevada.
- Ausencia de fluencia significativa.

Los TPE se utilizan cuando los elastómeros convencionales no pueden proporcionar la gama de propiedades físicas necesarias en el producto. Estos materiales encuentran gran aplicación en el sector automovilístico y el sector de los electrodomésticos para el hogar. Además, el TPE copoliéster se utilizan en pistas de motos de nieve en las que la rigidez y la resistencia a la abrasión es un lujo. Son también ampliamente utilizados para catéteres, en donde los copolímeros en bloque de nylon ofrecen una suavidad ideal para los pacientes. Mezclas termoplásticas de silicona y olefinas se utilizan para la extrusión de perfiles de burletes para el vidrio automóviles. Copolímeros en bloque de estireno se utilizan en las suelas de zapatos por su facilidad de procesamiento, y es ampliamente usado como adhesivo. Los TPE se utilizan normalmente para hacer bujes de suspensión para componentes de automóviles, debido a su mayor resistencia a la deformación cuando se compara con bujes de goma regulares. Los TPE también está encontrando más y más usos como una chaqueta de cable eléctrico / aislamiento interior. Los TPE se utilizan también en algunos cables de los auriculares. Otro uso muy difundido es en mangos de cepillos de dientes y maquinillas de afeitar descartables obtenidos mediante inyección bicomponente. También se utiliza en mangos de herramientas, tales como martillos y desarmadores, para un mejor agarre.¹¹

2.2.3 Modelos reológicos para materiales viscoelástico. Debido que el comportamiento de materiales viscoelásticos es difícil de visualizar, a menudo se suelen emplear modelos matemáticos para su análisis.

¹¹ Elastomeros Termoplasticos. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web : <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/elastomeros-termoplasticos-tpe.html>

- **MODELO VISCOELASTICO DE MAXWELL**

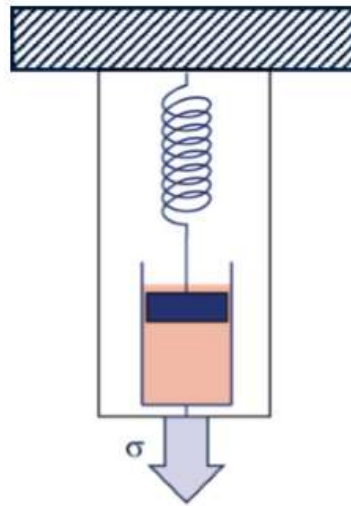
El modelo de Maxwell considera que el comportamiento de un polímero viscoelástico está definido por una combinación de un elemento elástico y un elemento viscoso acoplados en serie como se observa en la *figura 2*. Al aplicar una fuerza o tensión sobre un polímero, este se comportará de forma dual. Por un lado, ofrecerá una deformación o alargamiento instantáneo dado por la ley de Hooke, *Ecuación 2.2.3.1*. Esta respuesta elástica se produce de forma inmediata y no cambia con el tiempo, donde (σ) representa la tensión aplicada, (ε) representa la elongación y la constante de proporcionalidad viene definida por (E).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad \text{(2.2.3.1)}$$

No obstante, como el polímero también presenta una naturaleza del líquido viscoso, la deformación ira incrementando con el paso del tiempo según indica la ley de Newton para fluidos newtonianos, *Ecuación 2.2.3.2*. Donde la tensión aplicada (σ) es proporcional a velocidad de deformación ($\frac{d\varepsilon}{dt}$) y la constante de proporcionalidad viene representada por la constante viscosa del fluido en el interior del embolo (η).

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{(2.2.3.2)}$$

Figura 2. Esquema del modelo viscoelástico de Maxwell



Fuente: V. Fombuena, T. Boronat, L. Sanchez-Nacher, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart. Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. [revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79849/6315-25177-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hay que tener en cuenta que dado el acoplamiento en serie de ambos componentes, la deformación total del polímero (ϵ) será la suma de la deformación puramente elástica (ϵ_1) y la componente viscosa (ϵ_2).

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad \text{(2.2.3.3)}$$

Por otra parte, las tensiones, al estar conectadas en serie serán idénticas para ambos elementos.

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad \text{(2.2.3.4)}$$

Se despejan las deformaciones correspondientes al elemento elástico, *ecuación (2.2.3.1)* y elemento viscoso, *ecuación (2.2.3.2)* con sus correspondientes leyes, se tiene que:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (2.2.3.5)$$

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma_2 \quad (2.2.3.6)$$

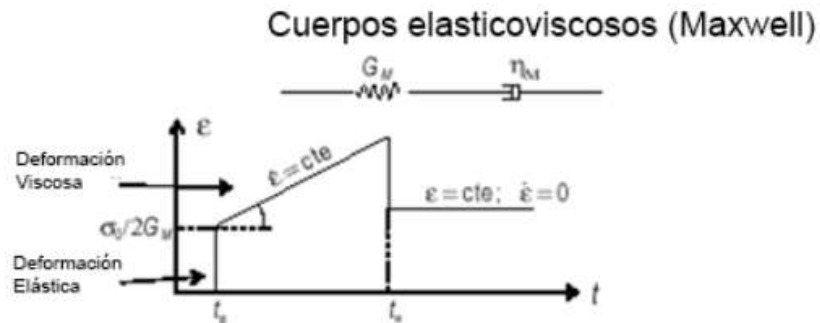
Derivando la *ecuación (2.2.3.3)* con respecto al tiempo, se tiene:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (2.2.3.7)$$

Sustituyendo las *ecuaciones (2.2.3.5), (2.2.3.6)* y *(2.2.3.7)*, y considerando que las tensiones son las mismas según la *ecuación (2.2.3.4)*, obtenemos la ecuación general del modelo viscoelástico de Maxwell, como se muestra el comportamiento en la *figura 3*.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma_2 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (2.2.3.8)$$

Figura 3. Comportamiento de un cuerpo viscoelástico según el modelo de Maxwell

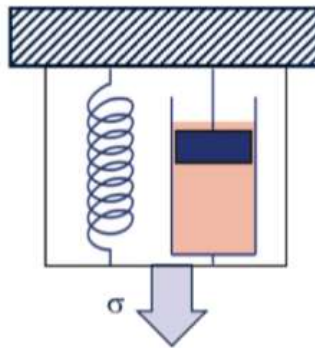


Fuente: Principios de Reología. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg_15/capitulo_2.htm

- **MODELO VISCOELASTICO DE KELVIN-VOIGT**

En este modelo se considera el comportamiento viscoelástico de un polímero como el descrito por un acoplamiento en paralelo de un embolo y un resorte tal y como se muestra en la *Figura 4*.

Figura 4. Esquema del Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt



Fuente: V. Fombuena, T. Boronat, L. Sanchez-Nacher, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart. Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79849/6315-25177-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En esta configuración hay que tener en cuenta que, al aplicar una tensión al polímero, parte de la energía será almacenada por el resorte y el resto se disipará progresivamente al desplazarse el embolo, lo que motiva una deformación dependiente del tiempo. El resorte y el embolo tienen las siguientes relaciones de tensión-deformación de acuerdo con la *ecuación 2.2.3.9, 2.2.3.10*. No obstante, al cesar la carga, se recuperará la forma original en función de la energía que se había quedado almacenada en el resorte, pero no así en la del embolo, como se muestra en la figura 5.

$$\sigma_1 = E * \varepsilon_1 \quad \mathbf{(2.2.3.9)}$$

$$\sigma_2 = \eta * \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad \mathbf{(2.2.3.10)}$$

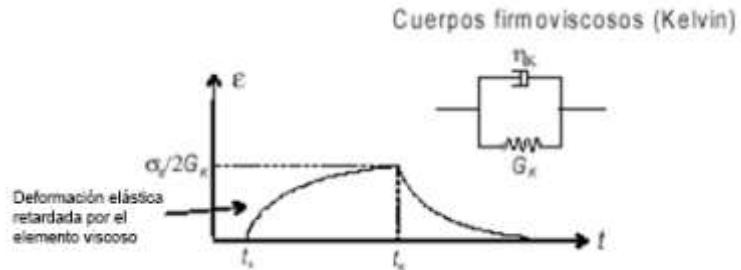
Por una parte, las tensiones soportadas por el material plástico serán la suma de la tensión en el resorte (σ_1) y la tensión en el embolo (σ_2) tal y como se muestra en la *ecuación 2.2.3.11*.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad \mathbf{(2.2.3.11)}$$

Remplazando las *ecuaciones 2.2.3.9 y 2.2.3.10* en la *ecuación 2.2.3.11*, se obtiene la expresión general del Modelo de Kelvin-Voigt.

$$\sigma = E\varepsilon_1 + \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt} = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \mathbf{(2.2.3.12)}$$

Figura 5. Comportamiento del cuerpo viscoelástico según el modelo de Kelvin-Voigt

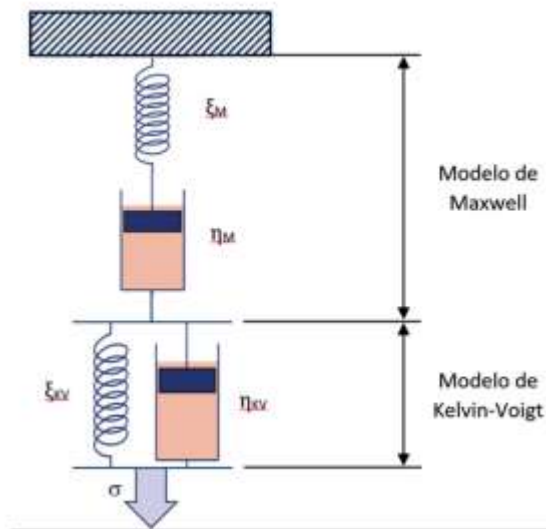


Fuente: Principios de Reología. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg_15/capitulo_2.htm

- **MODELO VISCOELASTICO DE BURGERS**

Para el desarrollo del proyecto, se utilizará el modelo de Burgers, para representar el comportamiento de los materiales viscoelásticos. Una posible solución para obtener una mejor aproximación al comportamiento viscoelástico real en un polímero es la combinación de ambos modelos en serie, en lo que se denomina, un modelo combinado (modelo de Burgers) tal y como se muestra en la *Figura 6* Al estar acoplados en serie un modelo de Maxwell y un modelo básico de Kelvin-Voigt.

Figura 6. Esquema del modelo viscoelástico de Burgers o modelo combinado



Fuente: V. Fombuena, T. Boronat, L. Sanchez-Nacher, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart. Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. [revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79849/6315-25177-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

La deformación total (ϵ) será la suma de la deformación correspondiente al modelo de Maxwell (ϵ_M) y la resultante del modelo de Kelvin-Voigt (ϵ_{KV}), *Ecuación 2.2.3.13*. Así pues, teniendo en cuenta las deformaciones con el tiempo correspondientes al modelo de Maxwell y de Kelvin-Voigt.

$$\epsilon = \epsilon_M + \epsilon_{KV} \quad (2.2.3.13)$$

Donde ϵ_M es la deformación del resorte y embolo en serie

$$\epsilon_M = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (2.2.3.14)$$

y ε_{KV} es la deformación del resorte y embolo en paralelo, la cual despejamos de la ecuación 2.2.3.12

$$\frac{\sigma}{\eta_2} = \frac{d\varepsilon_{KV}}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon_{KV} \quad (2.2.3.15)$$

Las ecuaciones (2.2.3.13- 2.2.3.15) contienen cuatro incógnitas $\varepsilon, \sigma, \varepsilon_M, \varepsilon_{KV}$, donde ε y σ son variables externas y $\varepsilon_M, \varepsilon_{KV}$ son variables internas. En principio, $\varepsilon_M, \varepsilon_{KV}$ pueden eliminarse de estas tres ecuaciones para producir una ecuación entre ε y σ para obtener el modelo de Burgers

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (2.2.3.16)$$

El comportamiento de arrastre del modelo Burgers bajo tensión constante σ_0 se puede obtener resolviendo esta ecuación diferencial (2.2.3.16) de segundo orden con dos condiciones iniciales.

$$\varepsilon = \varepsilon_M = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad \varepsilon_{KV} = 0, \quad t = 0 \quad (2.2.3.17)$$

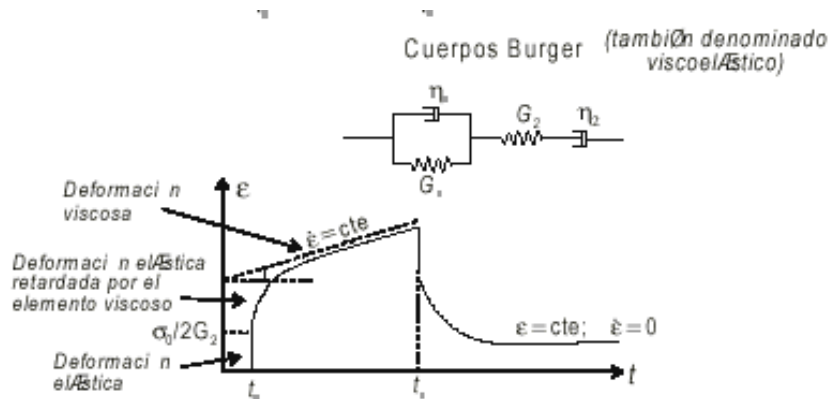
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_2}, \quad t = 0 \quad (2.2.3.18)$$

En los materiales que se comportan como un cuerpo Burger, el esfuerzo tangencial produce tres tipos de deformación, *Figura 7*. La ecuación (2.2.3.18) indica que el comportamiento del modelo de Burgers es la suma del comportamiento de arrastre de los modelos de Maxwell y Kelvin. El primer término representa la deformación elástica instantánea, que permite el almacenamiento de una cierta cantidad de energía, que vuelve al sistema una vez retirado el esfuerzo. El segundo la deformación es totalmente viscosa y, en consecuencia, es no recuperable. El tercer

y último término, está constituido por una lenta deformación retardada, la que también es elástica y por lo tanto recuperable.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \quad (2.2.3.19)$$

Figura 7. Comportamiento de un Material Viscoelástico



Fuente: Principios de Reología. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg_15/capitulo_2.htm

2.2.4 Amortiguamiento. Es el fenómeno por el cual se disipa energía mecánica en un sistema principalmente por la generación de calor o energía, la amortiguación determina la amplitud de la vibración en la resonancia y el tiempo de persistencia de la vibración después que culmina la excitación.¹²

El problema de la reducción de la vibración se enfrenta con mucha frecuencia en una variedad de aplicaciones de ingeniería, y para lograr este objetivo se pueden usar técnicas activas y pasivas. Como las técnicas pasivas se consideran estables, a prueba de fallas y presentan requisitos de baja potencia, estas técnicas se basan en una de las siguientes técnicas de amortiguación: materiales viscoelásticos,

¹² Amortiguamiento en estructuras. [Revisado 8 junio 2019]. Disponible en la web: <https://es.slideshare.net/sandrayessen/amortiguamiento>

fluidos viscosos, magnéticos y piezoeléctricos pasivos. Entre las técnicas pasivas disponibles, hemos decidido utilizar absorbentes de vibración dinámicos elaborados en un material viscoelástico un TPE (elastomer thermoplastic)

- **AMORTIGUAMIENTO PASIVO**

El diseño de sistemas de amortiguación pasiva tiene como objetivo absorber y disipar la energía (que puede ocasionar vibraciones en elementos mecánicos o estructurales), a partir de principios que no necesitan alguna fuente de alimentación externa. La efectividad de los sistemas de amortiguación pasiva varía en función de la frecuencia de oscilación del sistema, o de su temperatura.

La implementación de amortiguación pasiva en un elemento estructural o mecánico, puede realizarse mediante dos métodos: amortiguadores discretos o distribuidos.

Los amortiguadores pasivos más comunes para amortiguar la amplitud de las vibraciones de resonancia son los amortiguadores de masa sintonizados y los absorbedores de vibraciones. El inconveniente de estos amortiguadores es que están ajustados para vibraciones alrededor de una frecuencia dada. Las estructuras con más de una frecuencia natural solo pueden optimizarse para una de las frecuencias, las otras frecuencias no se amortiguarán de manera óptima.¹³

2.2.5 Impresión 3D. La impresión 3D es la tecnología mediante la cual se puede realizar réplicas tridimensionales, de piezas, maquetas u objetos que han sido modelados mediante un software o digitalizados en un computador mediante un escaneo tridimensional.¹⁴

¹³ Control de Vibraciones. Departamento de ingeniería Mecánica ,Energética y de Materiales. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_control.pdf

¹⁴ ¿Qué es Impresión 3D y el Modelamiento 3D en Ingeniería?. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: <https://bsginstitute.com/bs-campus/blog/Que-es-Impresion-3D-y-Modelamiento-3D-en-Ingenieria-1117>

2.2.5.1 Tipos de impresora 3D

- De sinterización láser, donde un suministrador va depositando finas capas de polvo de diferentes metales (acero, aluminio, titanio.) y un láser a continuación funde cada capa con la anterior.
- De estereolitografía, donde una resina fotosensible es curada con haces de luz ultravioleta, solidificándola.
- De compactación, con una masa de polvo que se compacta por estratos.
- De adición, o de inyección de polímeros, en las que el propio material se añade por capas.

Figura 8. Tecnologías de Fabricación aditiva

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	termoplásticos (por ejemplo, PLA, ABS), aleaciones eutécticas de metales, productos comestibles
Granular	Sinterizado láser directo de metal (LMD)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterización selectiva por calor (SHS)	Termoplástico en polvo
	Sinterización selectiva por láser (SLS)	termoplásticos , metales en polvo , polvos cerámicos
	impresión 3D con cabezal de inyección de tinta sobre lecho en polvo	Yeso
Laminado	Fabricación objeto laminado (LOM)	Papel, hoja metálica, película de plástico
Foto-polimerizado	Estereolitografía (SLA)	fotopolímero
	Procesamiento digital de luz (DLP)	resina líquida

Fuente: Impresión 3D. Tecnología de los plásticos. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>

Según el método empleado para la compactación del polvo, se pueden clasificar en:

- Impresora 3D de tinta: utilizan una tinta aglomerante para compactar el polvo. El uso de una tinta permite la impresión 3d en diferentes colores.
- Impresora 3D láser: Es un láser que transfiere energía al polvo haciendo que se polimerice. Después se sumerge en un líquido que hace que las zonas polimerizadas se solidifiquen.

Una vez impresas todas las capas sólo hay que sacar la pieza. Con ayuda de un aspirador se retira el polvo sobrante, que se reutilizará en futuras impresiones.

Figura 9. Impresión 3D



Fuente: Aplicación de las tecnologías de impresión 3D. [revisado 8 de junio 2019].

Disponible en la web: <https://www.bpmsat.com/impresion-3d/>

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGÍA

ETAPA 1. PREPARACION DEL MATERIAL.

- Obtención del Material (NinjaFlex™)
- Identificación de las características del material (Ficha Técnica)

ETAPA 2. ELABORACION DE PROBETAS.

- Capacitación del uso y manejo adecuado de la impresora 3D Geeetech A10
- Manipulación del programa CURA 4.2.1 para la impresión 3D.
- Comprobación de medidas de la probeta respecto a la norma.

ETAPA 3. ENSAYOS MECANICOS

- Ensayo de análisis dinámico: a tensión según la norma ASTM D5026-15¹⁵

Etapa 4. ANALISIS DE DATOS

- Elaboración de graficas módulo de General Vs Frecuencia
- Programación del modelo matemático de Burgers mediante la herramienta computacional Matlab

3.1.1 Etapa 1: Preparación del material. Se realizó la compra en línea del elastómero termoplástico (TPE) NinjaFlex™, un filamento flexible que produce impresiones con propiedades elásticas, *figura 10*. Sus fabricantes aseguran que la flexibilidad que aporta este material es única, posee buena unión entre las capas

¹⁵ ASTM Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: In tension .2014

del objeto impreso, su baja adherencia permite un tránsito suave a través de guías de filamento. Es muy resistente a la abrasión y al agua, y de alta elasticidad.

NinjaFlex™ está indicado para impresoras 3D que utilizan filamentos de entre 1,75 mm o 3 mm de diámetro y para aquellas que aceptan otro tipo de materiales de impresión, tales como el ABS o el PLA. En cuanto a las características técnicas del producto como se muestra en la *figura 11*. NinjaFlex™ es un filamento de dureza Shore de aproximadamente 85A. El diámetro de impresión es constante y su naturaleza flexible y elástica proporciona resultados buenos y confiables con alta calidad en los acabados. La ficha de uso del material recomienda una temperatura extrusión entre 210 y 230° C.

Figura 10. Carrete de Material NinjaFlex™



Figura 11. Ficha Técnica del NinjaFlex™

General Properties		Test Method	Imperial	Metric
Specific Gravity		ASTM D792	1.19 g/cc	1.19 g/cc
Moisture Absorption - 24 hours		ASTM D570	0.22 %	0.22 %

Mechanical Properties		Test Method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Yield		ASTM D638	580 psi	4 Mpa
Tensile Strength, Ultimate		ASTM D638	3,700 psi	26 Mpa
Tensile Modulus		ASTM D638	1,800 psi	12 Mpa
Elongation at Yield		ASTM D638	65%	65%
Elongation at Break		ASTM D638	660%	660%
Toughness (integrated stress-strain curve; calculated stress x strain)		ASTM D638	12,000 in·lbF/in ³	82.7 m ³ N/m ³ x10 ⁶
Hardness		ASTM D2240	85 Shore A	85 Shore A
Impact Strength (notched Izod, 23C)		ASTM D256	2.0 ft.lbf/in ²	4.2 kJ/m ²
Abrasion Resistance (mass loss, 10,000 cycles)		ASTM D4060	0.08 g	0.08 g

Thermal Properties		Test Method	Imperial	Metric
Melting Point (via Differential Scanning Calorimeter)		DSC	420° F	216° C
Glass Transition (Tg)		DSC	-31° F	-35° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 10.75psi/ 0.07 MPa		ASTM D648	140° F	60° C
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 66psi/ 0.45 MPa		ASTM D648	111° F	44° C

3.1.2 Etapa 2: Elaboración de probetas. La impresora 3D Geeetech A10 es una impresora con una estructura sencilla y moderna de aluminio, además su base está fabricada en cristal de carburo de silicio, material que garantiza buena adherencia, tiene una calidad de impresión aceptable, puede imprimir a una velocidad máxima de 180 mm/segundo, *figura 12*. La Geeetech A10 es compatible con multitud de filamentos de 1.75mm de diámetro como PLA, ABS, TPE, HIPS, cuenta con una base o cama caliente que alcanza una temperatura de 100°C, mientras el extrusor (boquilla) llega a los 280°C.

La impresora la manejamos con ayuda del software libre CURA versión 4.2.0 que pertenece a la marca Ultimaker, el cual es compatible con la impresora y admite formatos comunes como el STL, OBJ, X3D y también archivos de imágenes GIF, JPG, PNG y BMP.

Primeramente, la probeta se diseñó en el programa SolidWorks teniendo en cuenta las recomendaciones la norma ASTM D5026-15, la cual indica que la probeta debe ser rectangular sin importar las dimensiones, *figura 13*. Después se insertó en el

formato adecuado STL para el programa CURA, donde se pueden parametrizar las propiedades de impresión de la probeta, como el porcentaje de relleno, posición, velocidad de impresión, temperaturas, orientación de las fibras, capas de impresión y tiempo, finalmente se imprimió 7 probetas para cada orientación (0°, 45°, 90°) para un total de 21 probetas, como se muestra en la *figura 14*.

La retracción es un parámetro importante para este tipo de filamentos, ya que al ser elásticos en lugar de retraer en muchas ocasiones lo que ocurre es que el filamento se estira, por lo tanto para obtener una mejor impresión y evitar que el material se atascara en la impresora se desactivo el parámetro a la hora de imprimir, otro parámetro importante es la velocidad de impresión para obtener buenos acabados de las probetas, se imprimió despacio a una velocidad no mayor de 30 mm/s.

Figura 12. Impresora Geeetech A10



Figura 13. Diseño de la Probeta



Figura 14. Probetas de Muestra (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°



(a)



(b)



(c)

Para imprimir las probetas de la *figura 14* se utilizó los siguientes parámetros de impresión:

Temperatura de impresión (Extrusor): 250 °C

Temperatura de la Placa base: 28°C (Temperatura ambiente)

Densidad de relleno: 100%

Patrón de relleno: Lineal

Altura de la capa: 0.1mm

Numero de capas: 18

Velocidad de impresión: 30 mm/s

Tiempo promedio de impresión : 1 hora y 27 minutos

3.1.3 Etapa 3: Ensayo de análisis dinámico según la norma ASTM D5026-15. El ensayo de análisis dinámico a tensión consiste en determinar el módulo de elasticidad en función de la frecuencia, temperatura o tiempo. Es un método de prueba mecánica dinámica que sirve para identificar las propiedades viscoelásticas de un material.

Se realizó el ensayo dinámico a tensión, este se llevó acabo por medio de la máquina de ensayos universal marca *Mechanical Testing Systems (MTS) Bionix*. Las condiciones a las cuales fueron hechos los ensayos fueron aproximadamente

a una temperatura de 28°C (Temperatura ambiente) y una precarga de 10 N para que la probeta no entrara en compresión. Basándonos en la norma ASTM D5026-15 se realizaron 7 ensayos para cada tipo de orientación con el fin de obtener un promedio en los resultados, donde se varió la frecuencia con un paso de 10 Hz para cada una de las muestras, desde 50 hasta 100 Hz de 25 ciclos cada una con una frecuencia de muestreo de 1024 Hz para garantizar el método de antialiasing de sobre muestreo. Se programó en la maquina una entrada de función senoidal en el desplazamiento para simular las vibraciones con una amplitud de 1 mm. En vista de la disposición de las mordazas de la máquina, para evitar que se soltara la probeta, se agarró 1cm en cada extremo de la probeta.

En total se ejecutaron 126 ensayos, donde se registraron datos de tiempo, fuerza y desplazamiento. En la *Figura 15*, se muestra la máquina y el montaje de estas pruebas y en la *figura 16* se observa las probetas después de los ensayos.

Figura 15.(a) Mechanical Testing Systems (MTS) , (b) Montaje de la probeta

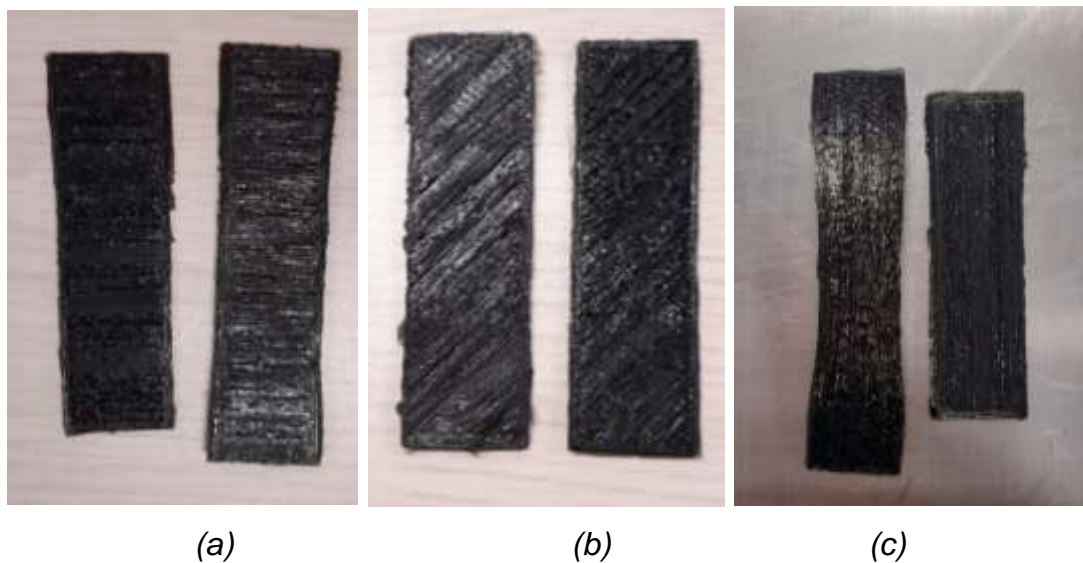


(a)

(b)

La máquina de ensayos universal utilizada *Mechanical Testing Systems (MTS) Bionix Tabletop*, *Figura 14.a*. Ubicada en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, posee sistemas servo hidráulico, flexible y fácil de usar. Los cuales son los más adecuados para evaluar las propiedades dinámicas de una amplia gama de materiales, la maquina tiene la capacidad para aplicar tracción, compresión, flexión y otros ensayos básicos de alta precisión y repetibilidad, con una capacidad de carga ± 25 KN, el desplazamiento del actuador es de 100mm, su presión hidráulica máxima admisible es 245 Bar.

Figura 16. Probetas después de los ensayos (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°



3.1.4 Etapa 4. Análisis de datos experimentales. A partir de los datos de fuerza, tiempo y desplazamiento recopilados de los ensayos experimentales, se hizo un análisis mediante software donde se usó el lenguaje de programación MATLAB para programar el script basado en la transformada rápida de Fourier.

El desarrollo del script se hizo a partir del módulo de Young de la ecuación (2.2.3.1) característica para este tipo de materiales con comportamiento viscoelástico. El módulo elástico (componente real) E' está asociado con la energía almacenada en

el material mientras el módulo viscoso E'' (componente imaginaria), éste es asociado con la energía disipada del material. Ecuación (3.1.4.1)

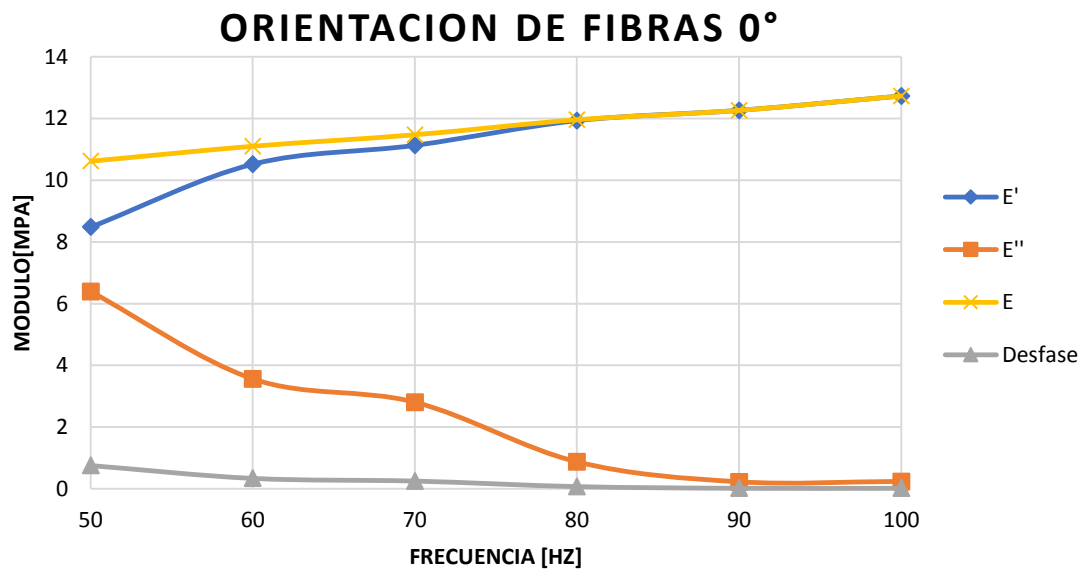
$$E^* = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (3.1.4.1)$$

Desarrollando la ecuación (3.1.4.1), donde δ representa el desfase existente entre el esfuerzo y la deformación siendo un parámetro indicativo de la relación entre la energía disipada y la almacenada por el material y de la viscoelasticidad de este.

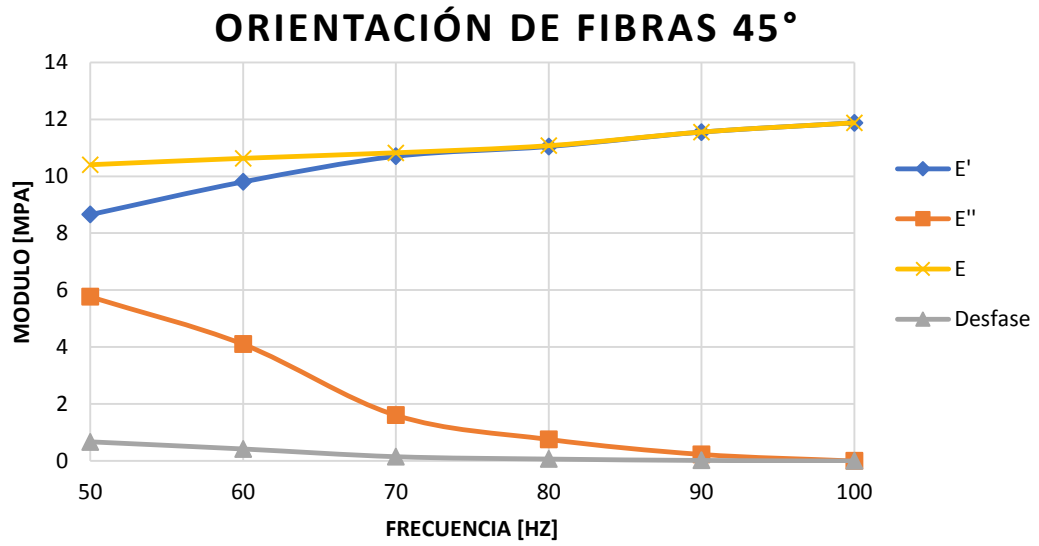
Se obtuvieron las siguientes graficas:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} + i \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (3.1.4.2)$$

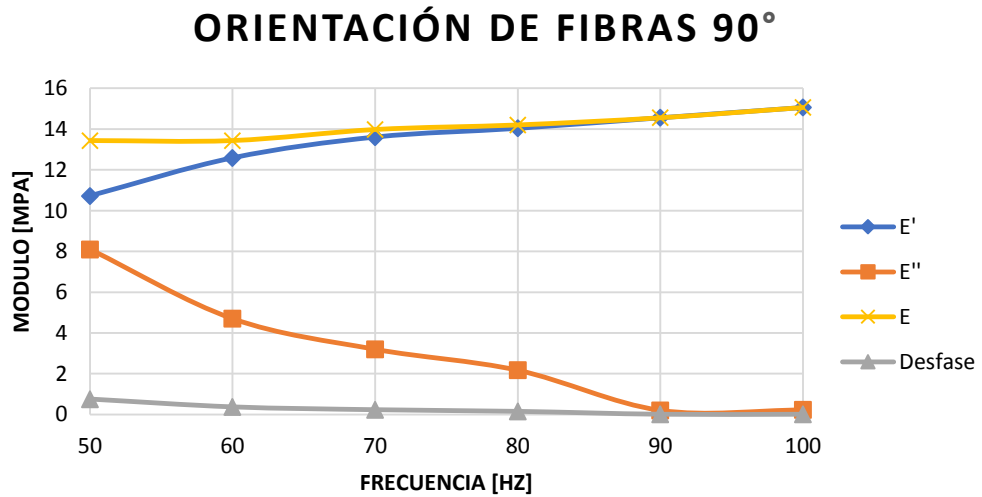
Figura 17. Graficas Modulo Vs Frecuencia (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°



(a)



(b)

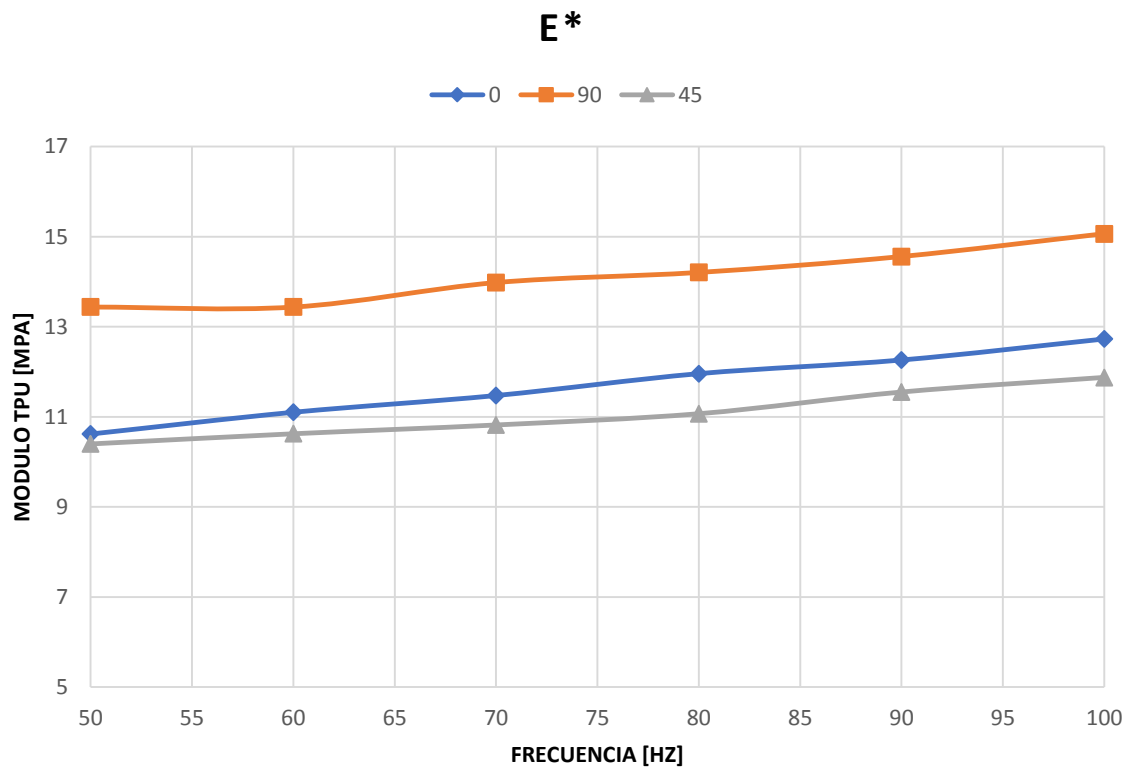


(c)

De la *figura 17* se observa el comportamiento promedio del modulo y el desfase de la orientacion de las fibras a 0° ,45°y 90°. El modulo general a medida que va aumentando la frecuencia va creciendo poco a poco linealmente , teniendo en cuenta que en el rango de frecuencias de 50 a 100 Hz, se identifica un notable aumento de el modulo elastico sobre el viscoso debido a que el material se va

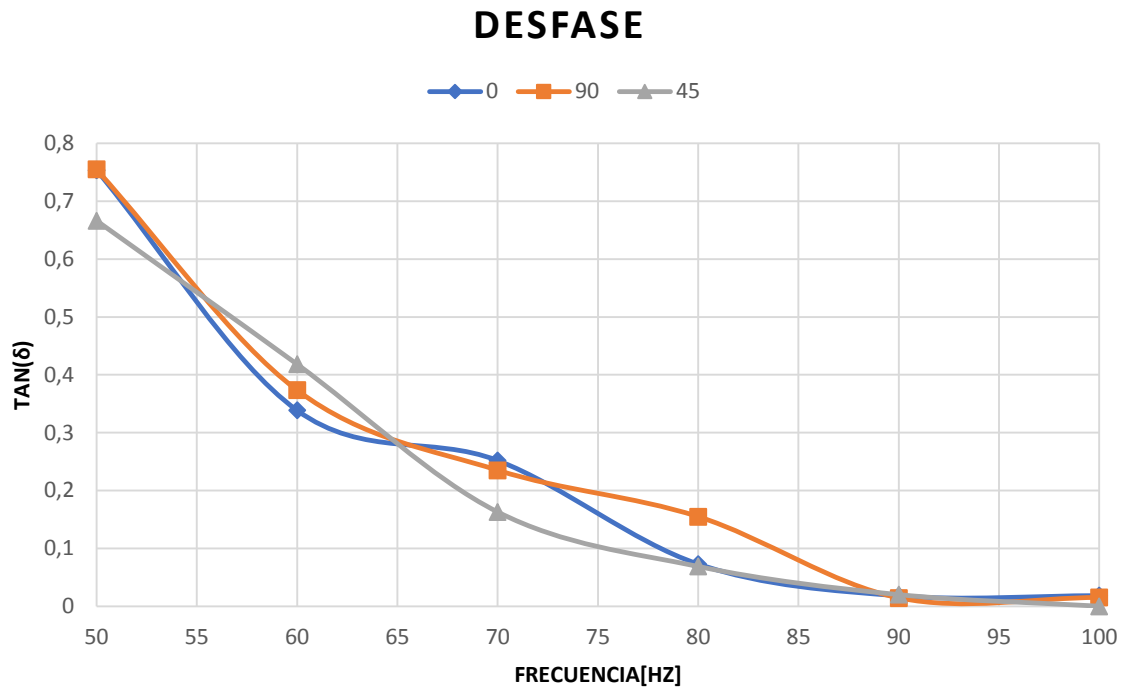
rigidizando proporcionando mayores valores de resistencia para estas condiciones de temperatura (28°C), sin embargo el desfase, disminuye a medida que crece la frecuencia, obteniéndose valores cercanos a cero. Cabe resaltar que el módulo general, elástico y viscoso tienen el máximo valor cuando se tiene una orientación de fibras impresas a 90° como se puede ver en la *figura 17.c*

Figura 18. Grafica Modulo Promedio Vs Frecuencia



De los datos graficados en la *figura 18*, se puede identificar que el módulo tiene un comportamiento lineal creciente en las tres orientaciones, es preciso señalar que la probeta con orientación de fibras a 90° posee un módulo superior en el rango de frecuencia de 50 a 100 Hz, es decir que su comportamiento disipativo es significativo debido a la orientación de sus fibras en comparación con las otras dos orientaciones.

Figura 19. Grafica Desfase Vs Frecuencia



El desfase proporciona una primera idea de la naturaleza reológica del material, por lo tanto, la tangente del ángulo, desfase o tangente de pérdidas es una función viscoelástica dinámica dependiente de la frecuencia, indica la razón entre la componente viscosa y elástica del material. Como se muestra en la *figura 19* el desfase es alto en un rango de frecuencias de 50 a 65 Hz, esto quiere decir que se comporta como un material viscoso, sin embargo, a medida que la frecuencia va aumentando observamos un decrecimiento exponencial comportándose como un material viscoelástico y finalmente en un rango de frecuencia de 90 a 100 Hz, su desfase es mínimo, por lo tanto, su módulo elástico es superior.

Por otra parte, se debe conocer de ante mano el comportamiento del modelo a usar y como afectan sus parámetros en la respuesta del sistema, a continuación, se presenta el módulo de Burgers en el dominio de la frecuencia, aplicando la transformada de Laplace.

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_M + \bar{\varepsilon}_{KV} \quad (3.1.4.3)$$

$$\bar{\varepsilon}_M = \frac{\bar{\sigma}}{E_1} + \frac{\bar{\sigma}}{j\omega * \eta_1} \quad (3.1.4.4)$$

$$\left(j\omega + \frac{E_2}{\eta_2}\right) * \bar{\varepsilon}_{KV} = \frac{\bar{\sigma}}{\eta_2} \quad (3.1.4.5)$$

Donde un símbolo de intercalación (-) sobre un símbolo indica que la cantidad se ha transformado y ahora es una función de la variable compleja $j\omega$ en lugar del tiempo t . Reemplazando las ecuaciones (3.1.4.4 – 3.1.4.5) en la ecuación (3.1.4.3) se obtiene:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{E_1} + \frac{\bar{\sigma}}{j\omega * \eta_1} + \frac{\bar{\sigma}}{\eta_2(j\omega + \frac{E_2}{\eta_2})} \quad (3.1.4.6)$$

Después de multiplicar ambos lados de la ecuación (3.1.4.6) por $\frac{\eta_1\eta_2}{E_2}j\omega(j\omega + \frac{E_2}{\eta_2})$ y organizando los términos se obtiene

$$E^* = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\eta_1 j\omega - \frac{\eta_1\eta_2}{E_2} \omega^2}{1 + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2}\right)j\omega - \frac{\eta_1\eta_2}{E_1E_2} \omega^2} \quad (3.1.4.7)$$

Donde:

E^* : Módulo General del Material

$\bar{\sigma}$: Esfuerzo sometido al material en el dominio de la frecuencia [Pa]

$\bar{\varepsilon}$: Deformación unitaria presentada en el material [mm/mm]

j: Número imaginario

ω : Frecuencia angular $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$

E_1 : Coeficiente elástico de Kelvin – Voigt [Pa]

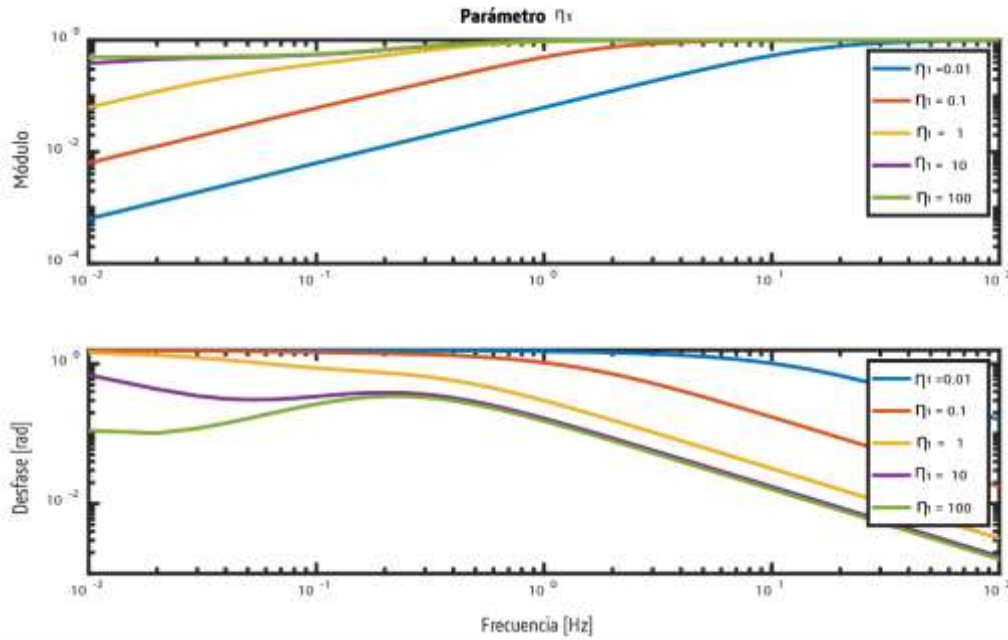
E_2 : Coeficiente elástico de Maxwell [Pa]

η_1 : Coeficiente viscoso de Kelvin – Voigt [Pa · s]

η_2 : Coeficiente viscoso de Maxwell [Pa · s]

A partir de este modelo se generaron unas curvas paramétricas en función de la frecuencia mediante un script en Matlab, con el objetivo de entender la influencia de cada parámetro con respecto a la magnitud del módulo y el desfase presentado. Mientras se varía cada parámetro se dejaron constante los demás parámetros con el valor de 1.

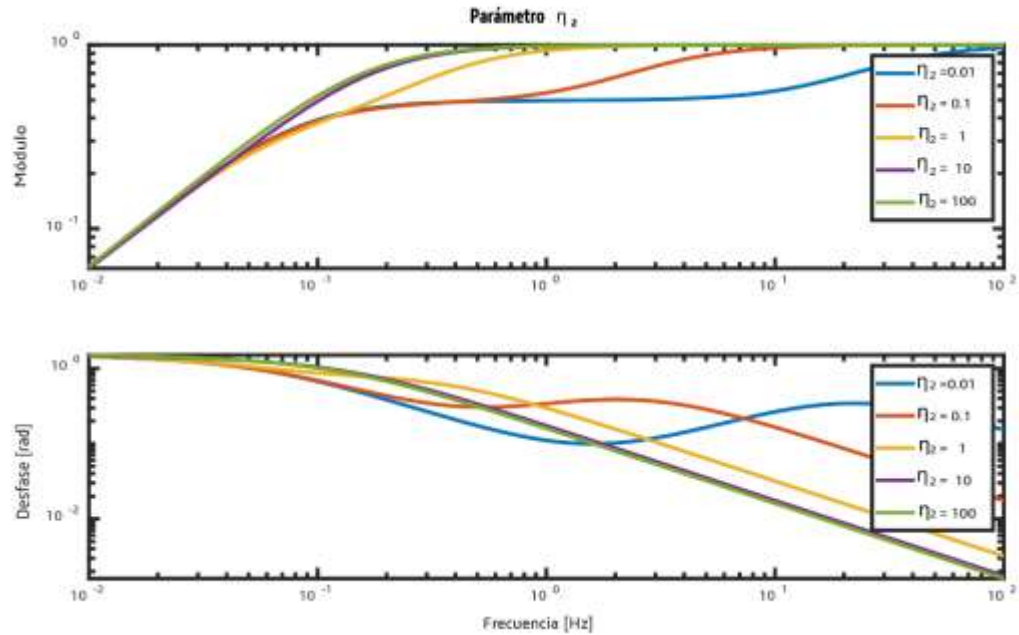
Figura 20. Graficas Parámetro η_1



Parámetro η_1 :

En la *figura 20* se puede evidenciar que al aumentar el parámetro η_1 , el módulo va creciendo linealmente, adicionalmente no se presenta convergencia a frecuencia bajas en el módulo, sin embargo, todos los parámetros tienden a estabilizarse en un rango de frecuencias hasta 100 Hz al módulo dinámico, en este caso de 1. Por otra parte, al ser mayor el parámetro, el desfase es menor y además el valor máximo de la curva se desplaza hacia la izquierda.

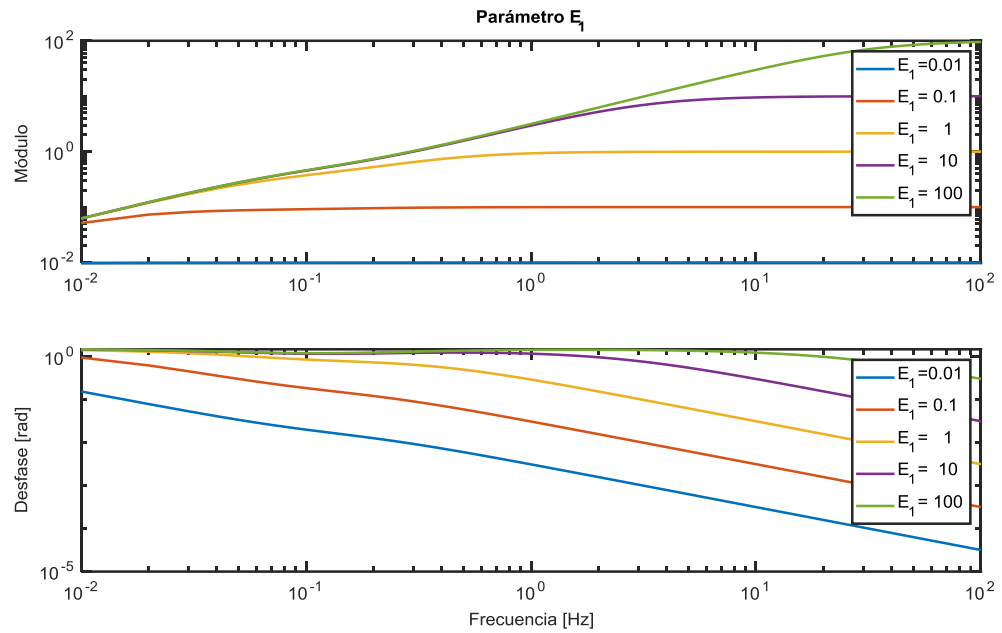
Figura 21. Graficas Parámetro η_2



Parámetro η_2 :

En la *figura 21* se evidencia que al aumentar el parámetro η_2 , el módulo mantiene un régimen lineal hasta 1 Hz, aproximadamente con una pendiente de 1, luego de forma exponencial, estabilizando más rápido en el módulo dinámico. Por otra parte, al aumentar el parámetro η_2 el desfase máximo se traslada hacia la izquierda convergiendo en un desfase máximo de 1, sin embargo, podemos observar que al aumentar la frecuencia no hay disipación, disminuyendo el desfase volviéndose más rígido el material.

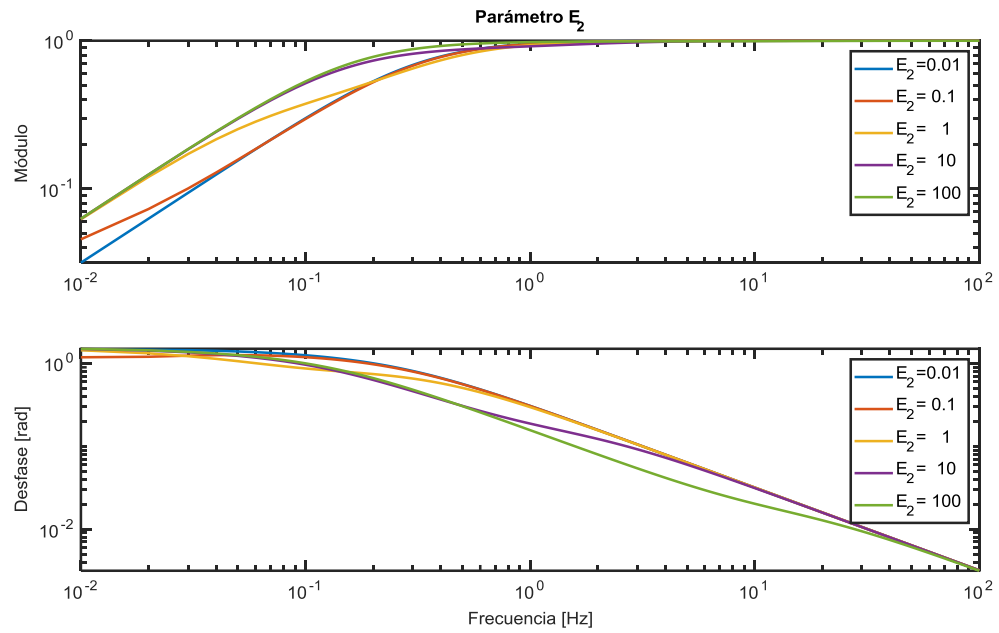
Figura 22. Graficas parámetros E_1



Parámetro E_1 :

En la *Figura 22* al aumentar el parámetro E_1 se ve un claro aumento en el módulo, el cual crece de forma exponencial y luego se estabiliza en cierta frecuencia para cada parámetro. Además, al aumentar el parámetro, el desfase aumenta tendiendo a converger en 1 a frecuencias bajas.

Figura 23. Graficas Parámetro E_2



Parámetro E_2 :

Como se observa en la *figura 23*, para frecuencia bajas, a mayor parámetro E_2 se aprecia un notable crecimiento exponencial en el módulo, al ir aumentando la frecuencia y se estabiliza en el módulo dinámico de 1Hz. Por otra parte, el desfase presenta poca variabilidad sin embargo al ser mayor el parámetro, el desfase disminuye en el intervalo de frecuencias de 0,1 a 10 Hz, pero converge a frecuencias bajas (0,01Hz) y altas (100 Hz) respectivamente en 1 y en 0.

4. CALIBRACION Y AJUSTE DEL MODELO

La calibración es el método utilizado para encontrar las constantes de un modelo matemático y predecir el comportamiento de un fenómeno, en este caso se calibró mediante software donde se usó el lenguaje MATLAB para programar el SCRIPT utilizando la función LSQNONLIN de la librería OPTIMIZATION TOOLBOX V8.4, la cual funciona de manera iterativa minimizando el error cuadrático de nuestra función objetivo.

$$\text{Función Objetivo} = E_{Exp} - E_{Teo}$$

Antes de comenzar el proceso de calibración, se deben organizar los datos en forma de vector columna, en el cual se incluye primeramente los valores del módulo real y posteriormente del imaginario a cada frecuencia, lo anterior con el objetivo de trabajar con datos de la misma escala, como sería en caso contrario calibrar con el módulo y el desfase, donde se presentaría mayor error y complejidad en la calibración.

Donde:

$$E_{Exp} = E_{Teo} = \begin{bmatrix} E_{Real} \\ E_{Imag} \end{bmatrix}$$

$$E_{Real} = \begin{bmatrix} E_{1R} \\ \vdots \\ E_{nR} \end{bmatrix}$$

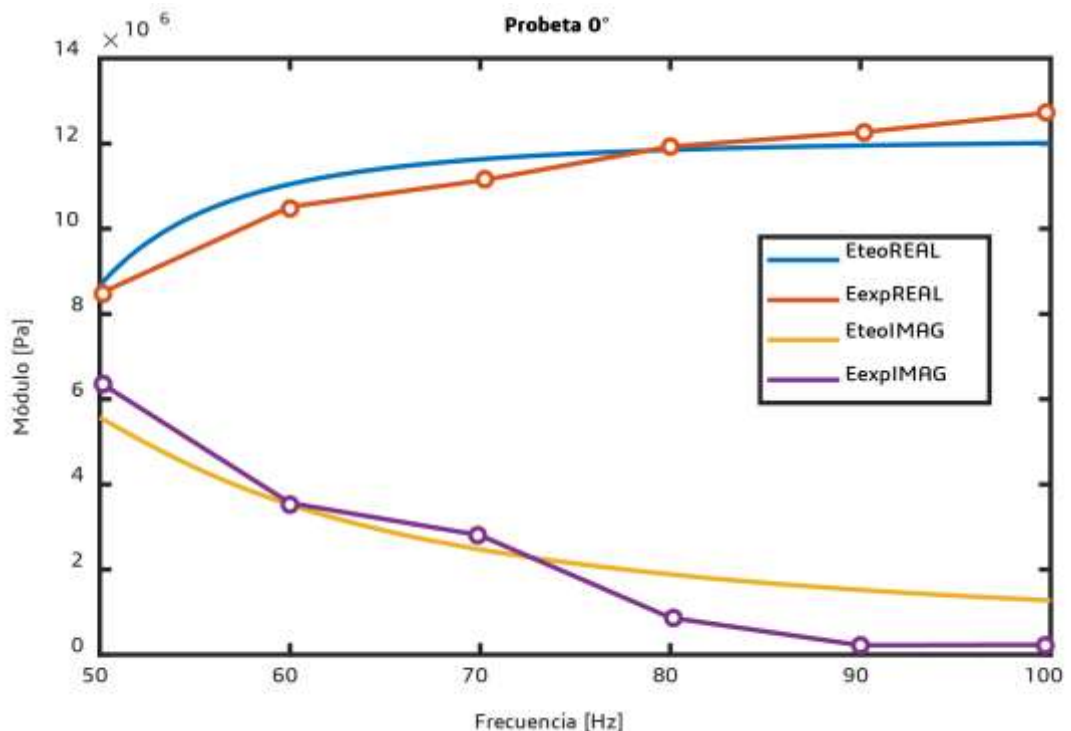
$$E_{Imag} = \begin{bmatrix} E_{1I} \\ \vdots \\ E_{nI} \end{bmatrix}$$

En el módulo experimental se importan los valores calculados en forma de vector columna ordenados como se indicó anteriormente desde Excel, mediante la herramienta XLSREAD de MATLAB para cada probeta y para el módulo teórico se usa el modelo de Burgers para calcular los valores con las frecuencias trabajadas, además de indicar los parámetros a calcular como un vector.

Adicionalmente, para verificar el ajuste del modelo teórico con los valores experimentales se usó el coeficiente de determinación (R^2), tanto para el modelo en general como para el componente real e imaginario.

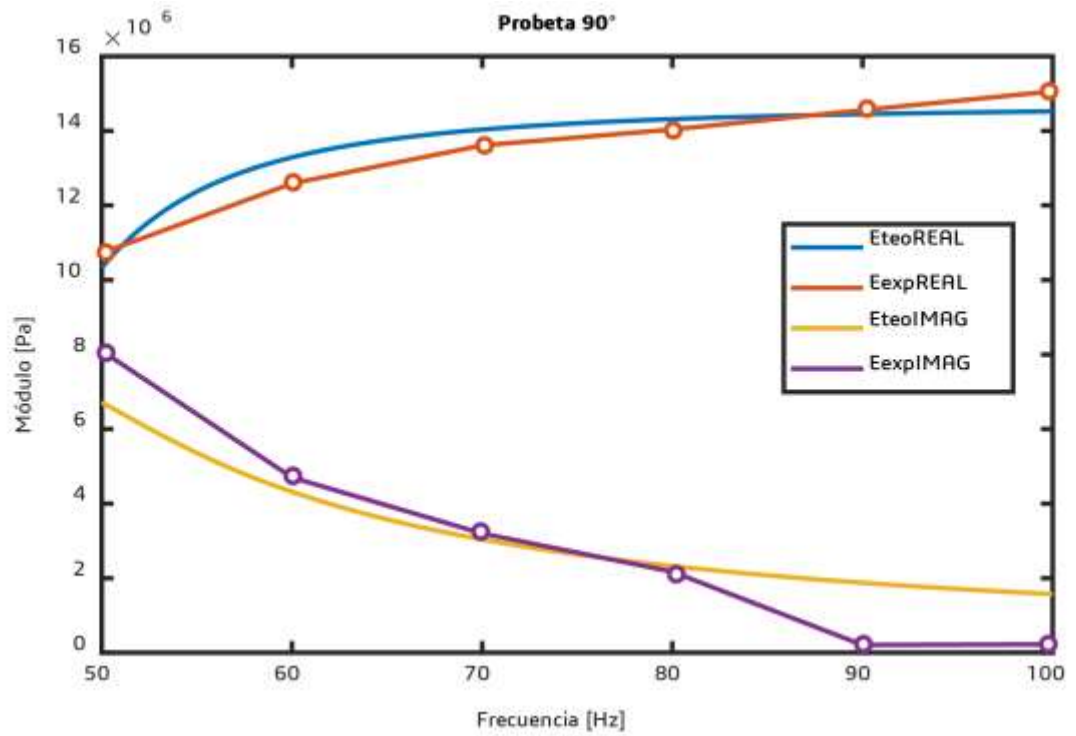
A continuación, se muestran las gráficas obtenidas en el proceso de calibración con su respectivo ajuste cuadrático para cada orientación.

Figura 24. Calibración y Ajuste de la Probeta 0°



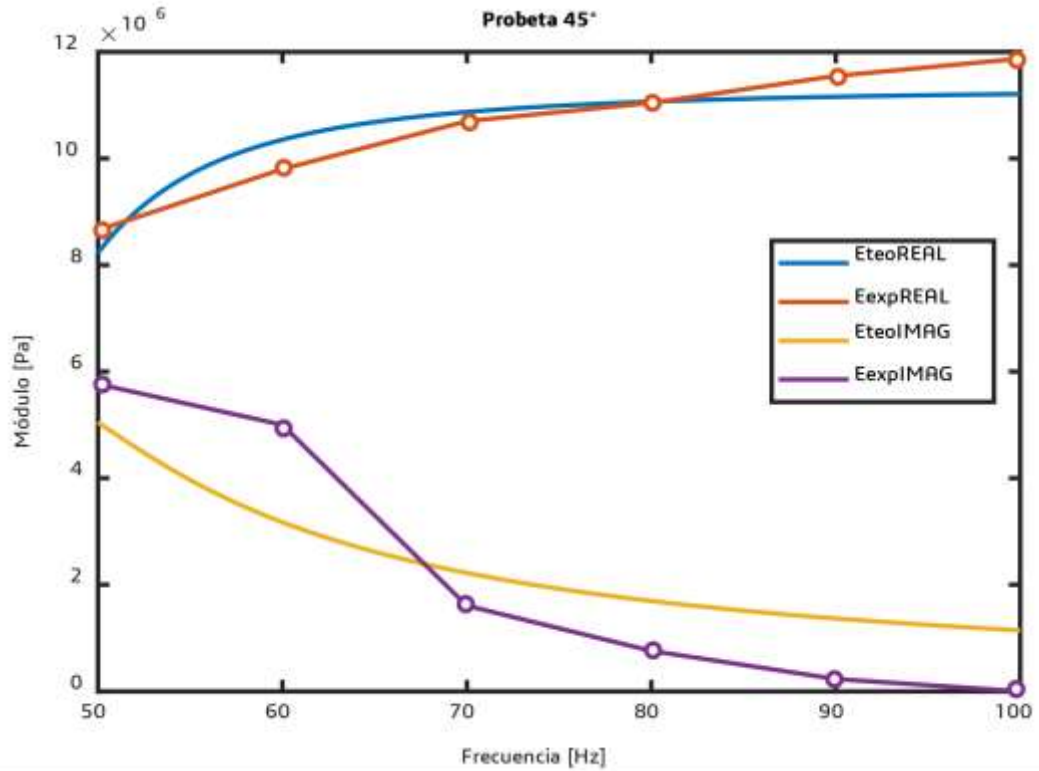
$$R^2_{Real} = 0,9002 \quad R^2_{Imaginario} = 0,8425 \quad R^2_{General} = 0,9789$$

Figura 25. Calibración y Ajuste de la Probeta 90°



$$R^2_{Real} = 0,9026 \quad R^2_{Imaginario} = 0,8508 \quad R^2_{General} = 0,9790$$

Figura 26. Ajuste y calibración de la probeta 45°



$$R^2_{Real} = 0,8454 \quad R^2_{Imaginario} = 0,7566 \quad R^2_{General} = 0,9646$$

A continuación, se muestran los parámetros obtenidos en el proceso de calibración para cada orientación:

Tabla 1. Ajuste y Calibración de las Probetas

Orientación/Parámetro	η_1 [Pa·s]	η_2 [Pa·s]	E_1 [Pa]	E_2 [Pa]
0°	$3,23 \cdot 10^7$	$3,06 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^7$	$2,62 \cdot 10^5$
45°	$2,88 \cdot 10^5$	$1,29 \cdot 10^7$	$1,13 \cdot 10^7$	$6,50 \cdot 10^4$
90°	$3,60 \cdot 10^5$	$1,33 \cdot 10^8$	$1,47 \cdot 10^7$	$1,16 \cdot 10^8$

En la tabla anterior se puede evidenciar los parámetros, los cuales nos indican ciertas características del material, a continuación, se realiza un análisis para cada componente:

- El mayor valor de parámetro η_1 lo posee la orientación de 0° , lo cual coincide con el análisis del modelo, pero si analizamos el comportamiento para nuestros datos, valores muy grandes de este parámetro no aportan información ya que converge tanto el módulo y desfase.
- Respecto al parámetro η_2 se evidencia un mayor valor en la probeta de 90° lo cual significaría una incongruencia respecto al modelo, pero para valores muy grandes de este parámetro en las frecuencias trabajadas, no es muy influyente tanto para la magnitud y el desfase.
- Para el parámetro E_1 se encuentra con un mayor valor en la probeta de 90° , manteniendo un mismo orden de 10^7 para las demás, en donde coincide que a mayor valor numérico de parámetro presenta un mejor módulo y desfase, teniendo como mejor amortiguador pasivo en el respectivo orden a las probetas con orientación de $90^\circ, 0^\circ$ y 45° .
- Para valores muy grandes del parámetro E_2 no afectan significativamente al módulo y el desfase, ya que presenta convergencia.

5. VALIDACION

En el proceso de validación se realizó un banco de laboratorio para la Escuela de Ingeniería Mecánica con el fin de complementar el proyecto de grado y ampliar los conocimientos de los estudiantes que cursan la asignatura de vibraciones mecánica en la escuela, además de validar las conclusiones anteriormente obtenidas de los ensayos estandarizados por la norma.

El banco de laboratorio es un sistema diseñado con 4 resortes como apoyo para brindar flexibilidad al sistema. Las partes del banco de laboratorio se aprecian en la *figura 27*, donde está apoyado en una placa de madera para dar estabilidad, sobre esta hay unos soportes para los resortes y los sujetadores de las probetas impresos en ABS al igual que el soporte del motor, en el intermedio se encuentran los resortes en acero inoxidable diseñados para deformarse 2 mm al poner la placa de acero de aproximadamente 1 kg de peso, en la *Figura 28* se muestra el esquema y sus respectivas características obtenidas para satisfacer la condición de diseño. En la parte superior se encuentra ubicada la placa metálica HR donde está apoyado el motor con su respectiva masa excéntrica.

El análisis de vibraciones constó de 3 fases, en las cuales se usaron el software LabVIEW, un acelerómetro y una tarjeta de adquisición de datos de la National Instrument, adicionalmente se usó una fuente de voltaje regulable para la fase 2 y 3:

Figura 27. Diseño del Banco de Laboratorio

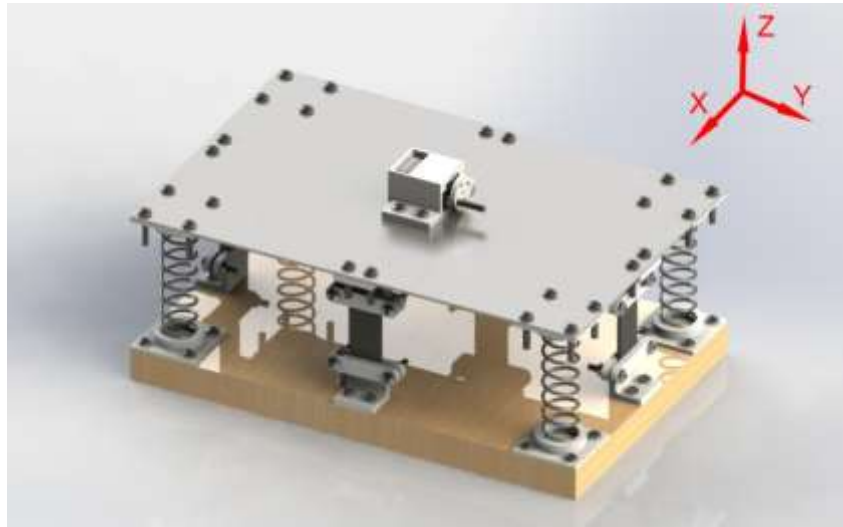


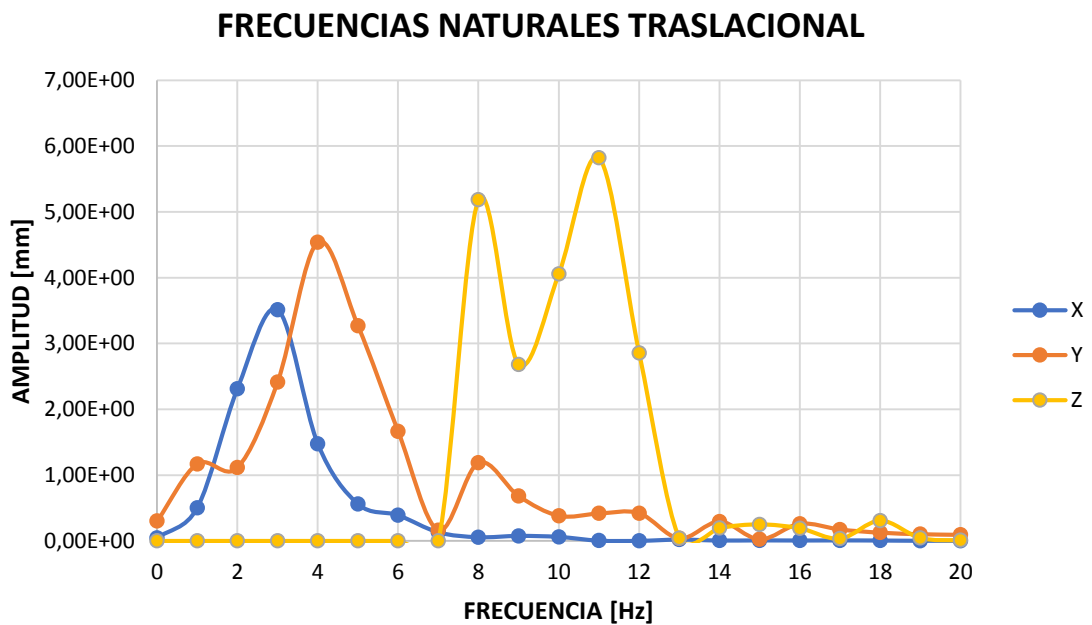
Figura 28. Diseño del Resorte



5.1 FASE 1

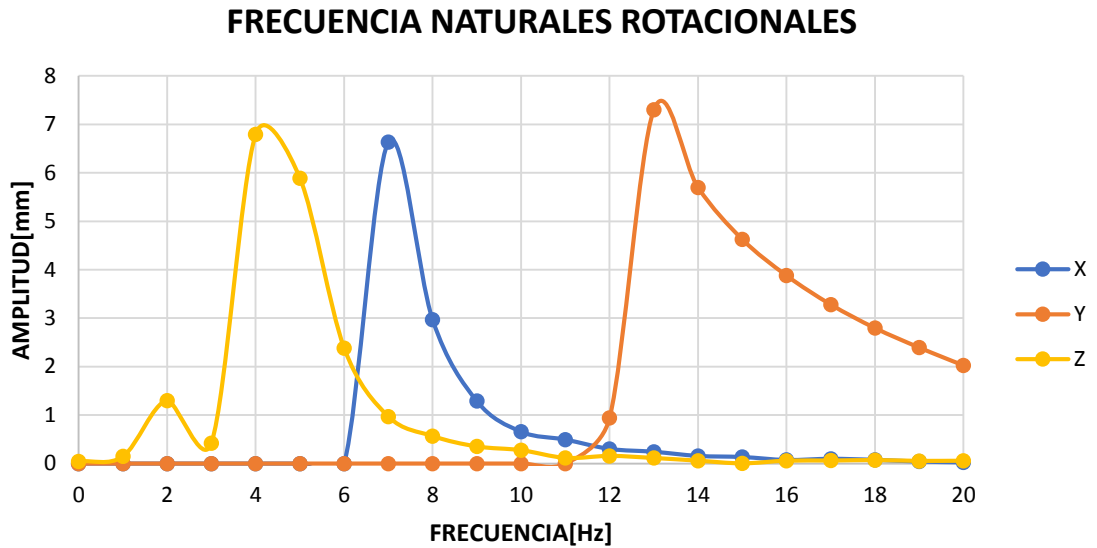
Caracterizar el sistema hallando sus frecuencias naturales en los 6 grados de libertad, se posicionó el acelerómetro (sensor de aceleración) de lado opuesto a donde se realizó la perturbación del sistema, esto con el fin de aumentar la respuesta deseada y atenuar las no deseadas.

Figura 29. Frecuencias Naturales Traslacional



En la *figura 29*, Se evidencia la frecuencia natural traslacional en X, Y y Z respectivamente en 3,4 y 11 Hz, además en la curva de Z se presenta otro pico, el cual pertenece a la frecuencia rotacional de X como se observa en la *figura 30*, debido a que el sensor se tuvo que ubicar excéntricamente por limitaciones de espacio.

Figura 30. Frecuencias Naturales Rotacionales



En la *figura 30*, Se evidencia la frecuencia natural rotacional en X, Y y Z respectivamente en 7,13 y 4 Hz.

5.2 FASE 2

Luego de caracterizar el sistema, se procede a perturbar el sistema mediante el motor con una carga excéntrica con una fuente reguladora sin adicionar el material amortiguador, en este caso solo se realizó mediciones de frecuencias en los ejes traslacionales, ya que el principal eje de interés debido a los ensayos dinámicos realizados previamente fue el traslacional en Z.

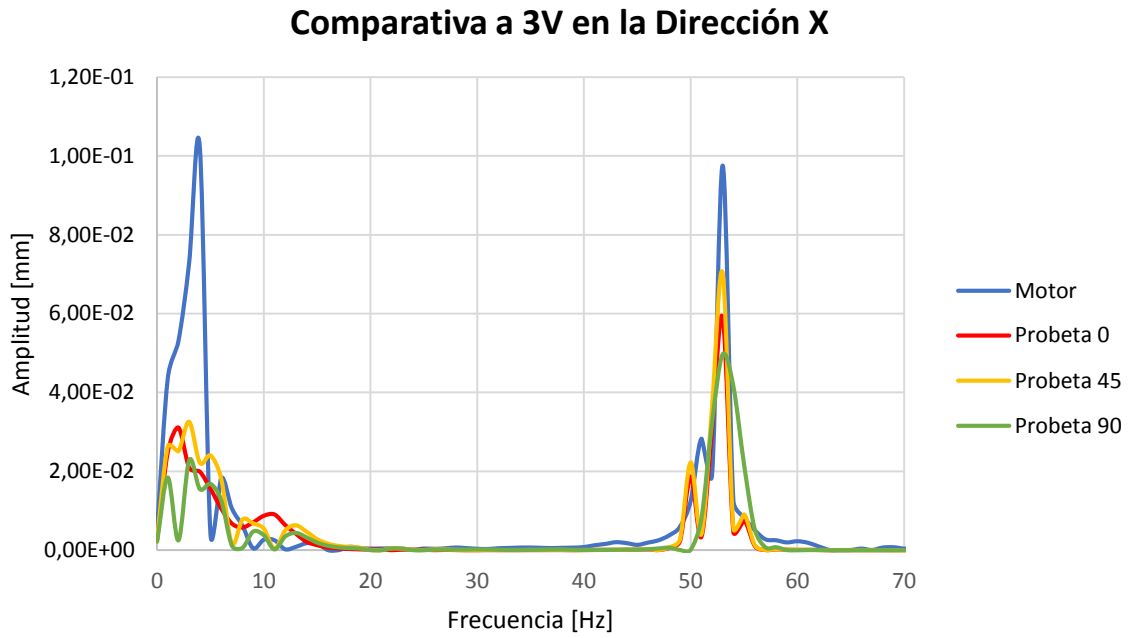
Figura 31. Análisis de vibraciones del Banco sin amortiguamiento



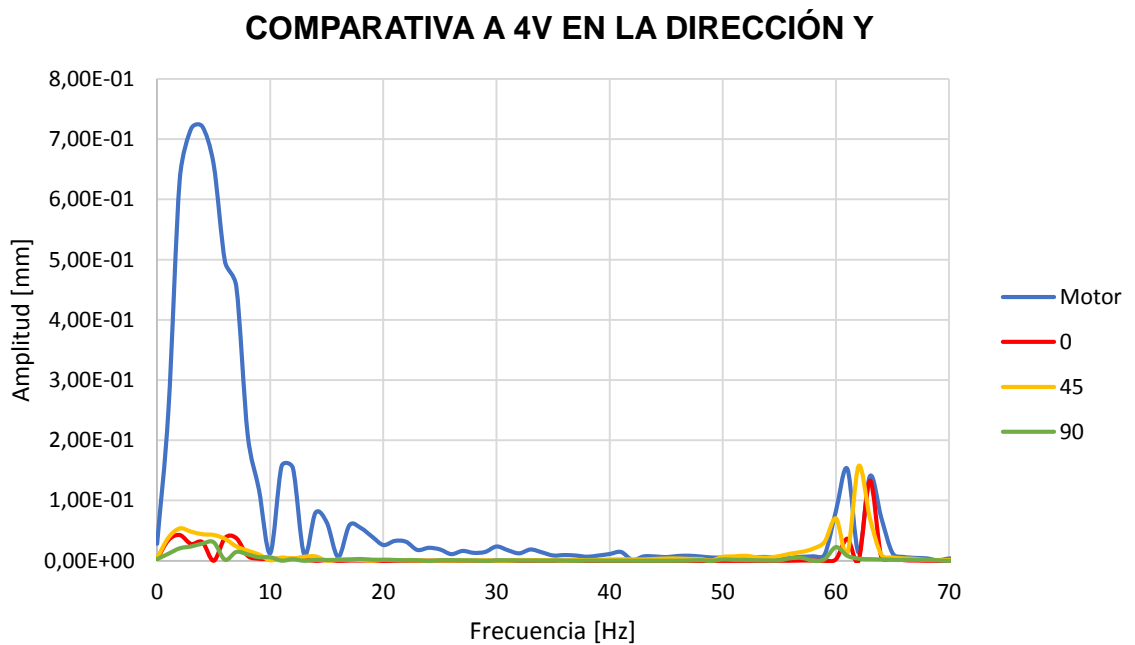
5.3 FASE 3

Posteriormente de analizar el sistema sin amortiguamiento, se realizó la misma medición de la fase 2 pero adicionando el material amortiguador, con el fin de comprobar el análisis dinámico con un banco experimental para cada una de las 3 orientaciones de las fibras, con los datos obtenidos en estos análisis se graficó el comportamiento disipativo para cada dirección del eje a un voltaje seleccionado.

Figura 32. Comportamiento disipativo del banco. (a) Dirección x; (b) Dirección Y ; (c) Dirección (z)

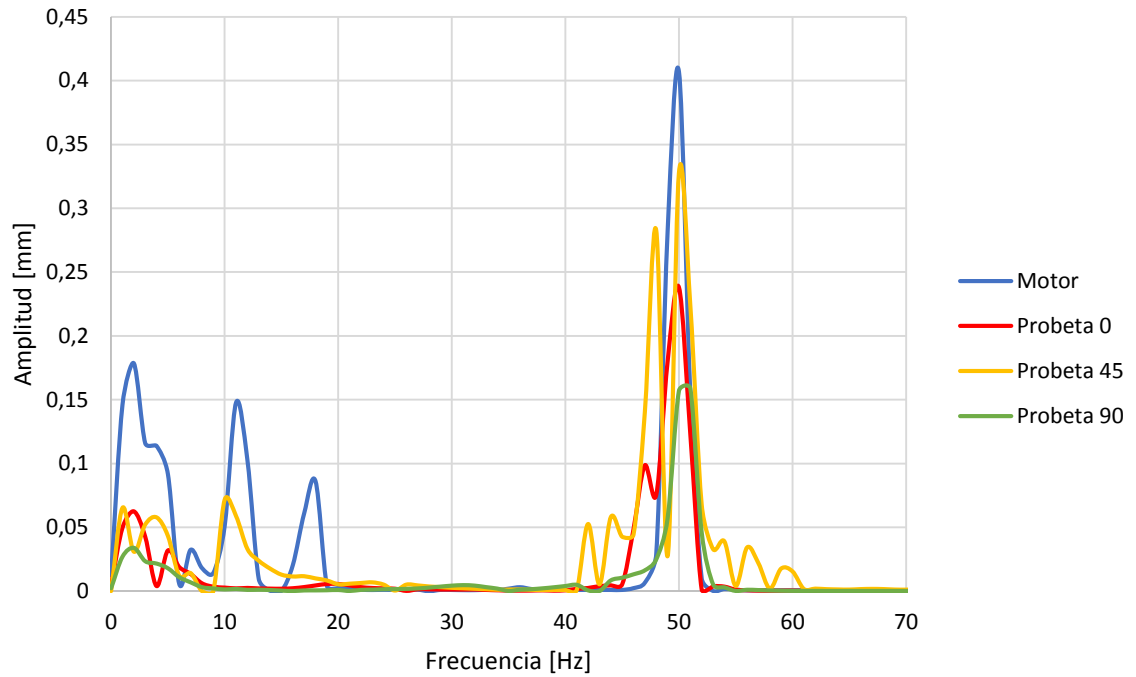


(a)



(b)

COMPARATIVA A 3V EN LA DIRECCIÓN Z



(c)

En la *Figura 32*. Se observó los picos de frecuencia del sistema en el intervalo de 0-20 Hz y los otros picos de frecuencia ocasionados por el motor principalmente en el rango de 40-60 Hz. Además, se aprecia el amortiguamiento al implementar cualquiera de las probetas, pero aún más importante se valida el desempeño óptimo para la orientación de 90°, donde se obtiene una menor amplitud en la respuesta del sistema.

6. CONCLUSIONES

- El modelo de Burgers posee 4 parámetros que permiten darle buena flexibilidad para ajustarse al comportamiento real de los materiales viscoelásticos, ya que cada parámetro representa un comportamiento diferente del material.
- A partir de los ensayos experimentales según de la norma ASTM 5026, la orientación con mejores propiedades disipativas de energía fue la de 90°.
- El modelo de Burgers presentó un buen ajuste en el material NinjaFlex para las 3 orientaciones de forma general y por componentes (elástica y viscosa).
- El parámetro con mayor sensibilidad para el ajuste del material TPU fue el E1, ya que representó fuertemente el comportamiento general del material.
- Se evaluó el comportamiento disipativo de las probetas a distintas orientaciones mediante un banco de laboratorio, obteniendo el desempeño más óptimo en las probetas de 90°, con lo cual se complementa y corrobora los resultados obtenidos en el ensayo dinámico realizado con la norma.

BIBLIOGRAFIA

BANDYOPADHYAY, Amit. HEER, Bryan. W. M. Keck Biomedical Materials Research Laboratory, School of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University, Pullman.

BEGUM, Mine. DURMUS, Ali. Istanbul University, Engineering Faculty, Department of Chemical Engineering.

CONTROL DE VIBRACIONES. Departamento de ingeniería Mecánica ,Energética y de Materiales. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web: http://www.imem.unavarra.es/EMyV/pdfdoc/vib/vib_control.pdf

ELASTÓMEROS Termoplásticos. [Revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web : <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/elastomeros-termoplasticos-tpe.html>

GERE, James y GOODNO, Barry. Mechanic of Materials, 7 ed. United States: Cengage Learning, 2009. ISBN 978-0-534-55397-5.

GRAHAM, Kelly. Fundamentals of Mechanical Vibrations, 2 ed. United States: McGraw- Hill Higher Education, 2000. ISBN 0-07-230092-2.

INMAN, Daniel. Engineering Vibration, 4 ed. United States: Pearson, 2014. ISBN 978-0-13-287169

KREITH, Frank y MAHAJAN Roop, 1 ed. Canada: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 1-4200-5321-3.

KYEONG-SOO, Yun. SUNG-KIE, Youn . Department of Mechanical Engineering,KAIST.2017.

LAKES, Roderic. Viscoelastic Materials, 1 ed. United States: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-88568-3.

Materiales Viscoelásticos. [Revisado 8 de junio de 2019]. Disponible en la web: <https://es.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticidad>

MOITA, José. ARAÚJO ,Aurélio. IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa Av. Rovisco Pais, 2017.

PINTO, William. CASTELLO, Daniel. RITTO, Thiago. Mechanical Engineering Department, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

Principios de Reología. [Revisado 8 de junio 2019].Disponible en la web: http://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg_15/capitulo_2.htm

QIMING, Liu. DONG, Ruan. XIAODONG, Huang. Faculty of Science, Engineering and Technology, Swinburne University of Technology.2017.

ROULEAU, Lucie. PRIK, Rogério. PLUYMERS, Bert. DESMET, Wim. Department of mechanical engineering, Katholieke Universiteit Leuven. 2015.

TÜRK, Daniel. KUSSMAUL, Ralph. Product Development Group Zürich pd|z, ETH Zurich, Leonhardstr. 21, 8092 Zürich, SwitzerlandbInspire AG, Technoparkstrasse.

VFOMBUENA, T. Boronat, L. Sanchez-Nacher, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart. Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. [revisado 8 de junio 2019]. Disponible en la web:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79849/6315-25177-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

VISCOELASTICIDAD. [Revisado 8 de junio de 2019]. Disponible en la web:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>