



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: ESTUDIO COMPARATIVO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO EN VIBRACIÓN TRANSVERSAL DE CORDONES
ELASTOMÉRICOS**

**AUTOR: SRTA. DÁVILA RODRÍGUEZ, MICHELLE ESTEFANÍA
SR. MARTÍNEZ POZO, ALEX FABRICIO**

DIRECTOR: PHD. SÁNCHEZ SÁNCHEZ, XAVIER ROLANDO

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“ESTUDIO COMPARATIVO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO EN VIBRACIÓN TRANSVERSAL DE CORDONES ELASTOMÉRICOS”** realizado por la señorita **DÁVILA RODRÍGUEZ MICHELLE ESTEFANÍA** y el señor **MARTÍNEZ POZO ALEX FABRICIO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **DÁVILA RODRÍGUEZ MICHELLE ESTEFANÍA** y el señor **MARTÍNEZ POZO ALEX FABRICIO** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 4 de julio de 2019



Ing. Xavier Rolando Sánchez Sánchez Phd.
Director del proyecto



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Dávila Rodríguez, Michelle Estefanía**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estudio Comparativo Teórico – Experimental Del Comportamiento En Vibración Transversal De Cordones Elastomérico** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma:

Michelle Estefanía Dávila Rodríguez

C.C.: 1720369576



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Martínez Pozo, Alex Fabricio**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estudio Comparativo Teórico – Experimental Del Comportamiento En Vibración Transversal De Cordones Elastoméricos** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Alex M'.

Alex Fabricio Martínez Pozo

C.C.: 0401493697



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Dávila Rodríguez, Michelle Estefanía**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estudio Comparativo Teórico – Experimental Del Comportamiento En Vibración Transversal De Cordones Elastoméricos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma:

Michelle Estefanía Dávila Rodríguez

C.C.: 1720369576



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Martínez Pozo, Alex Fabricio**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estudio Comparativo Teórico – Experimental Del Comportamiento En Vibración Transversal De Cordones Elastoméricos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Alex M.'.

.....
Alex Fabricio Martínez Pozo

C.C.: 0401493697

DEDICATORIA

A mis padres Gino y Rosio, por el apoyo incondicional durante toda mi etapa estudiantil, por estar a mi lado siempre que lo necesite, por enseñarme a levantar después de una caída y no dejar que me rinda, por inculcarme valores que han hecho de mí una persona honesta y perseverante. Por estar preocupados de mí después de cada entrega de trabajo. Por enseñarme que todo lo que me propongo se puede cumplir con esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos Santiago y Nicole que han sido de un gran apoyo durante toda mi vida, por ayudarme a cumplir muchas de mis metas en esta carrera y estar a mi lado en cada paso dado,

A mis abuelitos Hilda, Ana y Gonzalo por todo el amor y cariño brindado, por ser una inspiración para mí, por enseñarme que todo con esfuerzo se puede lograr, por ser mis ángeles de la guardia.

A mi familia de quienes siempre he recibido palabras de aliento y apoyo cuando lo he necesitado.

Michelle Estefanía Dávila Rodríguez.

DEDICATORIA

A mis padres José Pedro y Aidee Virginia.

A mis hermanos, abuelos y tíos.

Alex Fabricio Martínez Pozo.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por darme salud, fortaleza y capacidad para poder culminar esta meta junto a mi familia, amigos y personas que son parte de este camino.

Agradezco a mis padres, quienes son mi fortaleza, por enseñarme a levantar después de una derrota y aprender a valor las cosas importantes de la vida, sin su ayuda durante toda esta etapa no hubiera podido cumplir mis metas.

A mis hermanos Santiago y Nicole quienes se han convertido con el pasar del tiempo en un ejemplo de profesionales para mí, por brindarme su apoyo y confianza.

A Hernán por ser mi mejor amigo y compañero durante todo este periodo por apoyarme incondicionalmente y no dejarme rendir, por ayudarme a seguir adelante a pesar de que las dificultades.

A mis amigos y compañeros del colegio y universidad que me han dado una mano cuando se ha necesitado, siempre apoyándonos unos a otros para poder resolver problemas ante las adversidades.

Al Ing. Xavier Sánchez por los conocimientos impartidos y el apoyo brindado durante este proyecto.

Al personal y docentes del laboratorio de manufactura quienes nos brindaron su apoyo y consejos para la construcción del banco de pruebas.

Gracias a todos los que aportaron con sus conocimientos para poder realizar este trabajo.

Michelle Estefanía Dávila Rodríguez.

AGRADECIMIENTO

A mis padres José y Aidee por el amor incondicional y esfuerzo, fueron el motor que me impulso a seguir por el camino correcto.

A mis abuelos Aida y Miguel, mis hermanos Andrés, Leivy y Mateo, a mi tío Miguel y toda mi familia por todo el apoyo brindado a lo largo de estos años, su apoyo y consejo nunca faltó en los momentos que más lo necesité.

A mis amigos por todos los felices y tristes momentos, aunque nuestros caminos se separen, seguiremos haciendo música desde donde quiera que estemos.

A Nicole, por escuchar y comprenderme en los momentos de necesidad.

Al personal del laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de Fuerzas Armadas - ESPE por la colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Alex Fabricio Martínez Pozo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
AUTORIZACIÓN.....	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
AGRADECIMIENTO	ix
ÍNDICE DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vxi
SIMBOLOGÍA	xviii
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT	xxiii
 CAPÍTULO I	
GENERALIDADES	
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.3. ANTECEDENTES.....	5
1.4. ALCANCE.....	8
1.5. OBJETIVOS.....	9
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	9
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	9

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ELASTÓMEROS.....	10
2.1.1. Enlaces Cruzados.....	10
2.1.2. Curva Esfuerzo - Deformación	12
2.1.3. Siliconas	13
2.2. ABLANDAMIENTO DE ELASTÓMEROS	14
2.2.1 Efecto Mullins	14
2.3. ASPECTOS TEÓRICOS.....	16
2.3.1. Conceptos cinemáticos.....	16
2.3.2. Tensión Uniaxial	17
2.3.3. Vibración transversal de una cuerda elastómera	18
2.4. MODELOS MATEMÁTICOS	19
2.4.1. Ecuación constitutiva de Zúñiga-Beatty.....	19
2.4.2. Mooney-Rivlin Material	21
2.4.3. Standard Bio-Material Model.....	22
2.4.4. Gent Model.....	22
2.4.5. Classical James-Guth Cubic Network Model	22
2.4.6. Full-Network Model	23
2.5. MATLAB®	24

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1. DISEÑO DE LAS PIEZAS MECÁNICAS DEL BANCO DE PRUEBAS	25
3.1.1. Diseño del Tornillo de Rosca Trapezoidal.....	25
3.1.1.1 Parámetros para el tornillo de rosca trapezoidal.....	26
3.1.1.2 Construcción	27
3.1.2. Diseño de Pinzas de Sujeción.....	27
3.1.2.1 Construcción	28
3.1.3. Diseño de Soporte de Pinzas.....	29

3.1.3.1 Construcción	30
3.1.4. Diseño de Bases	30
3.1.4.1 Construcción	31
3.1.5. Peso de la estructura del Banco de Pruebas.....	32
3.2. SELECCIÓN DE EQUIPOS.....	32
3.2.1. Selección de motor a pasos	32
3.2.1.1 Circuito motor a pasos	32
3.2.2. Selección del láser y sensor.....	34
3.2.2.1 Circuito del Sensor láser.....	36
3.2.3. Selección del contador de frecuencia.....	38
3.3. ENSAMBLAJE DEL BANCO DE PRUEBAS	38
3.4. MOLDES DE PROBETAS	41
3.4.1. Moldes probetas de cordones elastoméricos	41
3.4.2. Moldes probetas de ensayos a tracción	42
3.5. FABRICACIÓN DEL MATERIAL ELASTÓMERO	43
3.5.1. Selección de la silicona.....	43
3.5.2. Procedimiento de fabricación	44

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO

4.1. DENSIDAD	48
4.2. ROTURA DE LOS CORDONES Y LONGITUD DE PRUEBA	49
4.3. TOMA DE DATOS DE CARGA Y DESCARGA DE LOS ELASTÓMEROS	50
4.4. ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	52
4.5. PROGRAMACIÓN	54
4.5.1. Programa para modelos matemáticos	54
4.5.2. Programas para el ajuste de datos	55
4.5.2.1 Función $fdif$:	56
4.5.2.2 Función opt	57
4.5.3. Interfaz Gráfica.....	58

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ENSAYOS A TRACCIÓN	61
5.1.1. <i>Frecuencia Fundamental de Vibración</i>	61
5.1.2. <i>Parámetro de ablandamiento del material</i>	62
5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES CARGA – DESCARGA	63
5.2.1. <i>Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 1.5%</i>	63
5.2.2. <i>Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 1.75%</i>	67
5.2.3. <i>Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 2%</i>	70
5.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE AJUSTE.....	74
5.4. GAUSSIANO – NO GAUSSIANO.....	76

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS FINANCIERO

6.1. COSTOS DIRECTOS.....	80
6.2. COSTOS INDIRECTOS.....	82
6.3. COSTOS TOTALES	83

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES	84
6.4. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86

BIBLIOGRAFÍA	88
---------------------------	-----------

ANEXOS	93
---------------------	-----------

ANEXO A

DEFINICIONES	94
--------------------	----

ANEXO B

MEMORIAS DE CÁLCULO.....	96
--------------------------	----

ANEXO C

CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN.....	97
ANEXO D	
DIAGRAMAS DE FLUJO.....	99
ANEXO E	
ENSAYOS	101
ANEXO F	
ANÁLISIS.....	103
ANEXO G	
PLANOS GENERALES Y DE DETALLE.....	105
ANEXO H	
CATÁLOGO DE EQUIPOS	107
ANEXO I	
NORMAS UTILIZADAS	109
ANEXO J	
RESPALDO FOTOGRÁFICO	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Parámetros de Diseño</i>	25
Tabla 2	<i>Entradas digitales</i>	33
Tabla 3	<i>Entradas digitales para variables de control</i>	33
Tabla 4	<i>Rango de Frecuencias Obtenido</i>	37
Tabla 5	<i>Características Relevantes de la silicona RTV-2</i>	44
Tabla 6	<i>Densidades de los Cordones de Silicona RTV-2. Promedios de 9 muestras</i>	48
Tabla 7	<i>Distancia de Rotura y % de Elongación</i>	49
Tabla 8	<i>Datos Parciales de Carga y Descarga de un cordón de 1.75% - Lote 16</i>	51
Tabla 9	<i>Resultados del ensayo a tracción</i>	53
Tabla 10	<i>Nombre de función y datos de entrada para la función en Matlab®</i>	55
Tabla 11	<i>VARIABLES de entrada y salida para las funciones de los modelos</i>	55
Tabla 12	<i>VARIABLES de ajuste para cada modelo</i>	56
Tabla 13	<i>VARIABLES de entrada para la función fdif</i>	56
Tabla 14	<i>VARIABLES de entrada para la función opt</i>	57
Tabla 15	<i>Parámetros para los modelos</i>	61
Tabla 16	<i>Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 1.5%</i>	64
Tabla 17	<i>Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 1.75%</i>	68
Tabla 18	<i>Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 2%</i>	71
Tabla 19	<i>Dispositivos y Componentes Varios</i>	80
Tabla 20	<i>Componentes Eléctricos</i>	81
Tabla 21	<i>Materiales</i>	81
Tabla 22	<i>Total Costos Directos</i>	82
Tabla 23	<i>Uso de Laboratorios</i>	82
Tabla 24	<i>Varios</i>	82
Tabla 25	<i>Total Costos del Proyecto</i>	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dos ciclos carga y descarga en tracción obtenido para el copolímero de etileno.....	6
Figura 2. (a) Cadena aleatoria y (b) Cadena orientada.....	11
Figura 3. Enlaces cruzados.....	11
Figura 4. Curva esfuerzo-deformación Polimeros.	12
Figura 5. Estructura monomérica de la silicona.....	13
Figura 6. Efecto Mullins en los elastómeros.....	15
Figura 7. Representación gráfica del Efecto Mullins.....	15
Figura 8. Detalle central del tornillo trapezoidal.	26
Figura 9. Partes de las pinzas de sujeción.....	28
Figura 10. Pinza de Grilon, Vista Delantera / Vista Posterior.....	29
Figura 11. Soporte de pinzas y tuerca del tornillo trapezoidal.....	29
Figura 12. Base lateral del banco de pruebas.....	31
Figura 13. Especificaciones motor NEMA 23 - M1233051.....	32
Figura 14. Esquema de conexión motor nema23 y controlador BL-TB6562-v2.....	33
Figura 15. Esquema de conexión pulsadores, botones y Arduino.....	34
Figura 16. Interrupciones del cordón elastómero en el rayo láser.....	34
Figura 17. Quarton - Módulo láser VLM-650-02 LPA.....	35
Figura 18. Caja del Láser.....	36
Figura 19. Discos Intercambiables.....	37
Figura 20. Modulo receptor de láser Ky-008.....	37
Figura 21. Circuito para toma de datos.....	38
Figura 22. Unión de bases de acero, soporte de pinzas con el tornillo y guías.....	39
Figura 23. Unión soporte – pinza.....	39
Figura 24. Colocación del motor a pasos.....	40
Figura 25. Ensamble banco de pruebas.....	41
Figura 26. Moldes para construcción del material.....	42
Figura 27. Medidas para las probetas de ensayo a tracción.....	43

Figura 28. Sensor de Temperatura y humedad relativa.....	44
Figura 29. Preparación de la mezcla del material	45
Figura 30. Elaboración de cordones por el método de unión.....	46
Figura 31. Extracción de cordones de los moldes.....	47
Figura 32. Cordones extraídos de los moldes	47
Figura 33. Deformación - Frecuencia. Cordón 1,75% - Lote 16	52
Figura 34. Velocidades para el ensayo a tracción	53
Figura 35. Ensayo a Tracción 1.5% (Anexo E4.1)	54
Figura 36. Gráfico Datos experimentales y teóricos	57
Figura 37. Interfaz gráfica para las funciones creadas	58
Figura 38. Ejemplo de archivo con datos experimentales.....	60
Figura 39. Evaluación del parámetro de ablandamiento en un ensayo de tracción uniaxial controlado.....	62
Figura 40. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 1.5%.....	64
Figura 41. Ajuste Modelos Matemáticos cordón L12_E2 (a) Gent, (b) Bio Material	65
Figura 42. Curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales	66
Figura 43. Diferencias curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales.....	66
Figura 44. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 1.75%.....	67
Figura 45. Ajuste Modelos Matemáticos cordón L16_E1 (a) Gent, (b) Bio Material	68
Figura 46. Curvas de carga de modelo gent y datos reales	69
Figura 47. Diferencias entre curvas de carga de modelo Gent y datos reales.....	69
Figura 48. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 2%.....	70
Figura 49. Ajuste Modelos Matemáticos cordón L16_E1 (a) Gent, (b) Bio Material	72
Figura 50. Curvas de carga de modelo Bio Material y datos reales.....	72
Figura 51. Diferencias curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales.....	73
Figura 52. Comparación modelos de Mooney-Rivlin y Bio-Material.Ejemplo para el cordón 1.75%_L16.....	74
Figura 53. Rango recomendable de r en el modelo de Mooney Rivlin.....	75
Figura 54. Rango recomendable de r en el modelo de Bio - Material	76
Figura 55. Variación del parámetro N de ajuste para Full Network	77

Figura 56. Variación del parámetro N3 de ajuste para James – Guth.....	77
Figura 57. Comparación entre modelos Full Network y James Guth	78

SIMBOLOGÍA

CAPITULO 2, CAPITULO 5

T_g	TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA
X_i	POSICIÓN DE LA PARTÍCULA
e_k	VECTORES UNITARIOS
φ	ESPACIO TRIDIMENSIONAL CARTESIANO
O	ORIGEN
B	TENSOR DE DEFORMACIÓN CAUCHY-GREEN
F	TENSOR GRADIENTE DE DEFORMACIÓN
λ_i	ELONGACIÓN PRINCIPAL
m	INTENSIDAD ACTUAL DE DEFORMACIÓN
M	MAGNITUD MÁXIMA DE LA INTENSIDAD DE DEFORMACIÓN
tr	TRAZA DE LA MATRIZ
I	INVARIANTE DEL TENSOR DE DEFORMACIÓN
$\mathfrak{N}_1, \mathfrak{N}_{-1}$	FUNCIONES DE RESPUESTA DEL MATERIAL
μ	MÓDULO DEL CORTANTE
μ_0	MÓDULO DE CORTE DEL ESTADO NATURAL
γ	CONSTANTE DEL MATERIAL
L_0	LONGITUD INICIAL
A_0	ÁREA TRANSVERSAL UNIFORME
ρ_0	DENSIDAD DE MASA
T	TENSOR DE CAUCHY EN EL MATERIAL VIRGEN

τ	TENSOR DE CAUCHY EN EL MATERIAL ABLANDADO
v	FRECUENCIA DEL MATERIAL VIRGEN
v_s	FRECUENCIA DEL MATERIAL ABLANDADO
v_0	FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN
f_s	FRECUENCIA NORMALIZADA DE VIBRACIÓN ABLANDADA
b	CONSTANTE POSITIVA DEL PARÁMETRO DE ABLANDAMIENTO EN EL MATERIAL
W	ENERGÍA DE DEFORMACIÓN
J_m	VALOR MÁXIMO POSIBLE PARA LA DEFORMACIÓN
N	NÚMERO EFECTIVO DE CADENAS DE RED
p	FUERZA DE PRESIÓN
β_j	INVERSA DE LA FUNCIÓN DE LANGEVIN
\mathcal{L}	FUNCIÓN DE LANGEVIN
ω	COEFICIENTE DE POISSON

CAPITULO 3

S_u	RESISTENCIA A LA ROTURA
S_y	RESISTENCIA A FLUENCIA
d_{fibra}	DIÁMETRO DE LA FIBRA
$F_{diseño}$	FUERZA DE DISEÑO
d	DIÁMETRO NOMINAL
p	PASO DE ROSCA
f	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
n	NÚMERO DE ENTRADA (DIENTES)

d_r	DIÁMETRO MENOR
d_m	DIÁMETRO MEDIO
l	AVANCE POR VUELTA
P_r	FUERZA DE SUBIDA
T_r	TORQUE DE SUBIDA
P_l	FUERZA DE BAJADA
e	EFICIENCIA
τ	ESFUERZO CORTANTE
σ	ESFUERZO AXIAL NORMAL
σ_B	ESFUERZO DE APOYO
σ_b	ESFUERZO FLEXIONANTE

CAPITULO 4

L_R	LONGITUD DE ROTURA
L_T	LONGITUD DE TRABAJO
L_{CD}	LONGITUD DE CARGA Y DESCARGA
L_P	LONGITUD DE PRUEBA
L_0	LONGITUD INICIAL
L_{ei}	LONGITUD ESTIRADA

RESUMEN

Si un elastómero es cargado, descargado y cargado nuevamente, la fuerza necesaria para producir la misma deformación es mucho menor que la requerida en un inicio; a este fenómeno se le conoce como el efecto de Mullins que es el ablandamiento del esfuerzo debido a los cambios en las conformaciones de las cadenas de polímero. A través del tiempo se han desarrollado modelos para materiales de la época que aún son referentes en el desarrollo de modelos para materiales elastoméricos modernos. El presente trabajo es una comparación de cinco modelos matemáticos gaussianos y no gaussianos, respecto a datos experimentales obtenidos de la vibración transversal y esfuerzo uniaxial de un cordón de silicona RTV2. Se propone un banco de pruebas para controlar la deformación del material, la medición de frecuencia se realizará mediante la interrupción de un láser, y un método iterativo de ajuste de parámetros desarrollado en Matlab®, para encontrar la ecuación que mejor se aproxime a los datos reales. La silicona tiene un mecanismo de polimerización por condensación mediante la adición de catalizador que modifica las propiedades del material y en consecuencia la frecuencia de vibración. El presente proyecto precede a futuras investigaciones en el campo de los nuevos materiales elastómeros, como los reforzados con nano - partículas o nanotubos de carbono

PALABRAS CLAVE:

- **EFEECTO MULLINS**
- **ELASTÓMERO**
- **VIBRACIÓN TRANSVERSAL**
- **ESFUERZO UNIAxIAL**
- **ABLANDAMIENTO DEL ESFUERZO**

ABSTRACT

When an elastomer material is loaded, unloaded and loaded again, the force necessary to produce the same deformation is smaller than that required initially, the phenomenon is known as Mullins Effect, which is the softening of the stress because of changes in the conformations of the polymer chains. Through time, rubber materials have been studied and several models developed for them, at this time they still are referents in the study of modern elastomeric materials. The present document is about a comparison of five Gaussian and non-Gaussian mathematical models with experimental data of transversal vibration of RTV2 silicone cords. A test machine is propose to control the strain of material, a láser interruption method to frequency measurement, and a iterative Matlab® application for parameter adjustment to find the equation that gets the lower variation form real data. The silicone has a condensation polymerization mechanism whit addition of a catalyst that modifies the properties of the material thus, frequency of vibration too. The present project precedes future research in the field of new elastomeric materials, such as reinforced with nanoparticles or carbon nanotubes.

KEYWORDS:

- **MULLINS EFFECT**
- **RUBBER**
- **STRING VIBRATIONS**
- **UNIAXIAL STRESS**
- **STRESS SOFTENING**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los materiales elastoméricos son polímeros que se encuentran unidos por medio de enlaces químicos, convirtiéndolos en materiales muy elásticos, pudiendo ser estirados muchas veces y siempre regresar a su estado original; tienen una deformación elástica mayor al 200%. Por estas características, estos materiales son usados en la fabricación de materiales como la goma natural, goma sintética, productos adhesivos, silicona, neopreno (Askeland, 2003).

La característica más relevante de estos materiales es su alta elasticidad y flexibilidad que tienen frente a las cargas antes de fracturarse, por lo cual su rol en el campo de la ingeniería es extenso, usado en la fabricación de ruedas o neumáticos, de adhesivos, impermeabilizantes, como aislamientos acústicos y térmicos. En el diseño estructural sirven como materiales absorbentes de energía pasiva. (losadhesivos.com, s.f.)

Con el desarrollo de nuevos elastómeros y como lo detalla (Fraunhofer-Gesellschaft, 2012), los elastómeros electroactivos pueden desempeñar una función de amortiguamiento activa, lo cual hace que la disipación de energía se optimice debido a la respuesta vibratoria que tienen al someterlos a corrientes de energía alterna, tomando en cuenta las frecuencias de vibración de los elementos involucrados.

Otra aplicación de elastómeros es en la electrónica, con el elastómero de silicona PDMS⁽¹⁾ que se caracteriza por su transparencia óptica, transmisión UV, biocompatibilidad⁽²⁾ y permeabilidad, no toxicidad y no es inflamable, se utiliza de reemplazo al vidrio y porcelana para el aislamiento exterior de alto voltaje (Yang & Jiang, 2012).

De igual forma el PDMS es usado para la fabricación de dispositivos de microfluidos⁽³⁾ en aplicaciones tecnológicas reproductivas, la transparencia y permeabilidad que tiene este material lo hace ideal para la observación de células que se encuentran en un rango micrométrico, el elastómero se puede convertir en chips de microfluidos mediante procedimientos de moldeo en un corto período de tiempo, además se pueden generar varias copias del mismo (Matsuura & Naruse, 2012).

Existe un nuevo grupo de materiales llamados “inteligentes” como los elastómeros magnorreológicos⁽⁴⁾ (MRE) (Boczkowska & Awietjan, 2012), que son capaces de reaccionar a estímulos externos y cambiar sus propiedades para responder eficazmente en tiempo real, estos materiales viscoelásticos⁽⁵⁾ tienen propiedades reológicas que varían por la aplicación de un campo magnético cambiando su rigidez en un amplio rango controlando la amortiguación de vibración.

Una característica de interés en los elastómeros es el ablandamiento que sufren durante un ciclo de carga, la tensión requerida disminuye con cada ciclo para obtener la misma deformación, este fenómeno es conocido como Efecto Mullins (Johnson, 1993). Zuñiga en (Elías-Zuñiga, 2013) explica que el efecto Mullins ocurre debido a cambios en la microestructura del elastómero debido al desenredado, deslizamiento y rotura de las cadenas de polímero. Por otra parte, Johnson y Beatty (Johnson, 1995) explican el Efecto Mullins al investigar el efecto de la disminución de esfuerzos por ablandamiento del material considerando que en un material que no ha sido sometido a algún tipo previo de carga, su estructura molecular está compuesta de una fracción de material duro y otra fracción de material suave y cuando el material se somete a cargas continuas, la fracción dura se transforma en fracción suave disminuyendo su resistencia en cada ciclo.

El comportamiento mecánico de los materiales elastómeros en diferentes condiciones de carga es de gran importancia e interés para su correcta aplicación, ya que dependiendo de la

resistencia y flexibilidad del material se puede utilizar para la fabricación de diferentes piezas mecánicas, moldes, llantas, empaques, sellos entre otros. Los modelos matemáticos permiten predecir el comportamiento de una variable, y modificarla para escoger la mejor solución respecto al resultado teórico. En los modelos matemáticos podemos relacionar los elementos de un sistema y cómo se comportan entre ellos, esto nos permite ir modificando las variables para ir obteniendo diferentes resultados.

El presente proyecto tiene como objetivo el análisis de la frecuencia vibracional transversal de una cuerda elastómera mediante distintos modelos matemáticos, y seleccionar aquel que conforme a las condiciones de manufactura se adecue a los datos experimentales en porcentaje de exactitud al comportamiento real del material.

1.2. Justificación e Importancia

Actualmente dentro del área ingenieril el método de elementos finitos constituye una técnica habitual para el cálculo de Mecánica Estructural y de Sólidos, “la mayoría de estos análisis se basan en la solución de problemas estáticos, donde el valor de la carga no varía en función del tiempo y existe una relación lineal entre la fuerza y deformación” (González Carbonell, Álvarez García, Moya Rodríguez, & Abreu González, 2009), esto no ocurre con los elastómeros que a diferencia de los metales, la caracterización de su comportamiento es más complejo ya que su deformación es considerablemente mayor respecto a la carga aplicada.

El campo de aplicación de los elastómeros se ha ido incrementando a raíz de los elastómeros sintéticos, elastómeros reforzados y los nuevos elastómeros “inteligentes”. Esto conlleva a tener un estudio cada vez más profundo sobre el comportamiento y modelamiento de esos materiales para las distintas aplicaciones, y es debido a la gran deformación que experimentan estos tipos de

polímeros, que es difícil modelarlos con una función de densidad de energía de deformación. (Mooney, 1940).

Se han estudiado algunos elastómeros, y se han propuesto modelos de comportamiento como el de Mooney –Rivlin, Gent u Ogden, entre otros, siendo objeto de estudio la diferencia que existe entre estos modelos para los materiales elastoméricos. El comportamiento respecto a estos modelos destaca las características de cada polímero, es debido a estas circunstancias que se propone el estudio de un material elastómero frente a una respuesta vibratoria, comparando los modelos matemáticos de Mooney-Rivlin, Standard Bio-Material, Gent, James-Guth Cubic Network y Full Network, posteriormente concluyendo con el análisis de cada uno de ellos buscando similitudes y diferencias. La respuesta de este tipo de polímero frente a ondas vibratorias es particular, si se considera el ablandamiento del esfuerzo (ElÍas-Zúñiga, 2003), ya que su frecuencia vibratoria puede verse afectada si el material ha sufrido un esfuerzo de tensión previo.

La utilidad del proyecto va desde aplicaciones de la construcción hasta el campo de la medicina; por ejemplo, los neoprenos son materiales muy utilizados como aislantes de vibración en puentes y edificaciones ayudando a transmitir las cargas uniformemente en toda la estructura, el comportamiento de dicho material se puede predecir con ensayos de carga y descarga. Otro ejemplo ocurre durante la angioplastia donde se introduce un tubo delgado con un globo en su extremo a través de un vaso sanguíneo, al inflar y desinflar el globo la arteria se ensancha y restituye el flujo de sangre, es importante conocer el comportamiento del material durante una operación de este tipo. En deportes extremos como el salto bungee es primordial la adecuada selección del equipo, la cuerda utilizada para esta actividad es de látex, es importante caracterizar el modelamiento de este material para conocer los límites de estiramiento de acuerdo a la altura del salto y adecuar las respectivas seguridades con respecto al peso de las personas

1.3. Antecedentes

El comportamiento mecánico de los materiales elastómeros es de gran interés ya que dichos materiales cuentan con características que benefician al diseño de piezas si se utilizan correctamente, en los últimos años se han desarrollado algunas investigaciones que ayuden en la caracterización física de los materiales elastómeros.

El efecto Mullins se puede entender fácilmente cuando es estirado manualmente un globo de juguete varias veces antes de ser inflado, al realizar esto se reduce la presión requerida para inflar el globo, dicho efecto se refiere como ya se mencionó anteriormente a un cambio en el comportamiento del material resultado de la deformación previa (Johnson, 1995).

En (Riera, 2006) se encontró que el copolímero de etileno sometido a ciclos de carga y descarga en tracción uniaxial, presenta una intensa histéresis inicial, que disminuye en los sucesivos ciclos hasta llegar a una situación estable; en la figura 1 se representa un ciclo de carga y descarga de un elastómero sometido a tensión, se puede notar una diferencia entre la curva del ciclo 1 y ciclo 2, en el material se observa que en todos los ensayos realizados, se presenta una deformación inelástica no despreciable tras el primer ciclo de carga aplicado; su intensidad depende del nivel de deformación máxima impuesta a la probeta de ensayo.

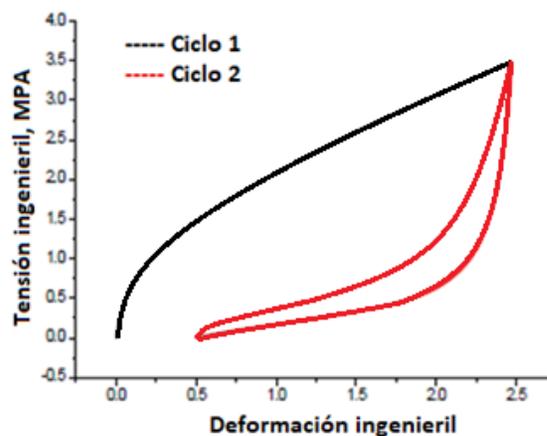


Figura 1. Dos ciclos de carga y descarga en tracción para el copolímero de etileno.

Fuente: (Riera, 2006)

El fenómeno de ablandamiento de tensión se observó por primera vez cuando un cable de goma se cargó uniaxialmente, se descargó y se cargó de nuevo, se concluyó que la carga requerida para producir el mismo tramo en el segundo ciclo de carga es algo más pequeña que la carga que lo produjo inicialmente. (Bouasse & Carrière, 1903).

Beatty y Chown observaron el efecto del ablandamiento por tensión con los modelos de James Guth y Mooney-Rivlin al estudiar la frecuencia transversal de vibración versus el comportamiento de estiramiento de tres tipos de cordones elastoméricos, pero no consideraron el comportamiento durante la descarga posterior, ni el efecto del pre condicionamiento mecánico sobre el comportamiento de vibración transversal. (Beatty & Chow, 1983).

Mullins y Tobin, proponen un modelo simple que considera el material ablandado de esfuerzo como un sistema de dos fases, una fase dura y una fase blanda. El comportamiento macroscópico del ablandamiento por tensión resulta de la conversión de la fase dura a blanda a través de una deformación previa, y cambios en las deformaciones microestructurales en cualquier deformación macroscópica dada debido a cambios en la fracción presente de cada fase, dicho

modelo no tiene en consideración los efectos fijos permanentes que generalmente acompañan al ablandamiento por tensión. (Johnson, 1993).

El modelo matemático de Gent describe la mecánica de caucho sometido a grandes cargas y con simples modificaciones se puede predecir teóricamente deformaciones cualitativas en el rango de tensión y compresión uniaxial y cuantitativas en el rango de extensiones uniaxiales; e incluso ayuda en la solución de problemas que incluyen deformaciones no homogéneas. (Pucci, 2002).

A través del modelo fenomenológico de Zúñiga y Beatty se estudió el efecto de reducción de la tensión en una frecuencia de vibración de una cuerda de goma. Se comparó modelos Gaussinos y No-Gaussianos como Estándar Bio Material, Neo-Hookean, James Guth entre otros. (Elías-Zúñiga, 2003).

En otra investigación se utiliza el mismo modelo desarrollado por Zúñiga y Beatty para estudiar el ablandamiento, en materiales elastoméricos sometidos a estados de esfuerzos biaxiales, durante el proceso de inflado y desinflado de globos. (Zúñiga, 2006).

En (Ramis, Alba, Rey, Escuder, & Sanchís, 2010), proponen un nuevo material acústico a base de fibras del Kenaf, se propone un modelo empírico de modelización del comportamiento absorbente en función de la frecuencia; para validar este modelo lo combinaron con un modelo micro-estructural, permitiendo obtener el valor de resistencia al flujo.

Investigaciones de modelado de elastómeros indicaron que con la ecuación de Taylor se puede describir la vibración transversal de cordones sometidos a cargas uniaxiales, los modelos utilizados en este estudio fueron el de Full Network y Ogden (Elías-Zúñiga, 2013).

Se investigó la vibración transversal de un haz de elastómero nemático ⁽⁶⁾ basado en la teoría de la viscoelasticidad lineal y el modelo de haz de Timoshenko, se utiliza un método de análisis modal para obtener las frecuencias naturales. Los elastómeros nemáticos tienen una mejor capacidad de deformación que los isótropos ⁽⁷⁾ ordinarios los cuales dependen del tiempo de ablandamiento. (Zhao, 2017)

1.4.Alcance

El presente trabajo empieza con el diseño y construcción de un banco de pruebas, la construcción de moldes para obtener los elastómeros a ser usados en la toma de datos; seguido de la definición y análisis de los modelos matemáticos para las respectivas comparaciones.

Se definirá el polímero a ensayar, su geometría y normas para realizar los ensayos.

Se adquirirá un equipo de medición de frecuencias para realizar los ensayos. Se implementará un dispositivo que controle la distancia de forma automática y manual a la que se deformará el elastómero para realizar los pertinentes ensayos.

Se realizará el estudio de ablandamiento con el elastómero seleccionado, aplicando una carga estática sobre dicho material para medir la frecuencia de vibración; este análisis se verá reflejado en la programación de cinco modelos matemáticos tres Gaussianos (Mooney-Rivlin, Standard Bio-Material, Gent,) y dos No Gaussianos (James-Guth y Full Network)

Se realizará la programación de cada modelo matemático en Matlab® para el procesamiento de los datos obtenidos para su posterior análisis.

El trabajo concluye con la redacción del trabajo de titulación, con los resultados obtenidos de los ensayos y la comparación teórica-experimental entre los modelos matemáticos seleccionados.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Realizar un estudio comparativo a través de modelos matemáticos aplicados en el comportamiento de vibración transversal de cordones elastoméricos

1.5.2. Objetivos Específicos

- Implementar la máquina de pruebas de ensayo.
- Ejecutar los ensayos de vibración con las fibras de elastómeros seleccionados.
- Recopilar los datos obtenidos de los ensayos para la respectiva programación en código.
- Comparar el comportamiento vibracional de los elastómeros con los diferentes modelos matemáticos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo describe la teoría de los elastómeros, sus propiedades y características, seguido del Efecto Mullins en los materiales mencionados, posteriormente el análisis de los modelos matemáticos que van a ser comparados, finalizando con la plataforma de programación escogida (MATLAB®) para el desarrollo del análisis de datos obtenidos experimentalmente.

2.1. Elastómeros

Los elastómeros son polímeros amorfos reticulados que tienen una temperatura de transición vítrea⁽⁸⁾ baja. Pueden estirarse significativamente varias veces su tamaño sin perder su forma original cuando la carga ya no es aplicada, usualmente son suaves y tienen módulos elásticos bajos, su dureza aumenta con el enlace cruzado de cadenas moleculares la cual puede ser medida con un durómetro⁽⁹⁾ Los elastómeros pueden mezclarse con aditivos para obtener propiedades específicas, por tal motivo sus aplicaciones son varias, por ejemplo, en superficies con alta fricción y antideslizantes, en la protección contra la corrosión y la abrasión, en el aislamiento eléctrico y contra el impacto y la vibración. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

2.1.1. Enlaces Cruzados

Los elastómeros pueden formar enlaces cruzados que evitan la deformación plástica viscosa y al mismo tiempo conservan una gran deformación elástica. El requisito esencial para que una sustancia sea elástica es que debe ser constituida de moléculas de cadena larga y flexible. Por lo tanto, las propias moléculas deben tener una "columna vertebral" de muchos enlaces de valencia única no colineal, sobre los cuales es posible una rotación rápida como resultado de la agitación térmica. (Gent, 2005)

Miles de subunidades moleculares unidas entre sí en una cadena constituyen una molécula típica de los elastómeros, dichas moléculas cambian de forma de manera fácil y continua a temperaturas normales mediante el movimiento browniano⁽¹⁰⁾. Adoptan conformaciones aleatorias en un estado libre de estrés, pero asumen conformaciones algo orientadas si se aplican fuerzas de tracción en sus extremos (figura 2). (Gent, 2005)

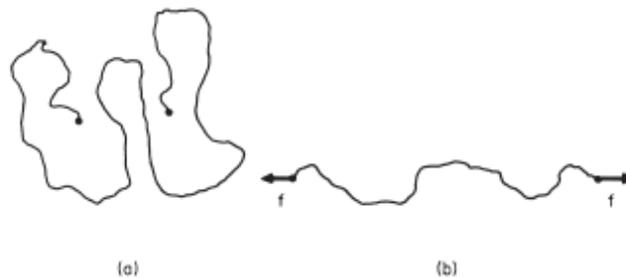


Figura 2. (a) Cadena aleatoria y (b) Cadena orientada
Fuente: (Gent, 2005)

Existen algunos métodos para crear enlaces cruzados, la vulcanización⁽¹¹⁾ al introducir cadenas de átomos de azufre, la radiación con un haz de electrones o radiación gamma, otro método implica el uso de un monómero multifuncional en la polimerización⁽¹²⁾ y reticulación⁽¹³⁾ simultánea de polímeros, las siliconas forman enlaces cruzados con la exposición al aire. (Sperling, 2006).

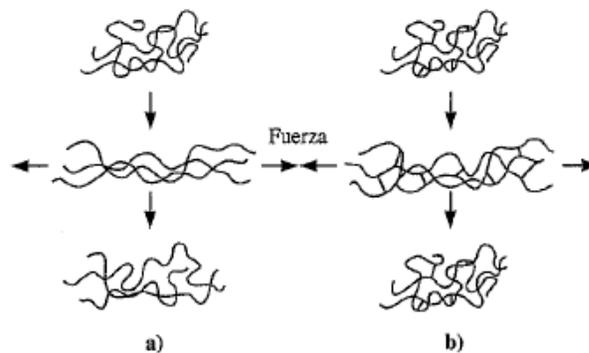


Figura 3. Enlaces cruzados.
Fuente: (Askeland, 2003)

En la figura 3.a se observa como la aplicación de una fuerza causa una deformación elástica y plástica en un elastómero que no tiene enlaces cruzados, y al ser retirada la fuerza este queda deformado permanentemente, al contrario de la figura 3.b donde un elastómero que contiene enlaces cruzados sufre una gran deformación elástica, pero si la carga es retirada este vuelve a su forma original. (Askeland, 2003)

2.1.2. Curva Esfuerzo - Deformación

Las propiedades mecánicas de los polímeros cambian de acuerdo a la región del comportamiento viscoelástico, En la figura 5 se observa el gráfico esfuerzo deformación de los plásticos rígidos, flexibles y elastómeros. Los plásticos rígidos son vítreos⁽¹⁴⁾, frágiles y usualmente se rompen después de un mínimo porcentaje de extensión. (Sperling, 2006)

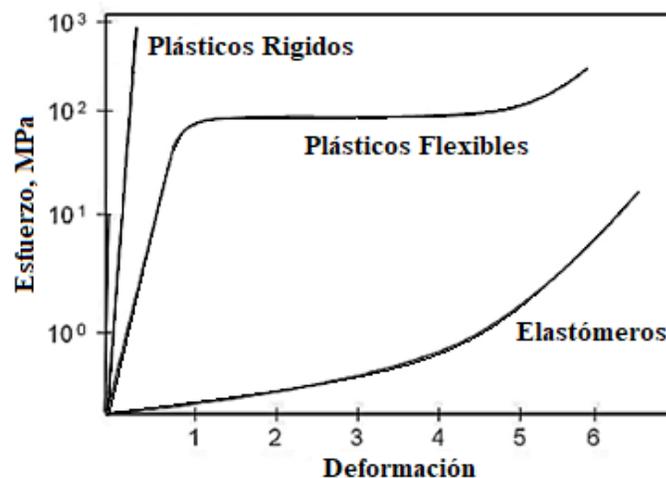


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación Polímeros.

Fuente: (Coreño Alonso & Méndez Bautista, 2010)

Los polímeros flexibles se encuentran en la zona de transición vítrea, son más extensibles muestran un punto de elasticidad. Los elastómeros tienen una deformación prácticamente toda elástica por lo que su comportamiento elástico es no lineal. El módulo de Young de los elastómeros

es más alto que los otros polímeros, y se rige por la relación $E = 3nRT$, donde n representa el número de segmentos de cadena enlazados en ambos extremos en una red, por unidad de volumen, R es la constante de gas y T la temperatura absoluta. (Sperling, 2006)

2.1.3. Siliconas

Las siliconas tienen una alta variedad de temperatura llegando hasta 315°C y la más baja temperatura de transición vítrea de los elastómeros $T_g = -130^{\circ}\text{C}$, al igual que la resistencia mecánica, resistencia al desgaste y los aceites que son inferiores al resto de elastómeros. Sus aplicaciones van desde sellos, empaques y aislamiento térmico hasta moldes y aplicaciones médicas y quirúrgicas. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

La silicona está formada por una cadena alternada de átomos de silicio y de oxígeno, los enlaces entre un átomo de silicio y dos átomos de oxígeno son altamente flexibles y el ángulo formado por estos enlaces puede abrirse y cerrarse sin problemas, esto hace que la cadena principal de la silicona sea flexible. (Juárez Varón, Ferrándiz Bou, & Balart Gimeno, 2015)

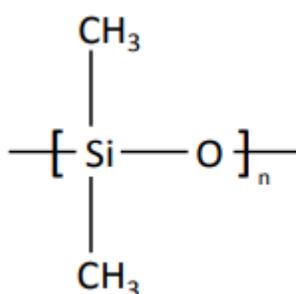


Figura 5. Estructura monomérica de la silicona.

Fuente: (Juárez Varón, Ferrándiz Bou, & Balart Gimeno, 2015)

“Las principales propiedades de la silicona son: resistente a temperaturas extremas (-60°C hasta 180°C de manera permanente – hasta 250°C o superior por períodos de tiempo reducidos);

elástico a bajas temperaturas (por debajo de -100°C como sellado estático y en condiciones dinámicas hasta -75°C); reducida deformación permanente, incluso a temperaturas extremadamente bajas o altas; resistente a la intemperie, ozono, radiación y humedad; características hidrofóbicas, absorbiendo pequeña cantidad de agua y evaporando rápidamente; excelentes propiedades eléctricas como aislante; larga vida útil; gran resistencia a la deformación por compresión; apto para uso alimenticio y sanitario.” (Juárez Varón, Ferrándiz Bou, & Balart Gimeno, 2015)

Los elastómeros de silicona RTV (Room Vulcanizing Temperature - vulcanización a temperatura ambiente) se componen de un líquido y un relleno; el líquido base es el aceite de silicona y el relleno es un polvo formado por nanopartículas que altera las propiedades físicas de la silicona y define la viscosidad. En las siliconas RTV es común usar un catalizador⁽¹⁵⁾ para ayudar a la reacción de la reticulación⁽¹⁶⁾, la silicona es deformable pero carece de elasticidad, el catalizador le ayuda a adquirir una contextura gomosa, elástica y estable. (García Diez, 2006).

2.2. Ablandamiento de Elastómeros

2.2.1. Efecto Mullins

Una de las principales características de los elastómeros es la capacidad de volver a su forma original después de ser estirados varias veces, pero el comportamiento mecánico de estos materiales es altamente no lineal, presenta histéresis, tiene deformaciones residuales, es dependiente de la velocidad de deformación y exhibe ablandamiento por tensión bajo carga cíclica. (Grijota, 2006)

En un cordón elástico que es cargado a tracción simple, cuando se lo descarga y vuelve a cargar, la tensión que se requiere para alcanzar la misma deformación va disminuyendo en cada ciclo de carga, esto se conoce como el Efecto Mullins. Dicho efecto se produce debido a cambios

en la microestructura del elastómero, es decir por el desenredo, deslizamiento y rotura de las cadenas del material (Johnson, 1993). Como se observa en la figura 6, el efecto Mullins provoca que las cadenas macromoleculares se deterioren y las partículas se separan entre si destruyendo el elastómero. (Netzsch, s.f.)

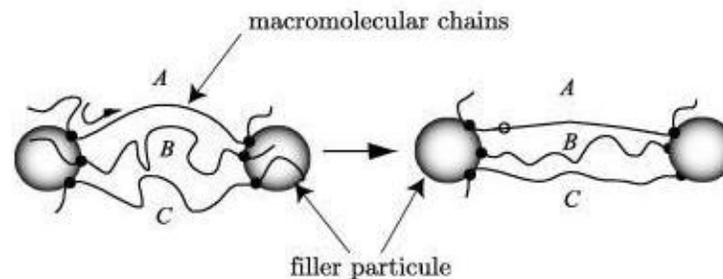


Figura 6. Efecto Mullins en los elastómeros

Fuente: (Netzsch, s.f.)

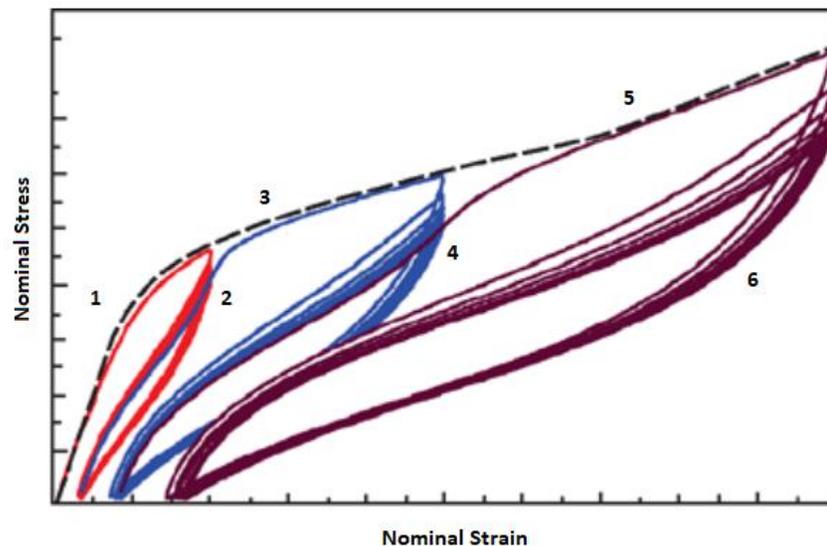


Figura 7. Representación gráfica del Efecto Mullins.

Fuente: (Abaqus-docs, s.f.)

En la figura 7 se muestra gráficamente el Efecto Mullins, en función de la tensión-deformación que sufre el material, se observa un ablandamiento cíclico progresivo con la existencia de una cierta cantidad de histéresis⁽¹⁷⁾; los ciclos de carga y descarga no ocurren a lo largo de una

sola curva, la sección de color roja, azul y morada representan al primero, segundo y tercer ciclo respectivamente, las secciones 1, 3 y 5 son de carga del material mientras que las secciones 2, 4 y 6 representan la descarga. La respuesta parece estabilizarse después de varios ciclos. (Ogden & Roxburgh, 1999).

Durante las últimas décadas, la simulación de métodos numéricos del comportamiento de los elastómeros ha sido de gran utilidad para comprender a mayor profundidad la conducta de estos materiales.

2.3. Aspectos Teóricos

2.3.1. Conceptos cinemáticos

Para comprender el modelamiento de los elastómeros es necesario revisar conceptos cinemáticos relacionados con las elongaciones que experimenta un material elástico incompresible⁽¹⁸⁾.

En (Elías-Zúñiga, 2013) al considerar la deformación de un cuerpo elástico incompresible, una partícula del material sin deformar se encuentra en la posición $X = X_k e_k$. Cuando ocurre una deformación, la partícula se mueve a una posición $x = x_k e_k$, en un sistema cartesiano rectangular $\varphi = \{O; e_k\}$ con origen O y base ortonormal definida en los vectores unitarios e_k . Por lo tanto, el tensor de deformación Cauchy-Green $B \equiv FF^T$ (donde F es el gradiente de deformación habitual) tiene la forma:

$$B \equiv \lambda^2 e_{11} + \lambda^2 e_{22} + \lambda^2 e_{33} \quad (2.1)$$

Donde, donde $e_{jk} = e_j \otimes e_k$ son las direcciones principales ortonormales, y λ_i representa la elongación principal en φ .

Se debe tomar en cuenta que el material solo tiene memoria de la deformación máxima previo dada por $m = m_{max} \equiv M$; la intensidad de la tensión para una partícula del material en el punto x está definida por $m \equiv \|B\| = \sqrt{\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}} = \sqrt{tr \mathbf{B}^2}$; donde tr es la traza de la matriz⁽¹⁹⁾.

Inicialmente el material no está deformado por lo que $\mathbf{F} = \mathbf{I}$, (\mathbf{I} =invariante del tensor de deformación) y representa la condición de incompresibilidad del cuerpo por lo tanto $\det \mathbf{F} = 1$, y la intensidad de tensión es $m = \sqrt{3}$, de lo contrario su valor será de $m > \sqrt{3}$ para deformaciones isocóricas⁽²⁰⁾. Por lo tanto $\sqrt{3} \leq m < m_{max}$ define un punto elástico. Cuando se produce la carga m_{max} es el valor actual de m . Observamos que $m \geq \sqrt{3}$ para todo λ , la igualdad se mantiene cuando y solo cuando $\lambda = 1$, es decir en el estado no deformado. Dado que las principales invariantes I_k de \mathbf{B} se definen por:

$$I_1 = tr \mathbf{B} \quad I_2 = \frac{1}{2}[I_1^2 - tr(\mathbf{B}^2)] \quad I_3 = \det \mathbf{B} \quad (2.2)$$

Entonces la magnitud de la intensidad de la tensión m viene definida por

$$m = \sqrt{I_1^2 - 2I_2} \quad (2.3)$$

2.3.2. Tensión Uniaxial

Como se indica en (Elías-Zúñiga, 2013) al considerar el estiramiento uniaxial de un elastómero, el tensor de deformación \mathbf{B} esta dado por

$$\mathbf{B} = \lambda^2 \mathbf{e}_{11} + \lambda^{-1} \mathbf{e}_{22} + \lambda^{-1} \mathbf{e}_{33} \quad (2.4)$$

Cuando $\lambda \in [1, \infty)$ en la dirección \mathbf{e}_1 , en base al tensor cartesiano $e_{jk} = e_j \otimes e_k$ y sus invariantes están dadas por $I_1 = \lambda^2 + \lambda^{-1}$; $I_2 = 2\lambda + \lambda^{-2}$. La magnitud de la tensión de \mathbf{B} , viene dada por

$$m = \sqrt{\lambda^4 + \frac{2}{\lambda^2}} \quad (2.5)$$

Por lo tanto, el criterio de carga para el cual $\lambda > 1$ se reduce a $\dot{\lambda} > 0$ y para la descarga toma valores de $\dot{\lambda} < 0$.

La tensión real uniaxial T se expresa como una función de la tensión λ y una respuesta de corte μ que depende de las funciones de respuesta del material \mathfrak{N}_1 y \mathfrak{N}_{-1} .

$$T = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)\mu(I_1, I_2, \lambda) \quad (2.6)$$

$$\mu(I_1, I_2, \lambda) \equiv \mathfrak{N}_1(I_1, I_2) - \frac{1}{\lambda}\mathfrak{N}_{-1}(I_1, I_2) \quad (2.7)$$

2.3.3. Vibración transversal de una cuerda elastómera

Según (Elías-Zúñiga, 2013) un cordón homogéneo de longitud inicial de L_0 , área transversal uniforme A_0 y densidad de masa ρ_0 , por unidad de longitud; se estira mediante una tensión uniaxial T^* a una longitud $l = \lambda l_0$, sujeta en ambos extremos y se tira del centro para vibrar transversalmente en su modo fundamental con la frecuencia v . La tensión de la cuerda es lo suficientemente grande como para ignorar su variación debida a pequeñas desviaciones transversales.

Para una cadena con densidad de masa ρ por unidad de longitud actual entre sus extremos fijos, la frecuencia del modo fundamental de la oscilación de pequeña amplitud sobre la posición de equilibrio estirada está dada por la ecuación de Taylor.

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T^*}{l^2 \rho}} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \rho_0 = \rho_0 l_0 \\ T^* = T A \\ A = A_0 / \lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

Por lo tanto, la frecuencia vibratoria transversal del material virgen se expresa

$$\nu = \nu(T, \lambda) = \nu_0 \sqrt{\frac{T}{\mu_0 \lambda^2}} \quad \rightarrow \quad \left[\nu_0 \equiv \frac{\sqrt{A_0 \mu_0 / 4 l_0^2 \rho_0}}{\mu_0} \right] \quad (2.9)$$

Donde μ_0 representa el módulo de corte del estado natural.

Para el mismo tramo de la cuerda, se puede sacar la frecuencia vibratoria transversal del material ablandado por tensión reacondicionada a un estiramiento previo máximo

$$\nu_s = \nu(T, \lambda) = \nu_0 \sqrt{\frac{\tau}{\mu_0 \lambda^2}} \quad (2.10)$$

De las observaciones anteriores se deduce que $\frac{\nu}{\nu_s} = \sqrt{\frac{T}{\tau}} \geq 1$, por lo tanto, la frecuencia de vibración transversal de la cadena del material virgen es mayor que la frecuencia correspondiente al material ablandado por tensión $\nu = \nu(T, \lambda) \geq \nu(\tau, \lambda)$.

Por lo tanto, la frecuencia del cordón ablandado, disminuye aún más con el incremento del daño por el ablandamiento, que fue causado al aumentar la tensión previa máxima.

La frecuencia de cadena ablandada por tensión elástica normalizada está dada por

$$f_s = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \frac{\mu(I_1, I_2, \lambda)}{\mu_0} e^{-b\sqrt{M-m}}} \quad (2.11)$$

2.4. Modelos Matemáticos

2.4.1. Ecuación constitutiva de Zúñiga-Beatty

En la investigación de (Zúñiga, 2006) para un material elástico incompresible e isotrópico durante la fase de carga, la correspondiente ecuación constitutiva de tensión de Cauchy independiente tiene la forma

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{1} + \mathfrak{N}_1(I_1, I_2)\mathbf{B} + \mathfrak{N}_{-1}(I_1, I_2)\mathbf{B}^{-1} \quad (2.12)$$

Donde T es la tensión de Cauchy, p es una presión indeterminada, y $\mathfrak{N}_\Gamma = \mathfrak{N}_\Gamma(I_1, I_2)$, $\Gamma = 1, -1$ se refiere a las funciones de repuesta del material virgen, se determinan a partir de la función de energía de deformación $W = W^*(I_1, I_2)$ por unidad de volumen, como referencia de acuerdo a

$$\mathfrak{N}_1 = 2W_1, \quad \mathfrak{N}_{-1} = -2W_2 \quad (2.13)$$

Donde $W_\alpha \equiv \partial \widehat{W}(I_1, I_2) / \partial I_\alpha$.

(Zuñiga & Beatty, 2002) propone un modelo de tipo de daño para describir el comportamiento del material ablandado, dado por la función

$$\tau = F(m, M)T \quad (2.14)$$

Donde τ representa el tensor de Cauchy en el material ablandado, M es la tensión previa máxima a la que se descarga el material y $F(m, M)$ es la función de ablandamiento isotrópico en el nivel de daño $m_{max} = M$ en el intervalo de $m \in [\sqrt{3}, M]$. Asumieron que la función $F(m, M)$ es una función monótona⁽²¹⁾ que aumenta la intensidad de la tensión, y satisface las condiciones

$$0 < F(m; M) < 1; \quad F(m; M) = 1 \quad (2.15)$$

Se tiene la siguiente función de reblandecimiento

$$F(m; M) = e^{-b\sqrt{(M-m)}} \quad (2.16)$$

Donde b es una constante positiva que se refiere al parámetro de ablandamiento en el material. Si sustituimos la eq. (2.16) en la eq. (2.14) tenemos que:

$$\tau = e^{-b\sqrt{(M-m)}}T \quad (2.17)$$

La eq. (2.17) representa el modelo de material fenomenológico para el ablandamiento de tensión del material.

2.4.2. Mooney-Rivlin Material

El primero de los modelos a estudiar es el de Mooney-Rivlin, el cual es un modelo gaussiano de material hiperelástico, donde la función de densidad de energía de deformación W es una combinación de dos invariantes del tensor de deformación de Cauchy-Green. (Elías-Zúñiga, 2003).

$$W(I_1, I_2) = \frac{1}{2}\mu[(I_1 - 3) + \gamma(I_2 - 3)] \quad (2.18)$$

Donde, $\mu > 0$ y $\gamma \geq 0$ son constantes del material, que están relacionados con el módulo de corte μ_0 cuando el material no está deformado, expresado como $\mu_0 = \mu(1 + \gamma)$. De la ecuación (5) $\mathfrak{S}_1 = \mu$; $\mathfrak{S}_{-1} = -\gamma\mu$, reemplazando en la eq. (2.7) obtenemos:

$$\mu(I_1, I_2; \lambda) \equiv \mu_0 \frac{1+\gamma/\lambda}{1+\gamma} \quad (2.19)$$

Por lo tanto, reemplazando la eq. (2.19) en eq. (2.11) tendremos la frecuencia vibratoria de la cuerda normalizada ablandada por la tensión elástica del modelo de Mooney-Rivlin (Elías-Zúñiga, 2003).

$$f_s = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \left(\frac{1+\gamma/\lambda}{1+\gamma}\right) e^{-b\sqrt{M-m}}} \quad (2.20)$$

En la eq. (2.20) y debajo de la frecuencia de vibración de la cuerda virgen estándar se considera que $m = M$.

2.4.3. Standard Bio-Material Model

El modelo de Bio-Material (Fung, 1967), modelo gaussiano, define a la energía de deformación como

$$W(I_1) = \frac{1}{2\gamma} \mu_0 [e^{\gamma(I_1-3)} - 1] \quad (2.21)$$

Donde: $\gamma \geq 0$ es una constante del material.

De la eq (2.12) $\aleph_1 = \mu_0 e^{\gamma(I_1-3)}$; $\aleph_{-1} = 0$ y con la eq. (2.7) obtenemos la frecuencia de vibración eq. (2.11) para el modelo.

$$f_s = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) e^{\gamma(I_1-3) - b\sqrt{M-m}}} \quad (2.22)$$

2.4.4. Gent Model

El modelo gaussiano de Gent (Gent, 2005), define a la energía de deformación como

$$W(I_1) = -\frac{1}{2} \mu_0 J_m \ln\left(1 - \frac{I_1-3}{J_m}\right) \quad (2.23)$$

Donde J_m es el valor límite de $I_1 - 3$, es decir el valor máximo posible para la deformación.

De la eq. (2.13) $\aleph_1 = \mu_0 J_m (J_m + 3 - I_1)^{-1}$; $\aleph_{-1} = 0$ y con la eq. (2.7) obtenemos la frecuencia de vibración eq. (2.11) para el modelo de Gent.

$$f_s = \sqrt{J_m \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) (J_m + 3 - I_1)^{-1} e^{-b\sqrt{M-m}}} \quad (2.24)$$

2.4.5. Classical James-Guth Cubic Network Model

El modelo No-Gaussiano de James Guth (Beatty & Chow, 1983), descrito por cadenas moleculares idénticas orientadas a lo largo de los tres bordes de una estructura de cubo. Los

componentes principales del tensor de Cauchy para el material virgen del modelo de red molecular están definidos como

$$T_j = -p + \frac{\mu_0}{3} N_3 \lambda_{jr} \beta_j(\lambda_{jr}) \quad j = 1,2,3 \quad (2.25)$$

Donde λ_{jr} es la cadena relativa definida por $\lambda_{jr} = \frac{\lambda_j}{\sqrt{N_3}}$; $j = 1,2,3$. N_3 es el número efectivo de cadenas de red. p es la fuerza de presión. $\beta_j = \mathcal{L}^{-1}(\lambda_{jr})$ es la inversa de la función de Langevin definida como $\mathcal{L}(\beta_j) \equiv \coth \beta_j - \left(\frac{1}{\beta_j}\right)$. μ_0 es el módulo de cortante.

En la tensión uniaxial de un cordón elástico para un material virgen el tensor de deformación viene descrito por

$$T = \frac{\mu_0 \sqrt{N_3}}{3} \left(\lambda \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{N_3}} \right) - \frac{1}{\lambda^2} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda N_3}} \right) \right) \quad (2.26)$$

Con las eq. (2.14) y eq. (2.10) obtenemos la frecuencia transversal normalizada del material elástico con el modelo de James Guth, (Beatty & Chow, 1983).

$$f_s = \sqrt{\frac{\sqrt{N_3}}{3} \left(\frac{1}{\lambda} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{N_3}} \right) - \frac{1}{\lambda^2} \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda N_3}} \right) \right)} e^{-b\sqrt{M-m}} \quad (2.27)$$

Donde $M=m$.

2.4.6. Full-Network Model

El modelo No- Gaussiano de Full Network (Beatty, 2003), define la ecuación constitutiva para el material virgen del tensor de deformación como

$$T = -p_1 + \frac{\mu_0 \beta}{3 \lambda_r} \quad (2.28)$$

Donde μ_0 es el modulo de cortante. $\beta = \mathcal{L}^{-1}(\lambda_r)$ es la inversa de la función de Langevin. λ_r es la cadena relativa definida por $\lambda_r = (\frac{I_1}{3N})^{1/2}$. N es el número efectivo de cadenas de red.

Con las eq. (2.7) y eq. (2.11) obtenemos la frecuencia transversal del material elástico ablandado del modelo de Full Network (Beatty, 2003).

$$f_s = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \frac{\mathcal{L}^{-1}(\lambda_r)}{3\lambda_r} e^{-b\sqrt{M-m}}} \quad (2.29)$$

Donde $\lambda_r = \frac{I_1}{\sqrt{3N}} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda}\right)^{1/2}$ y $m=M$.

Con estos modelos se comparará los datos experimentales obtenidos de los ensayos con los teóricos, graficando el efecto mullins del elastómero.

2.5. MATLAB®

MATLAB® (The MathWorks, Inc., s.f.) combina un entorno de escritorio para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación. Las aplicaciones con las que cuenta permiten ver cómo funcionan los diferentes algoritmos con sus datos, se pueden hacer iteraciones hasta obtener los resultados deseados.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El siguiente capítulo describe el proceso de diseño y construcción del banco de pruebas, la selección de equipos a utilizarse, los moldes de probetas y la fabricación de los materiales a ensayar.

3.1. Diseño de las piezas mecánicas del Banco de Pruebas

Se diseñó el banco de pruebas considerando el material a ensayar y la metodología del ensayo, se tiene los siguientes parámetros según la Tabla 1:

Tabla 1

Parámetros de Diseño

Parámetro	Rango/Medida/Condición	Observaciones
Resistencia	$Su_{\text{Caucho}}=200 \text{ kgf/cm}^2$	Elastómero de alta resistencia para motivos de diseño, el material a ensayar es silicona
Separación de Pinzas	Simétricas desde punto medio	Facilita la lectura y adecuación de datos.
Tipo de Tornillo	Rosca Trapezoidal Mitad: Rosca Derecha / Rosca Izquierda	Permite el movimiento de las pinzas en sentidos contrarios, separarse – alejarse
Longitud Bancada	1.20 m	Los elastómeros tienen amplia elasticidad, existe la necesidad de guías para direccionamiento
Movimiento	Manual / Automático	Manija y motor a paso en extremos del tornillo
Peso Bancada	18 kg - 22 kg	La manipulación debe ser sencilla
Regla Graduada	En mm	Posición que facilite la lectura de distancia
Pinzas	Intercambiables	De dos materiales

3.1.1. Diseño del Tornillo de Rosca Trapezoidal

Las pinzas deben separarse o juntarse con un avance simultáneo para realizar la carga y descarga del cordón respectivamente. Por tal motivo el tornillo tiene una rosca trapezoidal que ayuda con la transmisión de movimiento de una forma precisa; además de tener una rosca izquierda

y derecha para la dirección de las pinzas. De igual forma el tornillo debe tener sus respectivas tuercas para cada lado, las cuales serán insertadas en los soportes de las pinzas (sección 3.1.3).

3.1.1.1 Parámetros para el tornillo de rosca trapezoidal

Las ecuaciones y tablas usadas son del libro Diseño de ingeniería mecánica de Shigley (Budynas & Nisbett, 2012).

Por motivos de diseño se considera el esfuerzo de caucho y un diámetro de 5mm, a pesar de que en el presente proyecto se trabaja con una silicona de menor resistencia y un menor diámetro.

$$S_{u \text{ caucho}} = 200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 19.613 \text{ Mpa} \quad (3.1)$$

Los cálculos correspondientes al tornillo se encuentran en el ANEXO B1.

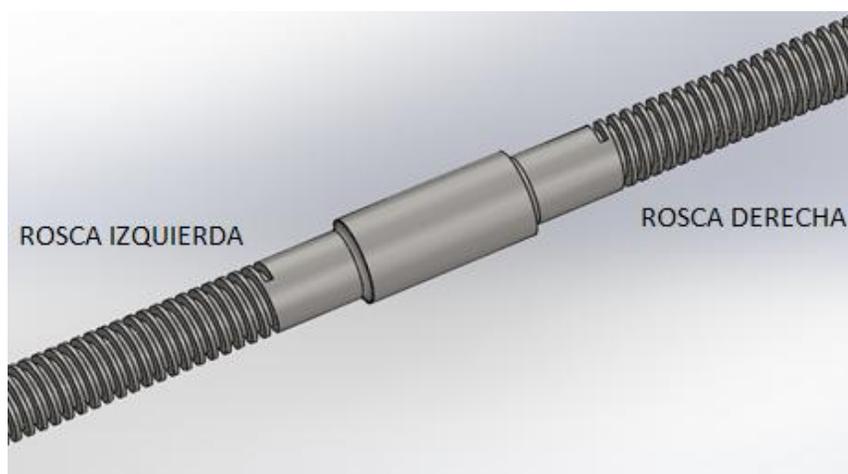


Figura 8. Detalle central del tornillo trapezoidal.

En la figura 8 se muestra la parte central del tornillo, donde se aprecia a una rosca trapezoidal izquierda y una rosca trapezoidal derecha, el centro sirve para el apoyo de la base central a la bancada y en los extremos del tornillo también se tiene espacio para las bases de los extremos (sección 3.1.4). El detalle de los planos del tornillo y sus tuercas se encuentra en el ANEXO G.

3.1.1.2 Construcción

Dada la complejidad y tamaño del tornillo, la construcción del mismo y sus respectivas tuercas no se realizó en la universidad ni por los autores del presente proyecto. El material escogido para el tornillo es acero de transmisión 1018 y las tuercas son de bronce. En la sección 3.3 Ensamblaje del Banco de Pruebas se encuentran fotografías de las mismas.

3.1.2. Diseño de Pinzas de Sujeción

Tomando en cuenta los parámetros de diseño, el área de sujeción de las pinzas es de 10mm de alto y el ancho es definido por el espesor del material (grilon, acrílico); el apriete de las pinzas se controlará con un tornillo sin fin pequeño y una tuerca mariposa. Ya que se trata de un banco de pruebas para el análisis de frecuencia y vibración de materiales elastómeros, se ha considerado una amplia altura de las pinzas tomando en cuenta sus soportes (sección 3.1.3), se requiere una distancia aproximada de 20cm entre el punto de sujeción de las pinzas al tope del tornillo de rosca trapezoidal. Las pinzas serán fabricadas en grilon y acrílico, determinando su uso por el material a ensayar.

Cada pinza consta de 4 partes como se muestra en la figura 9, esto permite que sean desmontables e intercambiables con otro juego de pinzas. Cada pieza tiene su función específica es así que, la pieza 1 es la principal a la que se unirán el resto de piezas, la pieza 2 permite el intercambio de juego de pinzas al unirse a los soportes, la pieza 3 sirve de apoyo y resistencia a la pinza cuando esta es estirada, la pieza 4 junto con la pieza 1 dan el apriete al cordón.

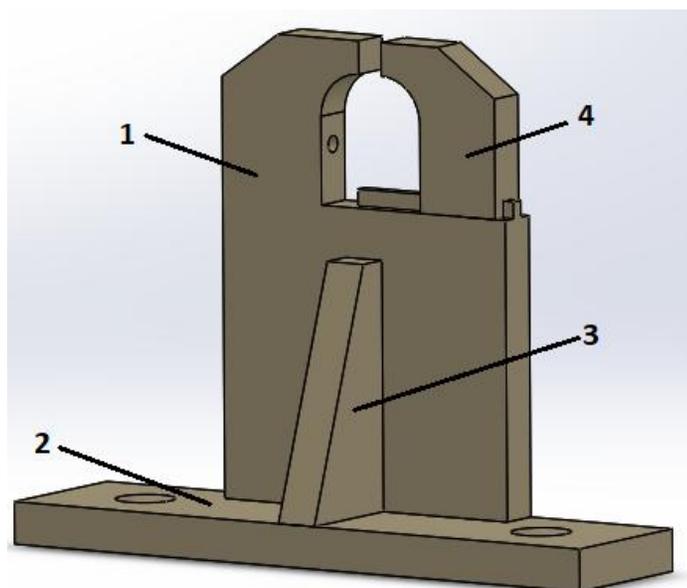


Figura 9. Partes de las pinzas de sujeción.

Los planos con las medidas de las piezas y el ensamble de la pinza se encuentran a detalle en el ANEXO G.

3.1.2.1 Construcción

La construcción de las pinzas en grilon se realizó en el laboratorio de procesos de manufactura de la universidad, todas las piezas fueron cortadas y fresadas según los planos (ANEXO G), el ensamble (figura 10) de las 4 piezas fue por medio de pernos allen M4, en la pieza 2 se realizó dos agujeros pasantes para la unión con los soportes de las pinzas, los bordes del área de sujeción de los cordones no tienen filos cortantes y se colocó papel fomix para evitar que el apriete rompa al material.



Figura 10. Pinza de Grilon, Vista Delantera / Vista Posterior

La construcción de las pinzas en acrílico se realizó por medio de corte láser.

3.1.3. Diseño de Soporte de Pinzas

Las pinzas van a ser colocadas sobre soportes, los que a su vez estarán ensamblados al tornillo trapezoidal por medio de las tuercas; permitiendo el movimiento de las pinzas. Los soportes serán construidos de grilon; sus dimensiones contribuyen a la altura de las pinzas y de igual forma ayudan a guiar al movimiento ya que por ellas pasaran las guías.

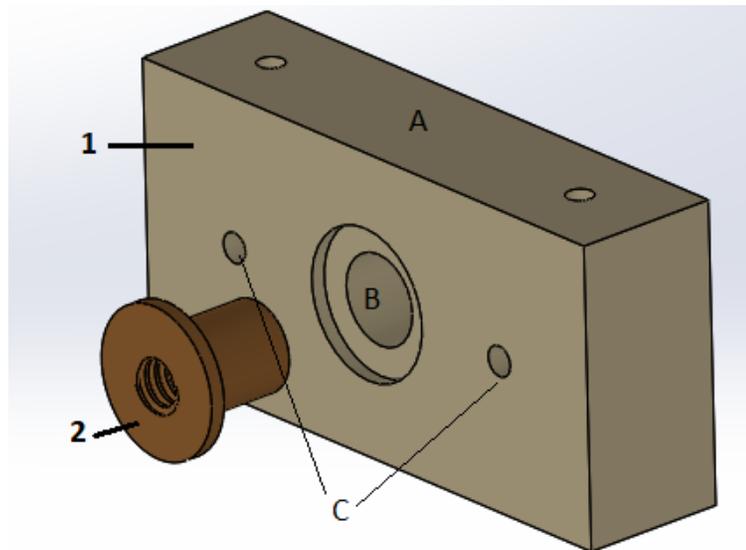


Figura 11. Soporte de pinzas y tuerca del tornillo trapezoidal.

En la figura 11, se tiene el soporte de pinzas (pieza 1) y la tuerca (pieza 2); la sección A es el lugar de ensamble a las pinzas, el agujero B como se observa en el gráfico será la unión de las tuercas a los soportes, mientras que en los agujeros C pasarán las guías para no desviar el movimiento.

Los planos con las medidas de los soportes se encuentran a detalle en el ANEXO G.

3.1.3.1 Construcción

La construcción de los soportes, al igual que las pinzas se realizó en el laboratorio de procesos de manufactura de la universidad, según los planos (ANEXO G). En la sección 3.3 Ensamblaje del Banco de Pruebas se encuentran fotografías de las mismas.

3.1.4. Diseño de Bases

Las bases son aquellas en las que el resto de piezas se apoyarán, serán tres bases, dos colocadas al extremo del tornillo y una en el centro del mismo como se vio en la figura 8, para soportar el peso y mantener estables al resto de piezas, estas bases serán de acero A36. En la figura 12 se detalla el diseño de las bases laterales, el agujero central es de 32 mm para para el ingreso del tornillo trapezoidal, cabe recalcar que antes se debe poner rodamientos de bolas para reducir la fricción entre elementos los elementos, dado la geometría del tornillo se necesitan dos tipos de rodamientos, la hoja de especificaciones para los rodamientos seleccionados se encuentra en el ANEXO H6. Las bases también cuentan con dos pequeños agujeros a los extremos para el ingreso de guías. Con el fin de aligerar el peso del banco de pruebas se realiza una ranura en la cara de las bases, esta ranura también ayuda en la manipulación de la estructura en general. Cuenta con una

ranura pequeña para el fin de carrera que detiene el movimiento una vez que los soportes de las pinzas se ponen en contacto.

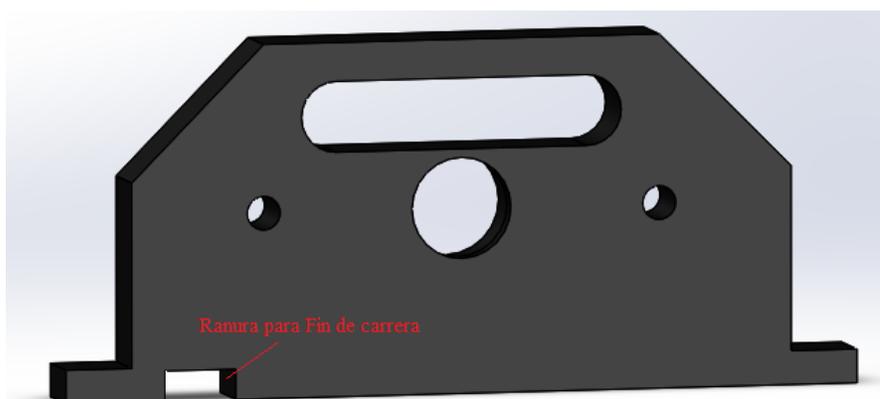


Figura 12. Base lateral del banco de pruebas.

La base central tiene el mismo diseño con la diferencia de que el agujero central es de 52 mm y no cuenta con una ranura de manipulación como la base de los extremos. Los planos con las medidas de las bases laterales y la base central se encuentran a detalle en el ANEXO G.

3.1.4.1 Construcción

Para la construcción de las bases de acero, corto por medio de oxicorte el perfil de cada una de ellas y en el laboratorio de procesos de manufactura se realizó el fresado correspondiente según los planos, las perforaciones centrales de las bases se las realizó en el torno con un mandril de 4 muelas, para insertar los rodamientos se colocaron anillos de sujeción internos de acuerdo al diámetro de cada base, en el caso de las bases externas se freso las ranuras para alivianar el peso y la movilización del banco de pruebas, se realizó la perforación de los agujeros para las guías y por último se le dio un acabado con pintura negra en spray. En la sección 3.3 Ensamblaje del Banco de Pruebas se encuentran fotografías de las mismas.

3.1.5. Peso de la estructura del Banco de Pruebas

Las piezas mecánicas descritas anteriormente, son las que aportan el peso significativo al banco de pruebas, por tal motivo el cálculo se lo realizara tomando en cuenta estas piezas, para el caso de las pinzas solamente se considerara las pinzas construidas de grilon ya que el peso de las pinzas de acrílico va a ser menor. Los cálculos del peso del banco de pruebas se encuentran a detalle en el ANEXO B2.

3.2. Selección de Equipos

3.2.1. Selección de motor a pasos

Para la selección del motor a pasos, se toma en consideración el torque de subida calculado en el tornillo trapecoidal ANEXO B1, por lo tanto, tenemos que el torque requerido para mover al tornillo es de 1.38 Nm. En la figura 13 se observa las características del motor a pasos NEMA 23, el modelo seleccionado es el M1233051, que tiene un torque de 1.40 Nm suficiente para vencer el torque requerido del tornillo.

Model	Holding Torque (Nm)	Phase current (A)	Rotor Inertia (g/cm ²)
M1233051	1.40	3.0	380

Figura 13. Especificaciones motor NEMA 23 - M1233051.

Fuente: (Extracto data sheet NEMA 23, Anexo H2)

En el ANEXO H2 se encuentra a mayor detalle las características y especificaciones del motor a pasos NEMA 23.

3.2.1.1 Circuito motor a pasos

Para controlar el movimiento del motor que moverá el tornillo, se utilizó, dos fines de carrera para los límites de movimiento, dos botones (avanzar/retroceder), un controlador para motor a

pasos BL-TB6560-v2 (ANEXO H5) y como controlador una tarjeta Arduino Nano. La programación implicó las siguientes variables:

- 1 variable de entrada: “des”
- 1 variable auxiliar: “pasos”
- 7 variables que representan el estado del equipo

Tabla 2

Entradas digitales

Entrada digital	Elemento	Descripción
Pin 3	Pulsador final	Indica que llegó al límite final del tornillo
Pin 4	Pulsador inicio	Indica que llegó al límite inicial del tornillo
Pin 5	Botón avanzar	Permite girar el tornillo para que las pinzas se separen
Pin 6	Botón retroceder	Permite girar el tornillo para que las pinzas se junten

- 3 variables para control

Tabla 3

Entradas digitales para variables de control

Entrada digital	Elemento	Descripción
Pin 7	Borne controlador EN+	Encendido / Apagado
Pin 8	Borne controlador CW+	Giro CCW/CW
Pin 9	Borne controlador CLK+	Tren de pulsos para indicar la velocidad de rotación

La programación en Arduino y su diagrama de flujo se encuentra en el ANEXO C1 y ANEXO D2 respectivamente. El esquema de conexión se ilustra en las figuras 14 y 15.

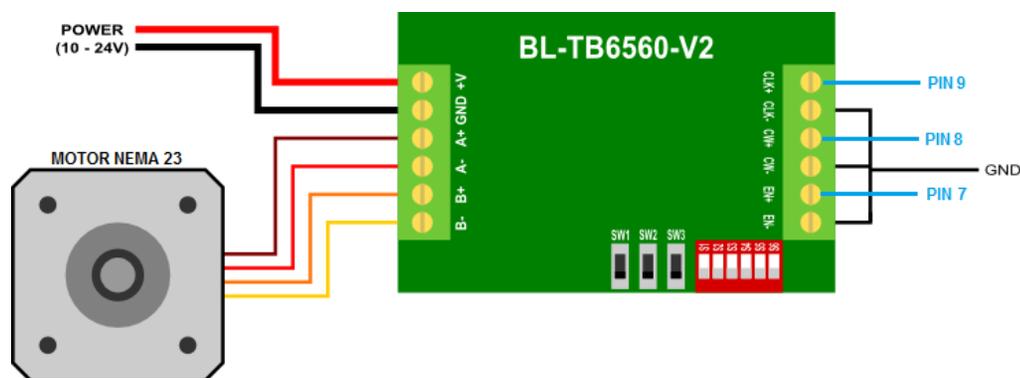


Figura 14. Esquema de conexión motor nema23 y controlador BL-TB6562-v2.

Fuente: (Fritzing)

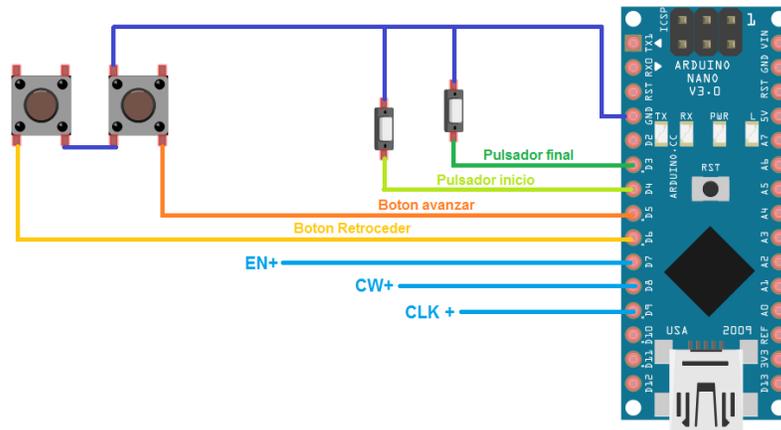


Figura 15. Esquema de conexión pulsadores, botones y Arduino.

Fuente: (Fritzing)

3.2.2. Selección del láser y sensor

La experimentación del proyecto consiste en obtener los datos de la frecuencia de vibración de un cordón elastómero, para lograr medir esto se hará vibrar al cordón y por medio de un láser y un sensor se contará las interrupciones que provoca el cordón en el rayo del láser como lo muestra la figura 16.

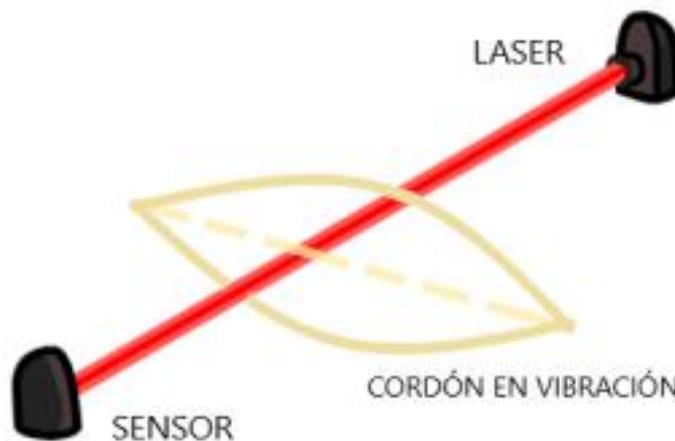


Figura 16. Interrupciones del cordón elastómero en el rayo láser.

La característica a tomar en cuenta del láser a ser usado es que su rayo no debe tener una amplia dispersión y su luz mantenerse constante. Dada estas especificaciones se seleccionó el láser Quarton - Módulo láser VLM-650-02 LPA (figura 17), cuyas características y especificaciones se encuentran en el ANEXO H3, una ventaja de este dispositivo es que tiene un enfoque ajustable (rango de 3.937 in ~ Infinity) permitiendo enfocar de mejor manera el rayo láser hacia el sensor. Tiene un circuito de controlador óptico, diodo láser y APC integrado que permite una potencia de salida láser constante. Su carcasa es de latón macizo que ayuda con la resistencia a los golpes.



Figura 17. Quarton - Módulo láser VLM-650-02 LPA.
Fuente: (Amazon)

Se diseñó una caja para la colocación del láser en el banco de pruebas, figura 18. Tiene tapas intercambiables que ayudan a reducir el tamaño y la dispersión del rayo láser. También se le colocó un interruptor para prenderlo y apagarlo.

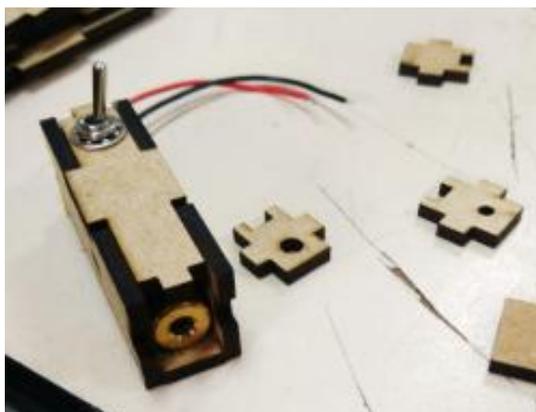


Figura 18. Caja del Láser

3.2.2.1 Circuito del Sensor láser

El sensor de láser se seleccionó en base a los parámetros de funcionamiento y la velocidad de respuesta, siendo los más comunes en el mercado local: LDR o fotocelda, fotodiodo y un receptor de láser ky-008. Se descartó el fotodiodo debido a que el espectro de luz de excitación está en el rango de luz infrarroja (longitud de onda: 1 mm – 700 nm), y al ser expuesto al láser (longitud de onda: 650 nm) no reaccionó.

Para verificar el valor de frecuencia máximo que pueden medir los sensores LDR y Receptor de láser ky-008, se realizó una prueba con discos encóder intercambiables (figura 19), con diferente número de orificios y un motor DC de 3600 rpm. Se elevó progresivamente el voltaje del motor para simular las interrupciones del láser por el cordón y se usó el osciloscopio del laboratorio de instrumentación mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; obteniendo los resultados de la tabla 4.

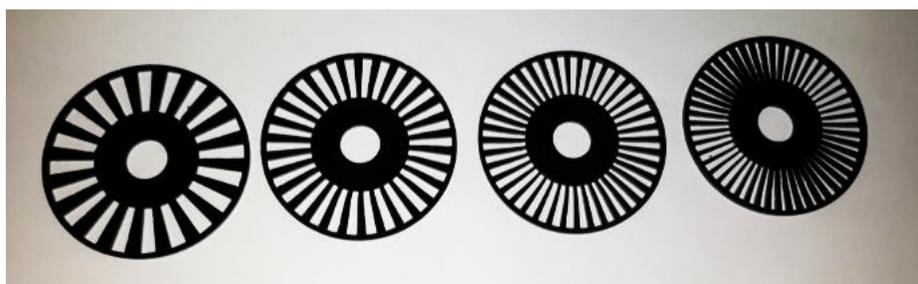


Figura 19. Discos Intercambiables.

Tabla 4

Rango de Frecuencias Obtenido

Sensor	Frecuencia mínima	Frecuencia máxima
LDR	<1 Hz	<10 Hz
Receptor Ky-008	<1 Hz	<4000 Hz

Por lo tanto el módulo receptor Ky-008 (figura 20) fue el sensor escogido ya que llegó a una frecuencia mayor, dicho componente posee un circuito de acondicionamiento, por lo cual se decidió poner un disparador de Schmitt (Schmitt Trigger) 74LS14, para redundar el acondicionamiento en caso que el circuito del módulo falle.

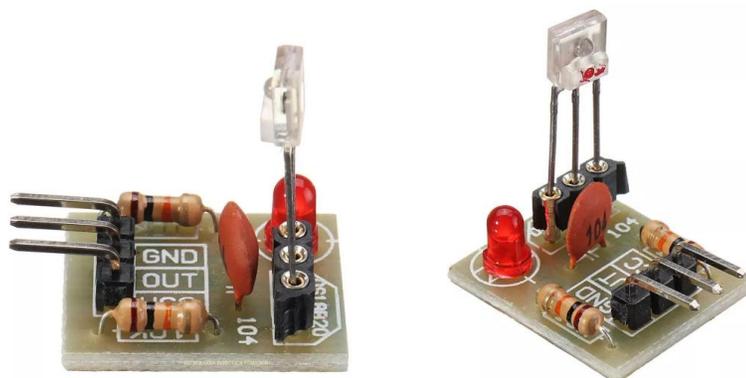


Figura 20. Modulo receptor de láser Ky-008

A lo expuesto, se añadió un LED para verificar el funcionamiento del sensor, y de ayuda para la alineación entre el emisor y receptor. El esquema de conexión se detalla en la figura 21.

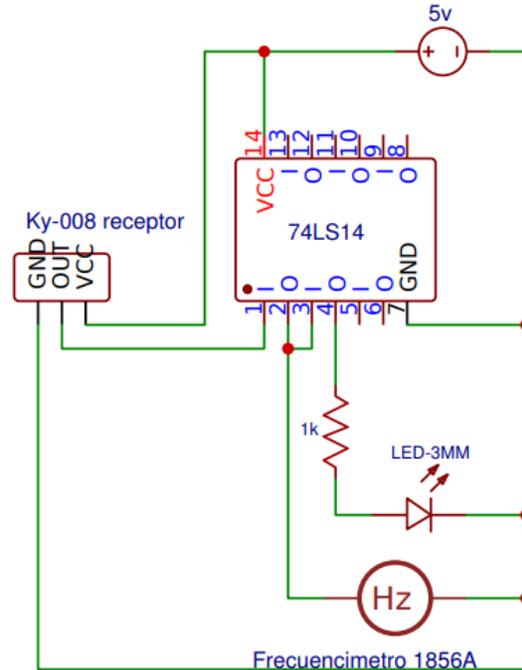


Figura 21. Circuito para toma de datos.

Fuente: (easyeda.com)

3.2.3. Selección del contador de frecuencia

Para la experimentación del proyecto es necesario de la adquisición de un medidor de frecuencia, dado el tipo de ensayo a realizar los datos obtenidos serán relativamente bajos por lo que es necesario que la sensibilidad de frecuencia sea de por lo menos 0.1 Hz.

La hoja técnica de datos del frecuencímetro seleccionado se encuentra en el ANEXO H4, el modelo escogido es el 1823A.

3.3. Ensamblaje del Banco de Pruebas

Una vez listas las piezas por separado, se empieza con el ensamble de todo el conjunto. El primer paso es colocar los rodamientos en las bases de acero y las tuercas de bronce en los soportes de las pinzas.

El tornillo trapezoidal se inserta en las bases y soportes de las pinzas, junto con las guías, figura 22. Las guías se aprietan con tuercas por la parte exterior de las bases de acero.

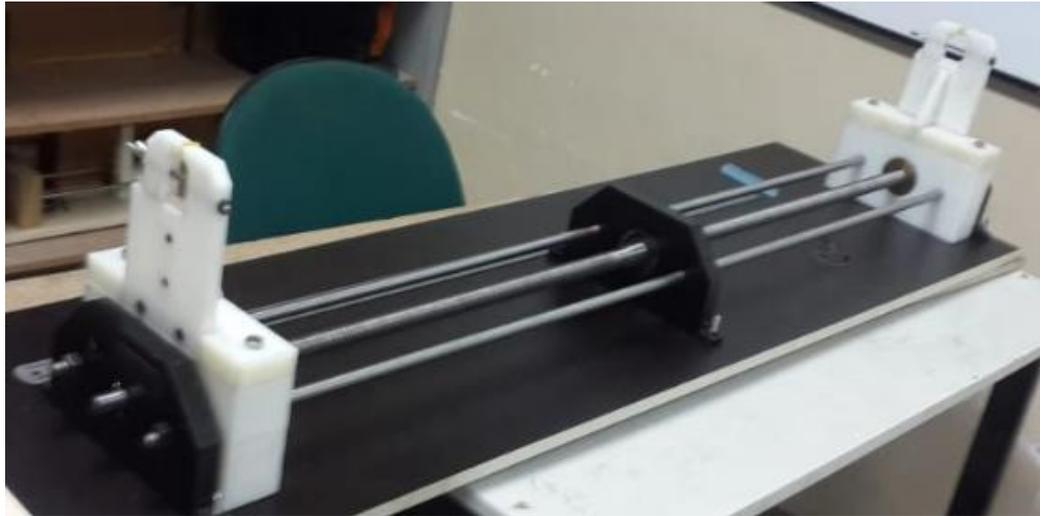


Figura 22. Unión de bases de acero, soporte de pinzas con el tornillo y guías

Las bases de acero se empernan a una tabla de madera de 12 cm de espesor y de 1.40 m de largo y 40 cm de ancho, donde se colocarán el resto de implementos necesarios.

Las pinzas como son intercambiables se colocan después de unir las piezas dichas anteriormente tal como se muestra en la figura 23.



Figura 23. Unión soporte – pinza

El movimiento del tornillo será automático y manual por lo tanto a los extremos del tornillo se colocará a un lado el motor al paso y por el otro lado una manija que lo moverá manualmente. En la figura 24 se observa la colocación del motor a pasos, se colocó un alza entre las bases y el motor para su poder empernarlo correctamente.

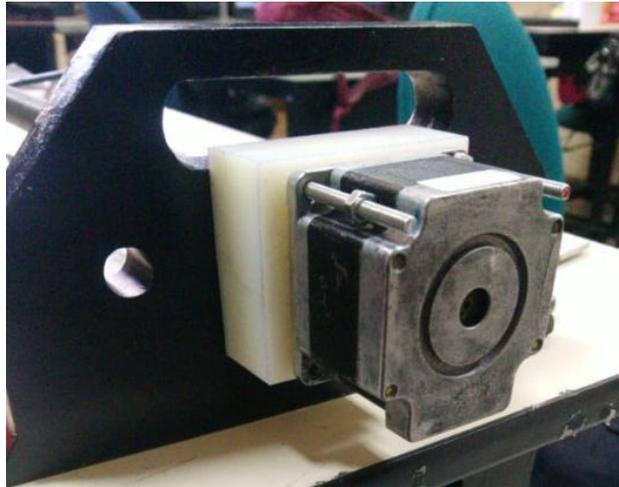


Figura 24. Colocación del motor a pasos

Se prosigue a la implementación de dispositivos de control como el circuito de motor a pasos, que se colocará en el centro del banco de pruebas como lo indica la figura 25, la regla graduada se ubica de tal forma que permite la lectura de desplazamiento de las pinzas. Encima de la caja del circuito del motor a pasos, se coloca el circuito del sensor láser cuyo desplazamiento vertical está regulado por una plataforma que ayuda a que se encuentre al mismo nivel del láser colocado al frente de igual manera sobre una plataforma.

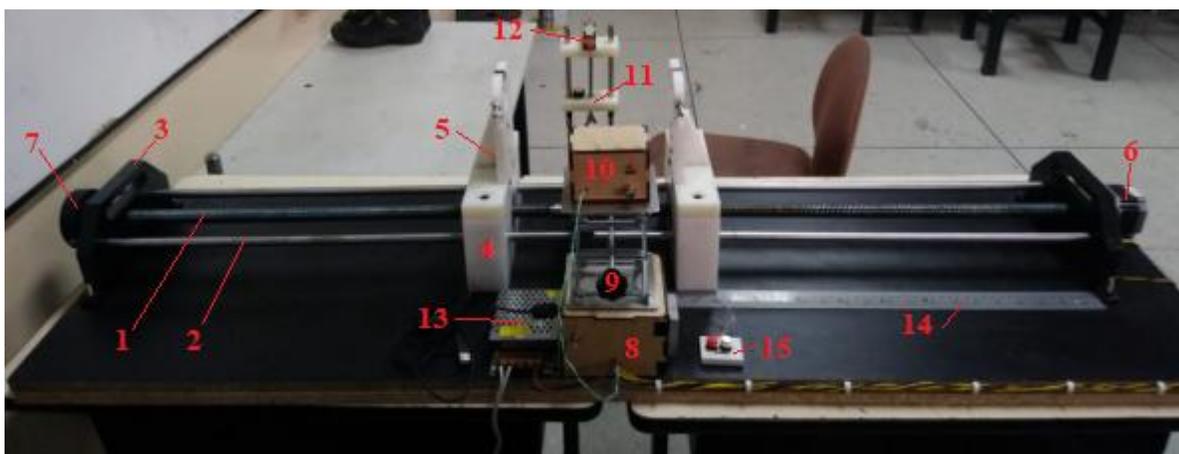


Figura 25. Ensamble banco de pruebas

En la figura 25 vemos las piezas y componentes del banco de pruebas; 1 - tornillo trapecoidal, 2 – guías, 3 – bases de acero, 4 – soporte de pinzas, 5 – pinzas, 6 – motor a pasos, 7 – manija de movimiento manual, 8 - circuito motor a pasos, 9 – plataforma niveladora sensor, 10 – sensor láser, 11 – plataforma láser, 12 – láser, 13 – fuente de poder, 14 – regla graduada, 15 – pulsador.

Para controlar el movimiento de las pinzas se colocó fines de carrera, esto previene el desplazamiento excesivo de las pinzas hacia las bases de acero.

3.4. Moldes de Probetas

3.4.1. Moldes probetas de cordones elastoméricos

Las fibras del material serán de un diámetro de 3 mm, la longitud mínima requerida es de 150 mm. Los moldes se realizarán en grilon al igual que las pinzas, ya que el maquinado de este material es más sencillo. Del ancho del molde depende la cantidad de cordones que se realicen a la vez, la separación entre cordones será de 8 mm, para juntar los moldes se pondrá guías que ayudaran al cierre de los moldes, se realizaran pequeños agujeros de un diámetro máximo de 1 mm en una de las partes del molde para que la silicona pueda emanar los gases que permite que se seque

el material. Los moldes se aprecian en la figura 26, se utilizó dos moldes, en el molde A se pueden realizar 8 cordones a la vez mientras que en el molde B solo se pueden realizar 3.

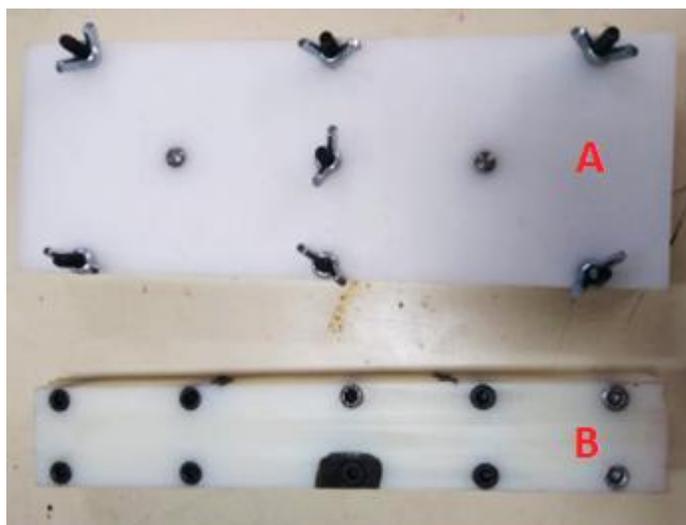


Figura 26. Moldes para construcción del material

La realización de los cordones se lo hizo por medio de una fresa redonda, para que el molde logre ser impermeable se colocó pernos que ayuden con el cierre del mismo.

3.4.2. Moldes probetas de ensayos a tracción

Para la caracterización del material, se realizarán ensayos a tracción según la norma ASTM D638 – (*Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos*), estos datos generan información importante para la investigación y desarrollo de los polímeros en general.

El tipo IV es usado para pruebas en materiales no rígidos con espesores menores a 4 mm, en la figura 27 se encuentran las dimensiones de los especímenes según la norma. Estas dimensiones son las utilizadas para elastómeros en la matriz de prueba. (ASTM D638 – 14). La norma se encuentra en la sección de anexos, ANEXO I.

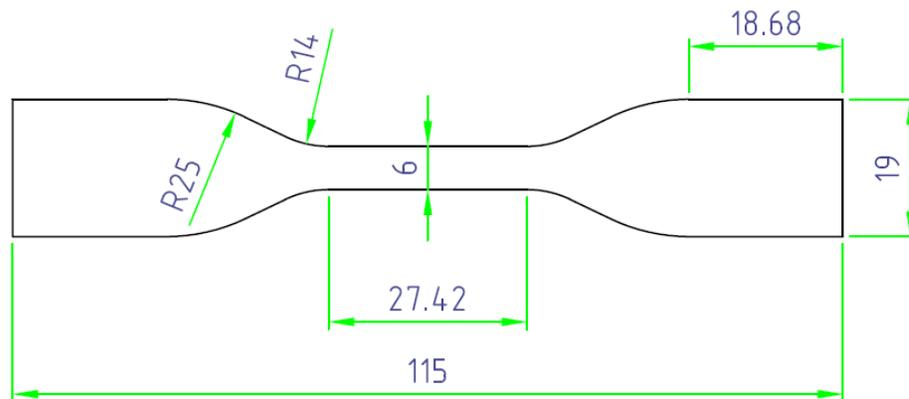


Figura 27. Medidas para las probetas de ensayo a tracción

3.5. Fabricación del material elastómero

3.5.1. Selección de la silicona

El material a ensayar será un elastómero como en estudios de fuentes citadas por ejemplo en (Johnson, 1995) se estudia el efecto Mullis en globos de látex, (Kim, y otros, 2012) compararon los modelos matemáticos de Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, y Ogden en cordones de Cloropreno al igual que en (Elías-Zúñiga, 2013) y otros autores que estudiaron el efecto de ablandamiento en estos materiales. El presente estudio se realizará con una silicona, la cual es de fácil acceso en el mercado nacional y de bajo costo, se escogió una silicona que se aplica comúnmente en la industria para realizar moldes para la reproducción de modelos de cera, metal, piedra, yeso, madera, cerámica, también se utiliza en la elaboración de máscaras o todo tipo de adornos. Dentro de la búsqueda de siliconas de este tipo se encuentran algunas con diferentes valores de dureza; estas siliconas tienen la característica que para su elaboración es necesario de un catalizador, el cual según su porcentaje de mezcla cambia el tiempo de curado y varía en sus propiedades.

Tabla 5*Características Relevantes de la silicona RTV-2*

Descripción	Medida
Dureza	$20 \pm 2 A^\circ$
Densidad	1,08 g/cm ³
Viscosidad	14000 ± 2000 MPa s a 25°C
Resistencia a la Tracción	≥ 34 kgf/cm ²
Resistencia al desgarro	≥ 23 kgf/cm
Elongación - Rotura	≥ 420 %

Fuente: (Almon del Ecuador S.A)

En el ANEXO H1 se encuentra la hoja técnica de la Silicona RTV 2, AL-620.

3.5.2. Procedimiento de fabricación

Para la elaboración del material se debe tener en cuenta algunas consideraciones; el porcentaje de humedad debe ser alrededor de 50% a 60% y la temperatura alrededor de 17°C a 22°C, un ambiente como el clima del Valle de los Chillos o Quito es idóneo para la elaboración. Para medir estos parámetros se utilizó un sensor de temperatura y humedad relativa como el de la figura 28.



Figura 28. Temperatura y humedad relativa

Como la silicona necesita del catalizador para su curado se decidió realizar la mezcla con tres porcentajes diferentes, 1.5%, 1.75% y 2% de catalizador; de esta forma se obtienen tres cordones de elastómeros con diferentes propiedades.

Para la mezcla se tomó las siguientes cantidades aproximadamente, para el molde A se realizó dos mezclas con 12gr de silicona, mientras que para el molde B se realizó una mezcla con 10 gr de silicona. A esta cantidad de silicona líquida se le debe agregar el 1.5%, 1.75% o 2% de catalizador según su peso, cabe recalcar que las medidas deben ser lo más exactas posibles ya que la diferencia de porcentaje de catalizador no es mucha, por tal motivo la mezcla se la realizó con una balanza de precisión como se observa en la figura 29.



Figura 29. Preparación de la mezcla del material

El tiempo de fluidez del material es relativamente corto, entre unos 4 a 15 minutos aproximadamente según el porcentaje de catalizador, mientras mayor sea el porcentaje de catalizador menor será el tiempo de fluidez, por tal motivo la manipulación y la mezcla se lo debe realizar rápidamente intentando que los movimientos no sean muy agitados ya que pueden producir gran cantidad de burbujas. Para verter la mezcla del material en los moldes se usó dos técnicas, la primera por inyección y la segunda por unión, esta última consiste en esparcir en cada lado del molde la mezcla y después unirlos como lo vemos en la figura 30.



Figura 30. Elaboración de cordones por el método de unión

El tiempo de curado es de 3 a 5 horas dependiendo del catalizador; mayor porcentaje de catalizador menor tiempo de curado, la extracción de los cordones se lo debe realizar con mucho cuidado ya que pueden romperse al momento de despegar las piezas, también habrá un poco de material que se abra desparramador por los lados del molde se debe retirar esta telita ocasionada con cuidado de rasgar al cordón, otra sección a tomar en cuenta es en los agujero de venteo ya que por ellos el material también tiende a desparramarse (figura 31, figura 32).



Figura 31. Extracción de cordones de los moldes

Para verificar que los cordones sean homogéneos se calculó la densidad de los cordones, (explicación en el punto 4.1). Cabe recalcar que los cordones realizados por el método de inyección presentaron un número considerable de burbujas por lo que los ensayos no se realizaran con dichos cordones.



Figura 32. Cordones extraídos de los moldes

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO

El presente capítulo explica las diferentes pruebas y ensayos que se realizaron para la comprobación de propiedades y toma de datos según lo descrito en el capítulo 3, para posteriormente continuar con el análisis de dichos datos.

4.1. Densidad

En el literal 3.5.2 se explicó la fabricación de los cordones con la silicona escogida, para comprobar que el proceso se lo realizó correctamente se procedió a pesar los cordones para sacar la densidad del mismo y comprobarla con la hoja técnica de la silicona.

Este procedimiento se realizó para una muestra de 9 cordones de cada porcentaje de catalizador, en el ANEXO E1 está la tabla de datos de los pesos obtenidos, el anexo mencionado se especifica resumidamente en la Tabla 6 donde se encuentran los datos promedios de cada catalizador con su respectiva dispersión.

Tabla 6

Densidades de los Cordones de Silicona RTV-2. Promedios de 9 muestras

% Catalizador	Densidad Volumétrica (gr/cm ³)	Densidad Lineal (gr/cm)
1.5 %	1,039 ± 0,041647	0,073 ± 0,073464
1.75 %	1,103 ± 0,031336	0,078 ± 0,077954
2 %	1,157 ± 0,031377	0,082 ± 0,081777
GENERAL	1,099 ± 0,05837	0,078 ± 0,077732

Teniendo en cuenta que la densidad de la silicona es de 1,08 gr/cm³ según la ficha técnica de la silicona podemos sacar el porcentaje de error.

$$\%error = \left| \frac{1,08-1,1}{1,1} \right| \times 100\% = 1.82\% \quad (4.1)$$

Por lo tanto, se puede decir que el proceso de fabricación de los cordones fue satisfactorio en lo que respecta a sus propiedades. Adicionalmente se determinó la densidad lineal del material que va a ser utilizada para el cálculo de la frecuencia v_0 más adelante.

4.2. Rotura de los cordones y longitud de prueba

Para determinar la distancia mínima y máxima de trabajo se rompió una muestra de 5 cordones por cada porcentaje de catalizador en el banco de pruebas construido, el cual dispone de una regla de apreciación 1 mm para medir la longitud de rotura. Este ensayo también sirvió para comprobar que la elongación del material sea propia de un elastómero, es decir mayor al 200%. Los datos completos se encuentran en el ANEXO E2.

Tabla 7

Distancia de Rotura y % de Elongación

% Catlz.	Prom. Dist Max (cm)	Prom. %Elong
1,5	43,58	363%
1,75	41,9	349%
2	39,04	325%
Prom.	41,51	346%

En la Tabla 7 se observa los datos resumidos del ensayo de rotura, para determinar las distancias con las que se trabajará en los ensayos, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se determina la longitud de rotura L_R , sacada de un promedio de 5 cordones (Tabla 7)

$$L_R = \text{Prom. rotura 5 cords}; \quad \text{Ejemplo: } L_{R2} = 39,04 \text{ cm}$$

2. La longitud de trabajo L_T es el 80% de la longitud de rotura L_R .

$$L_T = 0.8 L_R; \quad \text{Ejemplo: } L_{T2} = 0,8 \times 39,04 = 31,23 \text{ cm}$$

3. La longitud de carga y descarga L_{CD} me indica el número de estiramientos que se va realizar antes de empezar la descarga, la cual está definida por:

$$L_{CD} = L_T/4; \quad \text{Ejemplo: } L_{CD} = 31,23 / 4 = 7,8 \sim 8 \text{ cm}$$

4. La longitud de prueba L_P indica el desplazamiento entre puntos de toma de datos, ya sea para carga o descarga.

$$L_P = L_{CD}/5; \quad \text{Ejemplo: } L_P = 7,8 / 5 = 1,56 \sim 1 \text{ cm}$$

El ejemplo realizado fue para los cordones de 2% de catalizador ya que este es el que menos distancia de rotura tiene (Tabla 7), ya no es necesario realizarlo a los cordones de 1% y 1.75% para que las condiciones y parámetros del ensayo sean las mismas con los tres tipos de cordones.

4.3. Toma de datos de carga y descarga de los elastómeros

Para iniciar con el experimento, se verificó que los cordones colocados en las mordazas tengan una pequeña tensión inicial, la cual se procuró sea igual en los cordones de cada porcentaje de catalizador (se controló mediante la vibración en esa disposición). El ensayo consta de ciclos, donde cada uno tiene ocho puntos en los que se tomará mediciones de frecuencia, tanto al cargar como al descargar el cordón. La longitud inicial es de $L_0 = 12 \text{ cm}$ y se deforma en intervalos de $L_P = 1 \text{ cm}$ (longitud de prueba):

- El primer estiramiento será $L_{e1} = 12 + 1 = 13 \text{ cm}$ (inicio del ciclo)
- El segundo estiramiento será $L_{e2} = 12 + 2 = 14 \text{ cm}$

Donde L_{ei} es la longitud “i” de estiramiento. En cada punto se mide cinco veces la frecuencia de vibración con ayuda del frecuencímetro. Una vez tomadas las medidas del octavo estiramiento se prosigue con la descarga, donde se mide la frecuencia retrocediendo $L_P = 1 \text{ cm}$ hasta llegar a L_{e1} .

Para continuar con el siguiente ciclo se estira al cordón hasta la distancia $L_{e9} = L_{e8} + L_P$ (correspondiente al segundo ciclo) y se toman los datos de carga y descarga con el mismo procedimiento. Esto se repite hasta que el cordón se rompa.

En la Tabla 8 se encuentra un ejemplo de los datos obtenidos de un cordón de silicona al 1,75% de catalizador; en el ANEXO E3 se encuentran los datos de carga y descarga completos de este cordón y del resto de cordones ensayados con sus respectivas gráficas.

Tabla 8

Datos Parciales de Carga y Descarga de un cordón de 1.75% - Lote 16

L_e (cm)	F. de Carga (Hz)	F. de Descarga (Hz)
13	63	60,2
14	74,2	72,6
19	104,2	100,8
20	107,6	107,6
20	107,6	94,0
21	110,4	97,0
27	132,8	122
28	136,6	136,6
28	136,6	99
29	136,6	103
35	154,4	137,8
36	156	156
36	156	
37	155,8	
39	161	
40	rotura	

Los cordones se denominan:

Lxx – **Ex**
Lote – #Cordón

Es así que el cordón L12_E1 es el primer cordón del lote 12.

Las distancias de 20, 28 y 36 cm son aquellas en las que terminan el ciclo, como se observa los valores en estos puntos se repiten en la carga y descarga. Este cordón alcanzó a tres ciclos completos y se rompió en el cuarto ciclo a 40 cm. Con los datos obtenidos se gráfica la curva de Deformación – Frecuencia (figura 33), cómo se aprecia la curva toma la forma del Efecto Mullins, que tiene tres ciclos terminados y la continuación de un cuarto que marca la rotura del material. Según la ecuación de Taylor (Ec 2.8) la frecuencia es directamente proporcional a la tensión, por lo tanto, mientras más aumentamos la distancia de estiramiento del cordón, este se vuelve más tenso y por consiguiente la frecuencia es mayor; tal y como se observa en la figura 33.

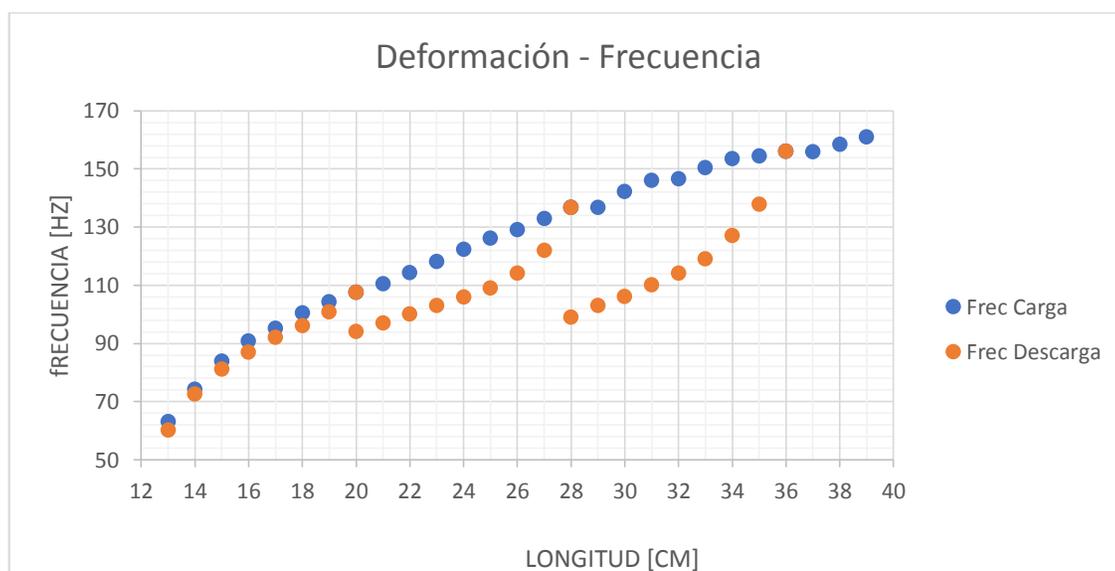


Figura 33. Deformación - Frecuencia. Cordón 1,75% - Lote 16

Con los datos obtenidos se prosigue a realizar el análisis de los modelos matemáticos.

4.4. Ensayos de Tracción

Los ensayos de tracción se realizan para caracterizar al material, estos ensayos se basan en la norma ASTM D638 – Método de Pruebas Estándar para Propiedades de Tracción de los Polímeros.

En la figura 34 se detalla el cuadro de velocidades para el ensayo, la silicona utilizada se encuentra en la clasificación de Polímeros no rígidos (Tipo IV). (ASTM Internacional, 2015)

Los ensayos de tracción se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales de ingeniería civil en la máquina Shimadzu, AGS 50kN teniendo en cuenta como parámetros de entrada a la velocidad y a la geometría medida de la sección transversal.

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %
500 (20) ± 10 %			10
IV		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

Figura 34. Velocidades para el ensayo a tracción

Fuente (ASTM Internacional, 2015)

Los resultados del ensayo se detallan en el ANEXO E4 y en la Tabla 9 se especifica los módulos de elasticidad obtenidos de cada porcentaje de catalizador, los cuales se utilizó en el cálculo de constantes para el modelamiento matemático.

Tabla 9

Resultados del ensayo a tracción

Concentración de Catalizador	Módulo de Elasticidad [Pa]
1.5%	337165
1.75%	391195
2%	428500

En la figura 35 se muestra la gráfica obtenida del ensayo a tracción (Shimadzu AGS 50 kN) para la probeta de 1.5% de catalizador. El material obtuvo un comportamiento de tendencia lineal, la rotura del material fue a una fuerza de 40 Newtons.

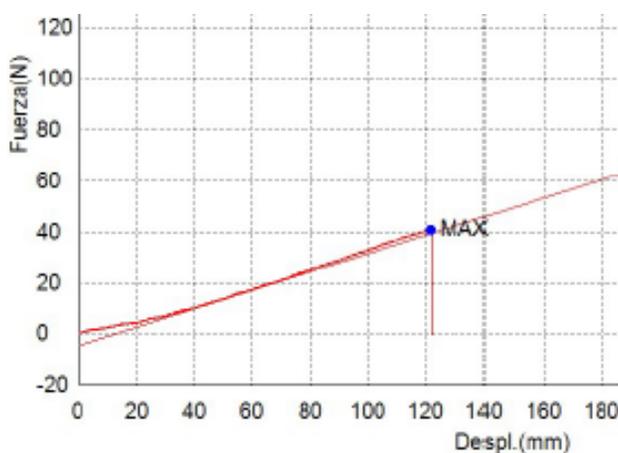


Figura 35. Ensayo a Tracción 1.5% (Anexo E4.1)

4.5. Programación

Para facilitar el estudio, se implementó en Matlab® funciones para la generación de información requerida para visualizar, analizar, realización de tareas repetitivas y simplicidad de ingreso de datos mediante una interfaz gráfica.

4.5.1. Programa para modelos matemáticos

Se crearon varias funciones que calculan la nube de puntos para graficar cada uno de los modelos correspondientes en base a los parámetros de entrada como se muestra en la Tabla 10. La programación en Matlab® se encuentra en el ANEXO C2 y el diagrama de flujo de la función se detalla en el ANEXO D2 y las variables implicadas en el cálculo se detallan a en

Tabla 11.

Tabla 10*Nombre de función y datos de entrada para la función en Matlab®*

Modelo	Nombre de la función en Matlab®	Variables de entrada
Mooney – Rivlin	fmr	b,r,v0,M
Bio - Material	fbm	b,r,v0,M
Gent	fgent	b,jm,v0,M
James – Guth (No Gaussiano)	fjg	b,N3,v0,M
Full Network (No Gaussiano)	ffn	b,N,v0,M

Tabla 11*Variables de entrada y salida para las funciones de los modelos*

Variable	Tipo	Descripción
b	Double positiva	Parámetro de ablandamiento.
r	Double positiva	Constante del material, relacionada con el módulo de cizalla, parámetro para ajuste de curva.
jm	Double positiva	Constante igual a límite de la primera invariante en la máxima deformación de una cadena molecular en una extensión simple.
N3	Double positiva	Constante relacionada con el número de eslabones en la red de 3 cadenas del polímero.
N	Double positiva	Es el número de eslabones de la cadena molecular del polímero.
v0	Double positiva	Frecuencia fundamental de vibración para la disposición del ensayo.
M	Vector	Contiene los valores de los puntos de carga y descarga, en su primer valor se copia el valor máximo de carga de todo el vector para graficar la curva del material virgen.
L	Matriz	Variable de salida, tiene las coordenadas en X de los puntos considerados para graficar los modelos, sus filas son 100 puntos distribuidos entre los valores máximo y mínimo de M, y sus columnas, depende del número de distancias de carga y descarga.
vs	Matriz	Variable de salida, tiene las coordenadas en Y de los puntos considerados para graficar los modelos, sus filas y columnas equivalen a las de la matriz L.

4.5.2. Programas para el ajuste de datos

Los modelos tienen parámetros de entrada relacionados con el material, los cuales de acuerdo con (Zúñiga, 2006), son variables para ajustar la curva a los datos experimentales, la Tabla 12 sugiere un rango de variación donde el cambio de pendiente es considerable.

Tabla 12*Variables de ajuste para cada modelo*

Modelo	Parámetro	Rango sugerido
Mooney – Rivlin, Bio - Material	r	{0;1}
Gent	jm	{1;150}
James – Guth (No Gaussiano)	N3	{2;90}
Full Network (No Gaussiano)	N	{2;40}

4.5.2.1 Función *fdif*:

Esta función tiene como objetivo calcular la diferencia entre los datos experimentales y el modelo matemático, esto lo hace interpolando un vector en el rango de datos experimentales como se observa en la figura 36. La función retorna la suma del valor absoluto cada diferencia. Las variables de entrada se detallan en Tabla 13 y el diagrama de flujo de la función se encuentra en el ANEXO D2, la programación en Matlab® se encuentra en el ANEXO C2.6.

Tabla 13*Variables de entrada para la función *fdif**

Variable	Tipo	Descripción
x1	Vector	Coordenadas en la abscisa de los datos experimentales
y1	Vector	Coordenadas en las ordenadas de los datos experimentales
x2	Vector	Coordenadas en las abscisas de los modelos
y2	Vector	Coordenadas en la ordenada de los modelos
n	Int positiva	Número de elementos del vector generado entre el menor y el mayor del rango de los datos reales

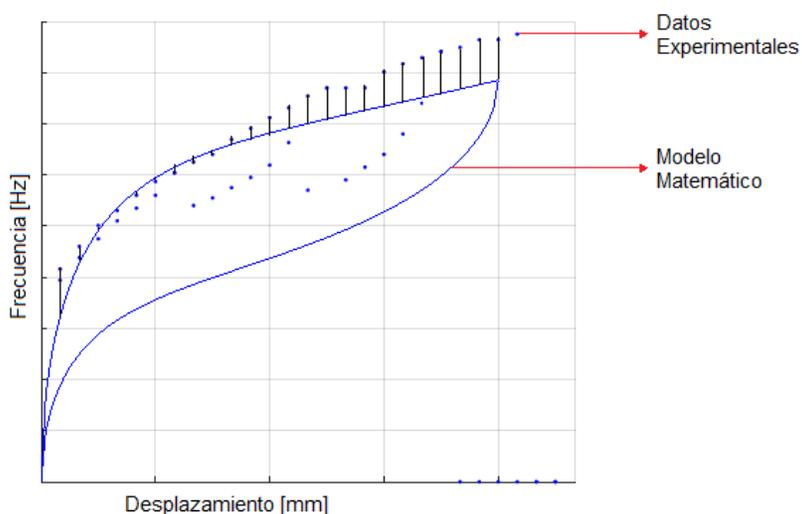


Figura 36. Gráfico Datos experimentales y teóricos

4.5.2.2 Función *opt*

Esta función retorna el valor de la variable donde el valor donde *fdif* es menor, para ello la función evalúa el parámetro de ajuste acorde al rango de variación y al número de iteraciones seleccionado por el usuario. Las variables de entrada se detallan en la Tabla 14, cabe resaltar que la función, además de la función *fdif* usa las funciones de los modelos descritos en la Tabla 10 y su diagrama de flujo se detalla en el ANEXO D2, la programación en Matlab® se encuentra en el ANEXO C2.7.

Tabla 14

*Variables de entrada para la función *opt**

Variable	Tipo	Descripción
dreal	char	Nombre del archivo que contiene los datos experimentales
n	Int	Numero de iteraciones
u0	Double	Límite inferior del rango ingresado por el usuario para buscar el parámetro de ajuste de curva
uf	Double	Límite superior del rango ingresado por el usuario para buscar el parámetro de ajuste de curva

Continúa →

model	Int	1 Mooney Rivlin, 2 Bio Material, 3 Gent, 4 James Guth, 5 Full Network
b	Double	Parámetro de ablandamiento
v0	Double	Frecuencia fundamental de vibración para la disposición del ensayo EC 2.9
M	Vector	Contiene los valores de los puntos de carga y descarga, en su primer valor se copia el valor máximo de carga de todo el vector para graficar la curva del material virgen

4.5.3. Interfaz Gráfica

Como se ha mostrado en cada etapa, son muchos los datos que se requieren para graficar las funciones, por lo que se propone la siguiente interfaz (figura 37) desarrollada en GUI de Matlab®:

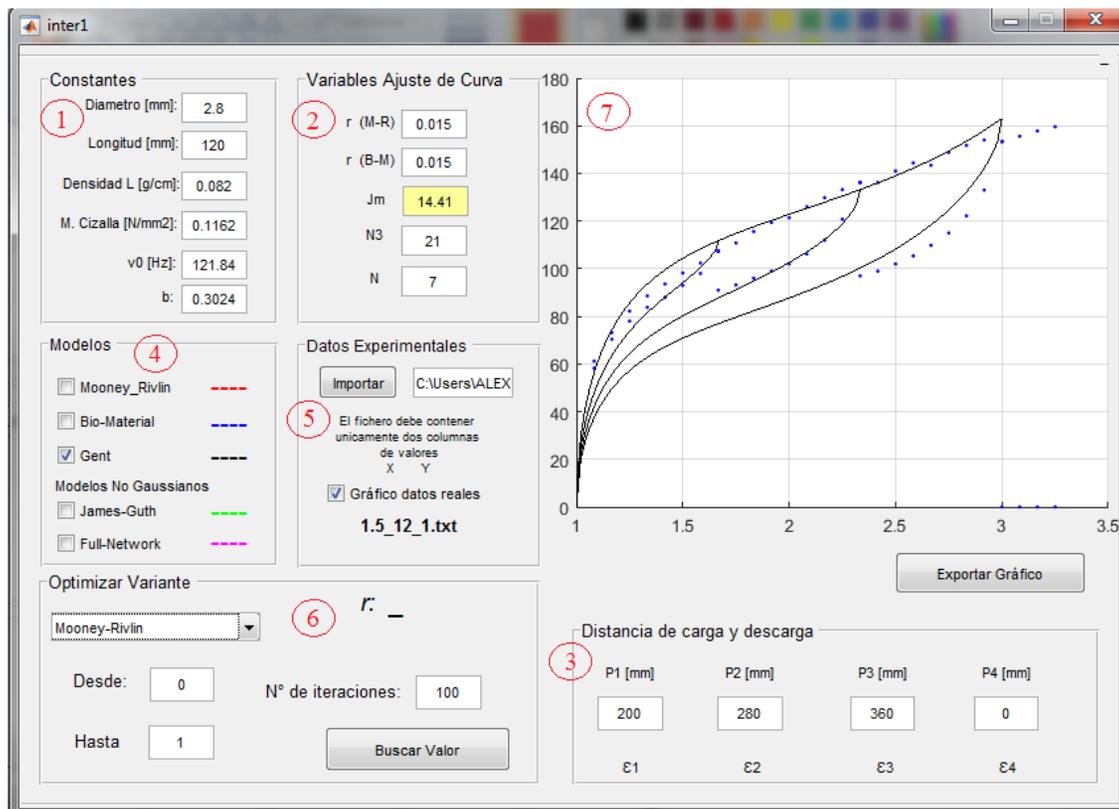
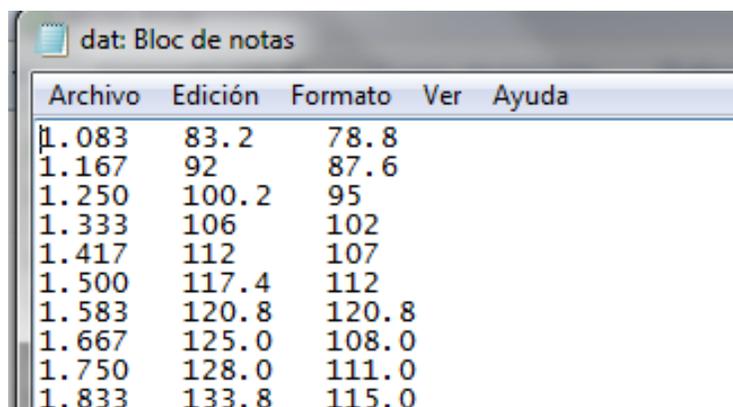


Figura 37. Interfaz gráfica para las funciones creadas

- 1. Constantes:** En este apartado se ingresan los valores obtenidos de la geometría del cordón (diámetro, longitud), así como propiedades del material (densidad lineal, módulo de cizalla y constante de daño por pre estiramiento). Estos datos se usan en el cálculo de v_0 que es la frecuencia fundamental de vibración definida por la EC2.9
- 2. Variables de Ajuste:** definidas en la
- 3.** Tabla 11.
- 4. Distancia de carga y descarga:** Son las coordenadas en milímetros de la distancia donde se intercambia el estiramiento por la contracción del cordón, esto con el motivo de tomar los datos de frecuencia afectada por el pre estiramiento.
- 5. Modelos de Comportamiento:** Esta sección permite mostrar la gráfica del modelo matemático seleccionado, calculado a partir de los parámetros en 1 y 2.
- 6. Datos experimentales:** Aquí se introduce el nombre del archivo y su extensión, archivo de texto (*.txt) o archivo script de Matlab® (*.m), con las coordenadas de los puntos obtenidos en el ensayo, el archivo del ensayo debe tener únicamente tres columnas, donde la primera será para las deformaciones, la segunda será para la frecuencia cuando el material es virgen y la tercera para los datos de la frecuencia previo el estiramiento, tal como se indica en la figura 38.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1.083	83.2	78.8		
1.167	92	87.6		
1.250	100.2	95		
1.333	106	102		
1.417	112	107		
1.500	117.4	112		
1.583	120.8	120.8		
1.667	125.0	108.0		
1.750	128.0	111.0		
1.833	133.8	115.0		

Figura 38. Ejemplo de archivo con datos experimentales

- 7. Ajustar Parámetro:** En este apartado se selecciona el modelo, se ingresa el rango de variación, y se ingresa el número de iteraciones para buscar el valor evaluado que más se aproxime a los resultados del experimento realizado, este valor se actualiza automáticamente y marca de amarillo la celda modificada.
- 8. Gráfico:** En esta sección se dibujan los modelos matemáticos (ítem 4) y los datos experimentales (ítem 5), también permite exportar el gráfico a la ventana de Matlab® para poder guardar en el formato que se requiera.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo indica los resultados y la interpretación de los ensayos de tracción y de los datos experimentales obtenidos del ensayo de carga y descarga de los cordones, con el fin de realizar una comparación adecuada de los modelos.

5.1. Ensayos a Tracción

Para poder definir por completo a las ecuaciones, Ec2.20, Ec2.22, Ec2.24, Ec2.27, Ec2.29 la Tabla 15 indica los parámetros a utilizar

Tabla 15

Parámetros para los modelos

Símbolo	Definición	Valor/Referencia
V_0	Frecuencia fundamental de vibración	EC2.9
b	Parámetro de ablandamiento del material	Figura 36
m	Intensidad de deformación	EC2.5
M	Máxima intensidad de deformación	EC2.5

5.1.1. Frecuencia Fundamental de Vibración

Para calcular este parámetro es necesario determinar el módulo de cizalla (μ_0) de la silicona, el cual según (Budynas & Nisbett, 2012) se determina mediante la Ec 4.1. El módulo de elasticidad E se determinó por resultados del ensayo de tracción (Tabla 9). El coeficiente de poisson (ω) se definió acorde al ensayo de tracción e investigaciones como (Wolf & Descamps, 2003) y (Drechsel, 2007) que exponen la gran variación en la determinación experimental de ω , donde sugieren un valor de 0.4, mientras que (Brown, 2006) recomienda tomar valores cercanos a 0.5; tomando en cuenta las sugerencias citadas se eligió un valor de $\omega=0.45$ para el módulo de Poisson.

$$\mu_0 = \frac{E}{2(1+\omega)} \quad (4.1)$$

Se obtiene el módulo de cizalla $\mu_{0_n\%}$ para cada porcentaje de catalizador:

$$\mu_{0_{1.5\%}} = 0.116 \text{ [MPa]} \quad \mu_{0_{1.75\%}} = 0.135 \text{ [MPa]} \quad \mu_{0_{2\%}} = 0.148 \text{ [MPa]}$$

Los ensayos se realizaron con cordones de diámetro 2.8[mm], una longitud inicial de 12[cm], una densidad lineal de 0.082 [g/cm²] y los valores del módulo de cizalla obtenidos; estos datos se reemplazan en la Ec. 2.9 para obtener la frecuencia fundamental de vibración $v_{0_n\%}$ para cada porcentaje de catalizador:

$$v_{0_{1.5\%}} = 121.8 \text{ [Hz]} \quad v_{0_{1.75\%}} = 131.2 \text{ [Hz]} \quad v_{0_{2\%}} = 137.3 \text{ [Hz]}$$

5.1.2. Parámetro de ablandamiento del material

Para calcular el parámetro b se realiza una evaluación experimental propuesta en (Zuñiga & Beatty, 2002), donde b es la pendiente de la sección lineal de la figura 39.

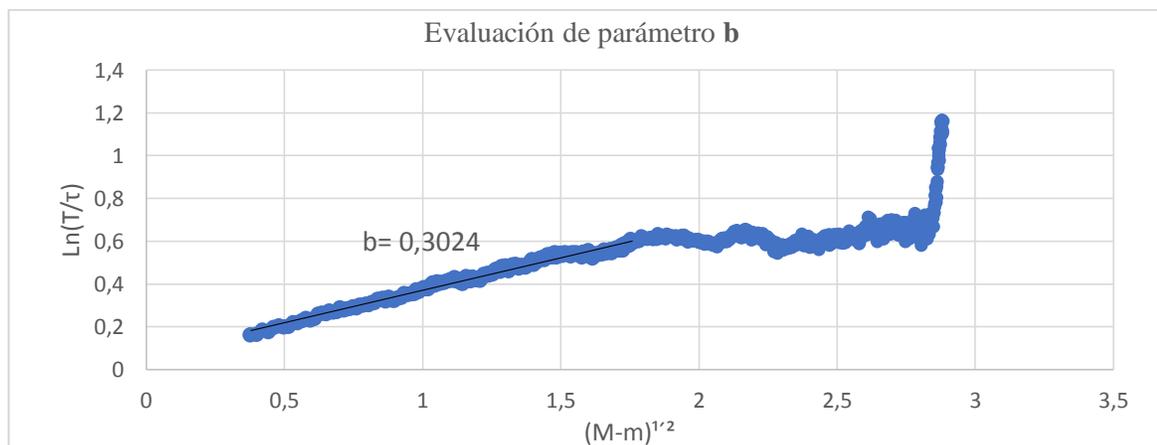


Figura 39. Evaluación del parámetro de ablandamiento en un ensayo de tracción uniaxial controlado

Para lo cual se realizó un ensayo de carga y descarga donde se registró en el tiempo el valor de la fuerza ejercida por los elementos de sujeción. En el ANEXO F1 se encuentra los datos de los ensayos para los tres porcentajes de catalizador, escogemos el valor de $b = 0.3024$ de las probetas

de 1.75% para usarlo en las ecuaciones de los modelos de todos los cordones ensayados; puesto que se acerca mucho a la media de los tres porcentajes de catalizador.

5.2.Resultados Experimentales Carga – Descarga

El criterio de comparación, se basa en la diferencia de frecuencia que existe entre los modelos teóricos respecto a los datos experimentales, tomando en consideración que el análisis se lo realiza en las mismas condiciones.

5.2.1. Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 1.5%

La figura 40 muestra el gráfico de los ensayos de diferentes cordones. Hay que recalcar que los ensayos se realizaron en las mismas distancias de carga y descarga con el fin de verificar repetibilidad en los datos obtenidos.

Para la curva de carga, la diferencia se mantiene alrededor de 3% respecto del promedio, con excepción de los 3 primeros puntos que presentan un error hasta de 9.3%. Para la descarga la diferencia está cercana al 2%, que al igual que la anterior curva, tiene diferencias mayores en sus tres primeros puntos. La tabla completa indicando las variaciones respecto del promedio se detalla en ANEXO F2.1.

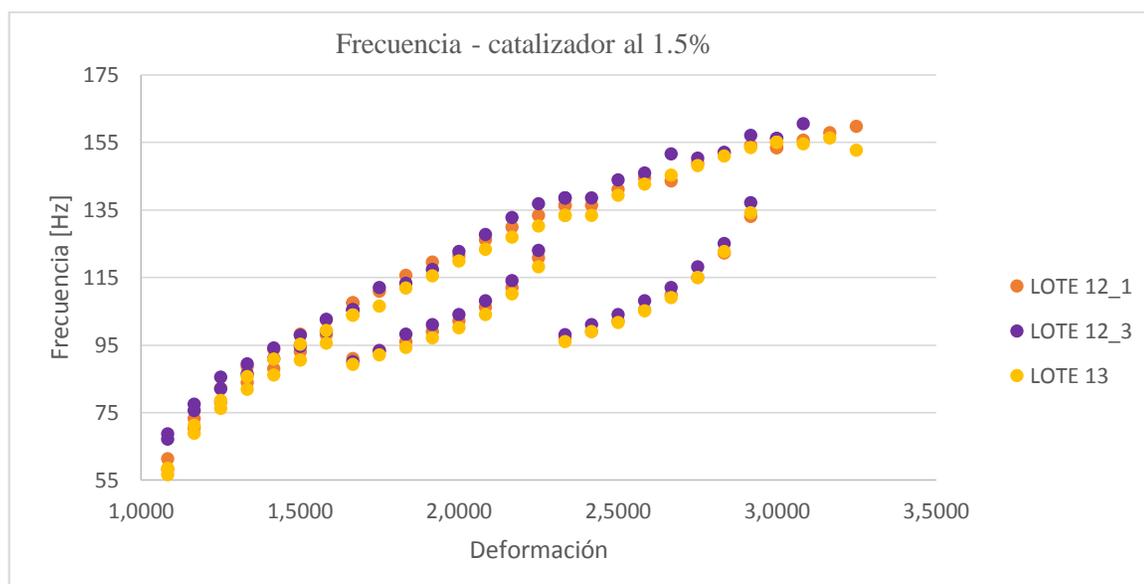


Figura 40. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 1.5%

Para ajustar los modelos a los datos reales se empleó el método que la figura 33 indica, el cual busca la menor diferencia entre las curvas de los datos experimentales y los datos teóricos. En el ANEXO F3.1 se encuentra el ajuste de los modelos matemáticos para cada cordón de 1.5% de catalizador siendo la Tabla 16 el resumen de ese análisis.

Tabla 16

Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 1.5%

Cordones con 1,5% $\mu_0 = 121.8$				
Modelo	Variable de ajuste	L12_E1	L12_E2	L13_E1
		variable de ajuste	variable de ajuste	variable de ajuste
Mooney Rivlin	r	0	0	0
Bio Material	r	0,084	0,089	0,081
Gent	jm	14,857	14,112	15,304
James Guth	N3	15,464	15,2	15,816
Full Network	N	5,458	5,42	5,686

El modelo de Bio-Material es el que mejor se ajusta en los cordones L12_E1 y L12_E2 y el modelo de Gent para L13_E1. Los resultados se pueden apreciar en las gráficas del ANEXO F4.

El cordón con la diferencia más grande fue L12_E2 de la figura 41, que tomaremos como ejemplo para analizar las principales discrepancias con los cordones de este este porcentaje de catalizador.

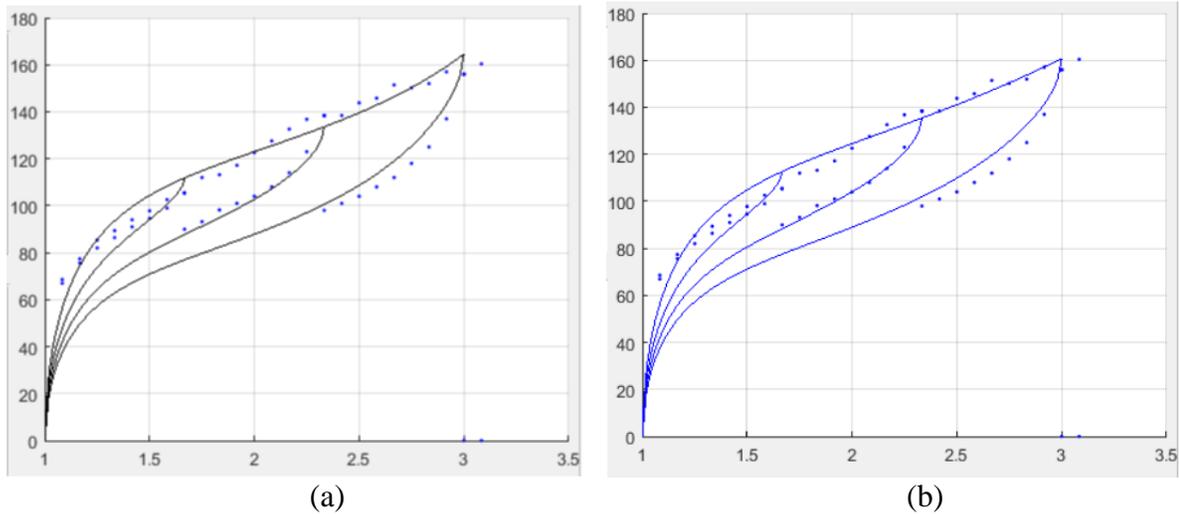


Figura 41. Ajuste Modelos Matemáticos del cordón L12_E2 (a) Gent, (b) Bio Material

En la curva de carga de la figura hay rangos donde existe un buen ajuste mientras que en las curvas de descarga el ajuste del primer ciclo no es bueno, pero en el segundo y tercero esta mejora.

En la curva de carga (figura 42) se pueden notar puntos de intersección, si a esto le añadimos la diferencia que hay entre las curvas podemos obtener una perspectiva, que se expone de mejor manera mediante la figura 43.

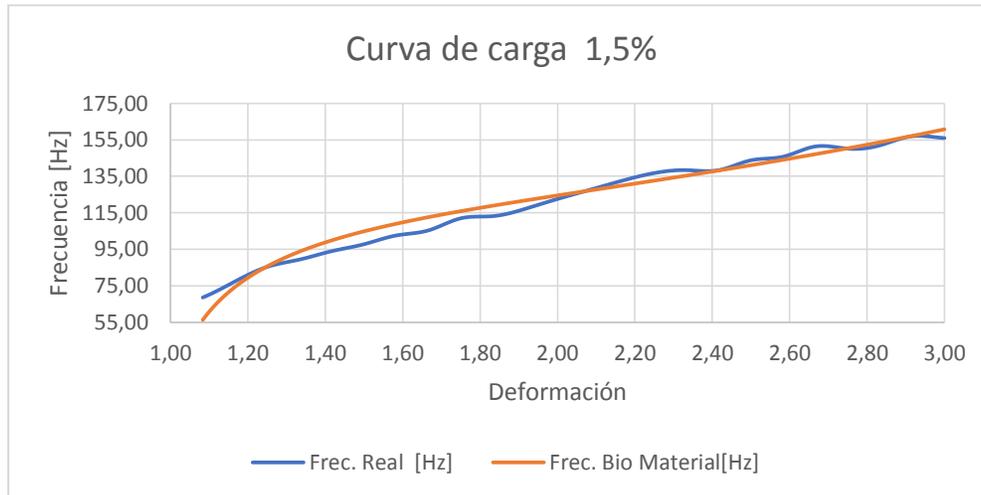


Figura 42. Curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales

En la figura 42 se observa únicamente las curvas de carga de Bio – Material y de los datos experimentales, las gráficas para los otros modelos constan en el ANEXO F4.1

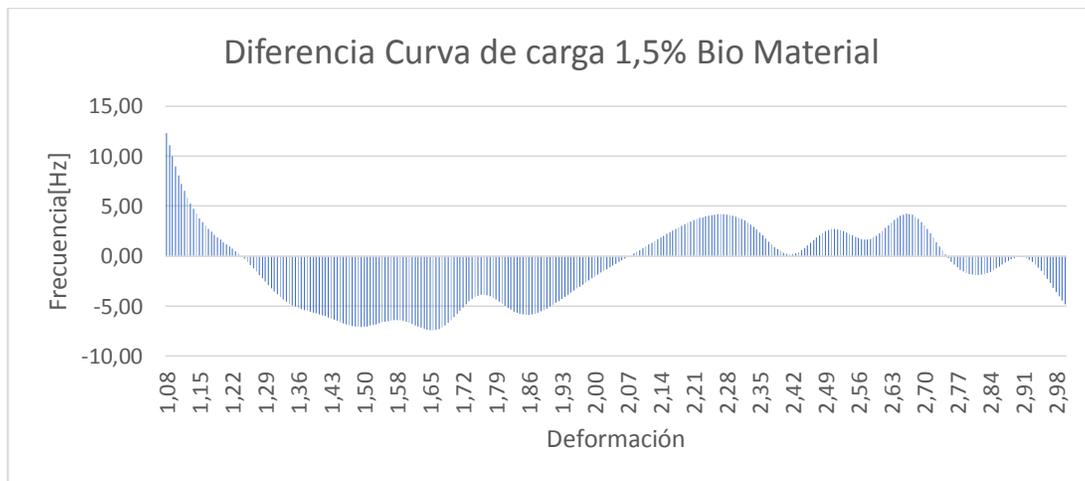


Figura 43. Diferencias entre curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales

En esta gráfica se destaca tres zonas importantes:

Zona 1 {1.08 ; 1.26}: es la zona donde existe la mayor diferencia numérica, que llega a los 12 puntos representando un 17% de diferencia respecto de los datos reales. En esta zona el material apenas empieza a estirarse.

Zona 2 {1.26 ; 2.06}: En esta zona si bien la diferencia numérica no es tan alta como en la zona 1, su diferencia respecto a los valores reales es 7%. Este es un intervalo que no se ajusta adecuadamente y representa un 40% del total de la deformación.

Zona 3 {2.06 ; 3}: La diferencia se mantiene bajo los 5 puntos de frecuencia siendo la zona que mejor se ajusta a los datos reales representando una diferencia del 3%.

5.2.2. Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 1.75%

Para este ensayo repetimos las consideraciones del ensayo anterior. La figura 44 indica el efecto Mullins para los cordones de 1.75 % de catalizador, los ensayos se realizaron a las mismas distancias de carga y descarga que los cordones de 1.5 %.

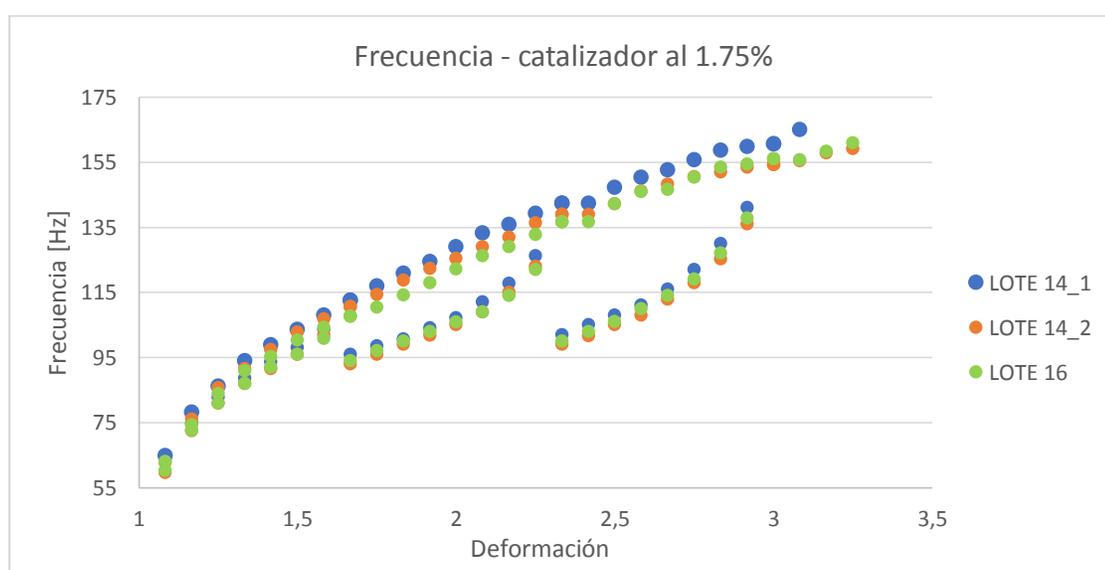


Figura 44. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 1.75%

Para la curva de carga la diferencia respecto del promedio es menor que 3.9%, para los datos de descarga la diferencia es menor a 3.61%. La tabla completa de diferencias de los cordones de esta concentración se detalla en el ANEXO F2.2.

En el ANEXO F3.2 se encuentra el ajuste de los modelos matemáticos para cada cordón de 1.75% de catalizador y la Tabla 17 es el resumen del análisis.

Tabla 17

Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 1.75%

Cordones con 1,75% $\mu_0 = 131.2$				
Modelo	Variable de ajuste	L14_E1	L14_E2	L16_E1
		variable de ajuste	variable de ajuste	variable de ajuste
Mooney Rivlin	r	0	0	0
Bio Material	r	0,072	0,057	0,058
Gent	jm	16,496	20,221	20,221
James Guth	N3	16,784	19,16	19,248
Full Network	N	6,066	6,864	6,826

Para los cordones de 1.75%, el modelo que mejor se ajusta es el modelo de Gent, y la diferencia con el modelo de Bio-Material es muy cerrada, ver ANEXO F4. El cordón con la diferencia más grande fue L16_E1 de la figura 45, que tomaremos como ejemplo para analizar las principales discrepancias con los cordones de este porcentaje de catalizador.

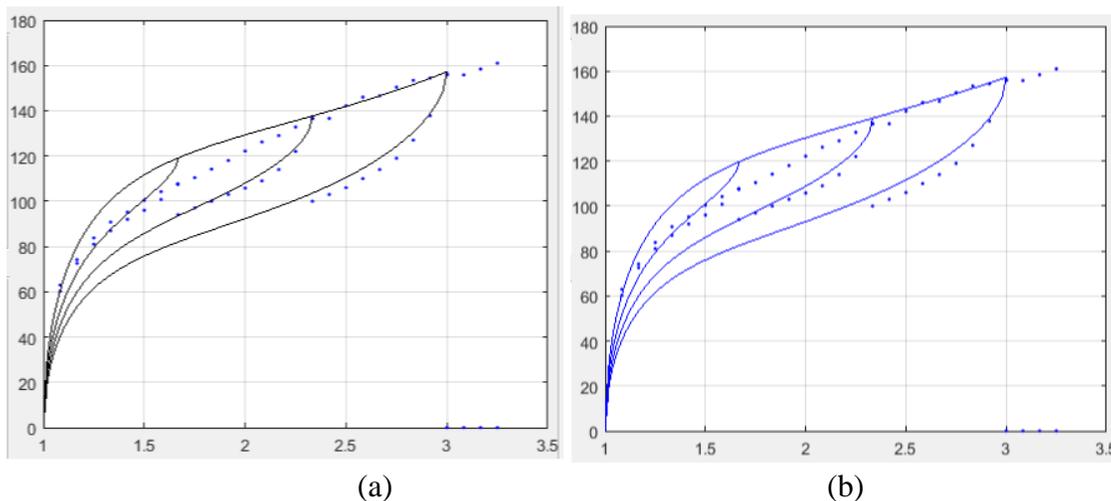


Figura 45. Ajuste Modelos Matemáticos del cordón L16_E1 (a) Gent, (b) Bio Material

Aquí apreciamos que los modelos de Gent y Bio Material , visualmente son iguales, pero el análisis realizado definió que el modelo de Gent se ajusta mejor. Las gráficas de todos los modelos con sus diferencias, constan en el ANEXO F4.2

Las curvas de carga de la figura 46 tienen dos puntos de intersección que generan dos zonas importantes. En esta gráfica se observa únicamente las curvas de carga, las gráficas para los otros modelos para la concentración de catalizador al 1.75%, constan en el ANEXO F4.

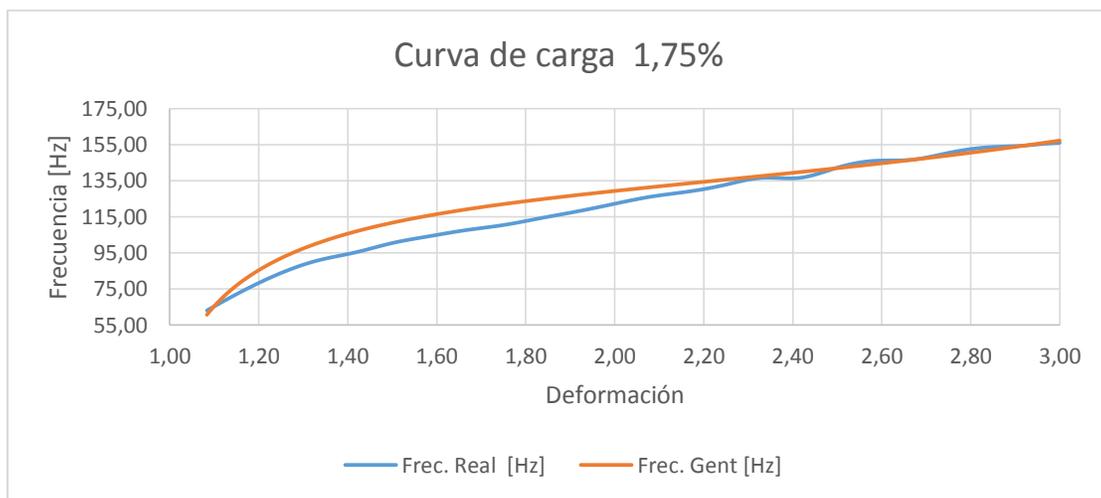


Figura 46. Curvas de carga de modelo Gent y datos reales

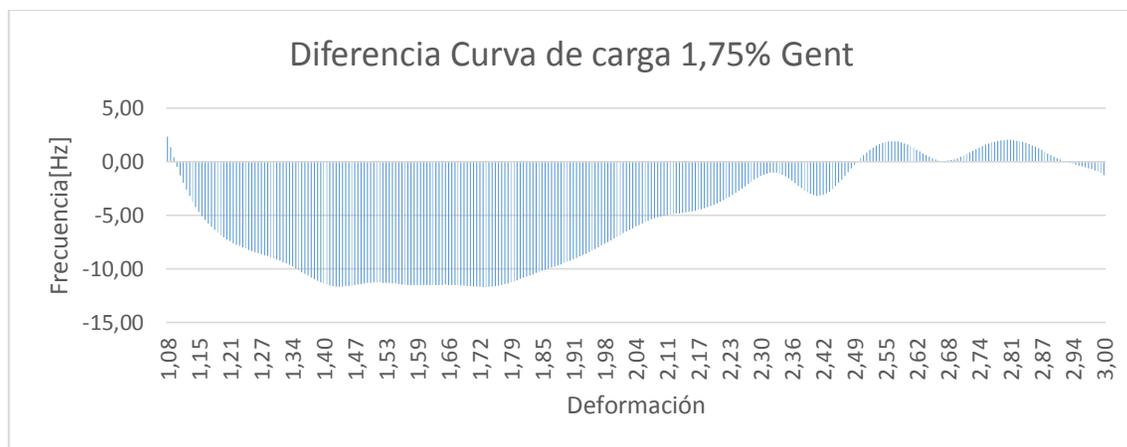


Figura 47. Diferencias entre curvas de carga de modelo Gent y datos reales

En la figura 47 se destacan dos zonas importantes:

Zona 1 {1.08 ; 2.35}: Aquí se observa un importante intervalo donde el modelo no describe adecuadamente el comportamiento del elastómero, que representa el 63% del total de la deformación, alcanzando una diferencia respecto a los datos reales de 12%.

Zona 2 {2.35 ; 3}: Esta zona posee una mínima diferencia respecto a los datos reales que es menor al 3 %.

5.2.3. Frecuencia de vibración de silicona RTV2 con catalizador al 2%

Igual que en los casos anteriores, antes de empezar con la toma de datos de carga y descarga, se verifica que el valor de la tensión inicial sea similar en todos los cordones, la figura 48 representa los datos experimentales de la carga y descarga de los cordones de 2%. Para estos ensayos las distancias de carga y descarga son distintas a los cordones de 1.5% y 1.75%, debido a que el material es más rígido y la longitud de rotura disminuyó, como ejemplo está el cordón L15_E1 en el ANEXO E3.3.

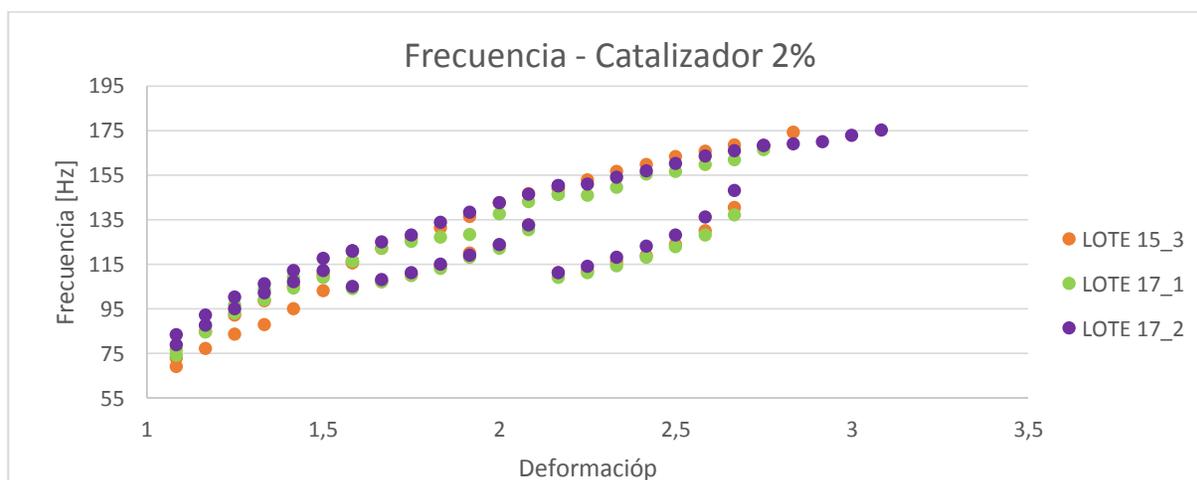


Figura 48. Comparación de frecuencia – deformación para cordones 2%

Para la curva de carga, la diferencia respecto del promedio es menor que 3.9% y para los datos de descarga la diferencia es menor a 3.61%. La tabla completa de diferencias para la concentración de 2% se detalla en el ANEXO F2.3.

En el ANEXO F3.3 se encuentra el ajuste de los modelos matemáticos para cada cordón de 2% de catalizador ensayado, en la Tabla 18 está el resumen del análisis.

Tabla 18

Valores ajustados para los datos experimentales de los cordones de 2%

Cordones con 2% $\mu_0 = 137.3$				
Modelo	Variable de ajuste	L15_E2	L17_E1	L17_E2
		variable de ajuste	variable de ajuste	variable de ajuste
Mooney Rivlin	r	0	0	0
Bio Material	r	0,1	0,081	0,092
Gent	jm	12,324	14,708	13,69
James Guth	N3	13,704	15,288	14,144
Full Network	N	5,002	5,57	5,192

Para los cordones E15-2 y E17-2, el modelo que mejor se ajusta es Bio-Material, mientras que para el cordón E17-1 es el modelo de Gent. Al igual que en los casos anteriores la diferencia entre el modelo de Bio-Material y Gent es muy baja, tal como muestra la figura 49. Como se realizó anteriormente se tomó el cordón L15_E2 cuyo ajuste es el menor de todos para analizar las diferencias.

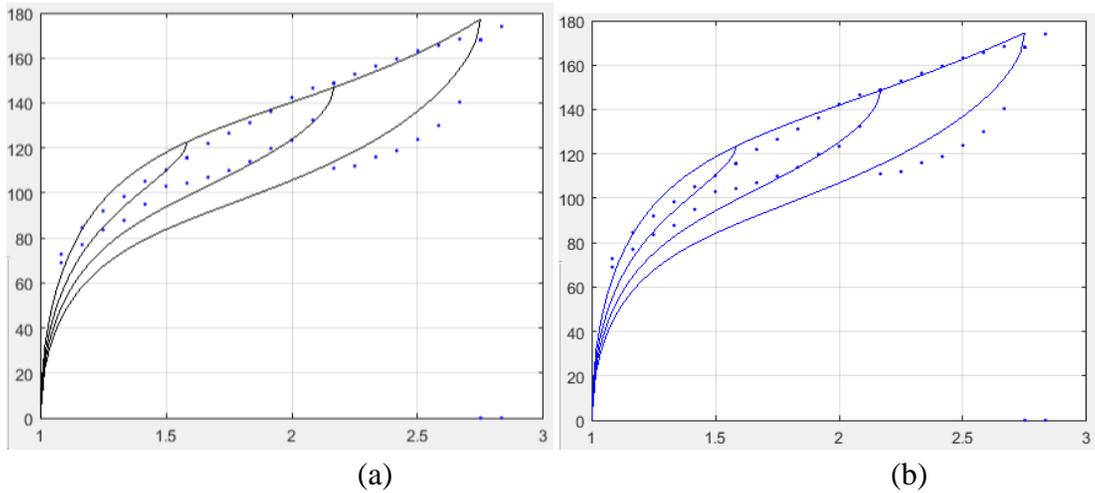


Figura 49. Ajuste Modelos Matemáticos del cordón L15_E2 (a) Gent, (b) Bio Material

En la figura 49 la curva no se adapta muy bien en los valores cercanos a 1.5 de deformación, pero al igual que en los casos anteriores, en el segundo y tercer ciclo de la curva, se ajusta mejor. Las gráficas de todos los modelos constan en el ANEXO F4.3.

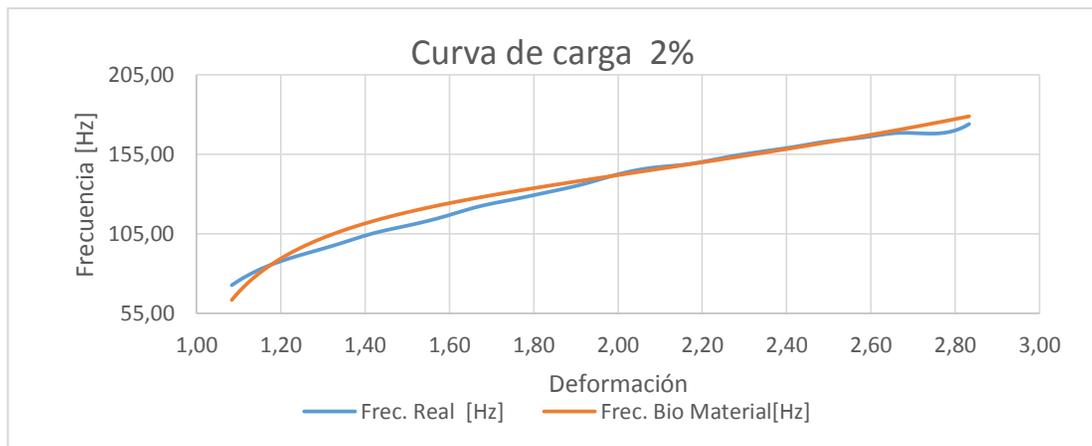


Figura 50. Curvas de carga de modelo Bio Material y datos reales

La figura 50 muestra únicamente las curvas de carga, las gráficas para los otros modelos con el 2% de catalizador constan en el ANEXO F4

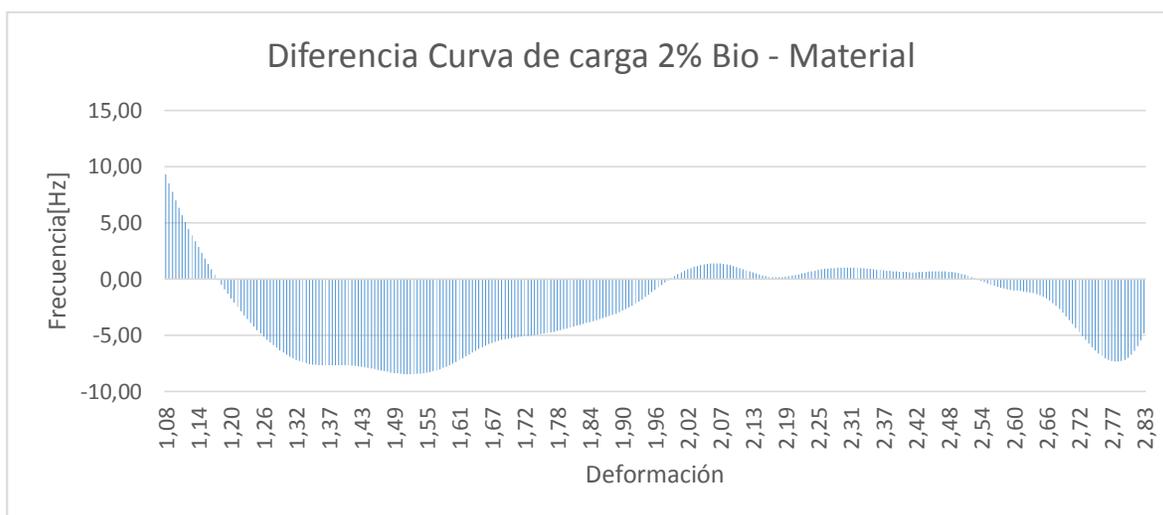


Figura 51. Diferencias entre curvas de carga de modelo Bio - Material y datos reales

La figura 51 destaca 4 zonas importantes:

Zona 1 {1.08 ; 1.19}: es la zona donde existe mayor diferencia numérica, que es similar al caso del cordón de 1.5%. Su máximo valor representa una diferencia del 12% respecto los datos reales.

Zona 2 {1.19 ; 1.98}: Hay una máxima diferencia numérica similar a la zona 1 que representa un 7% de diferencia respecto a los datos reales, es un intervalo donde el modelo no se ajusta adecuadamente y representa un 43% del total de la deformación.

Zona 3 {1.98 ; 2.55}: esta zona tiene excelente ajuste, ya que posee una máxima diferencia respecto a los datos reales que es menor al 1%.

Zona 4 {2.55 ; 2.82}: aquí se observa un comportamiento diferente a los casos de 1.5% y 1.75% ya que hay una importante diferencia del 4%.

5.3. Análisis de Parámetros de Ajuste

En la tabla 12 se encuentran las variables de ajuste que definen a cada modelo, Mooney Rivlin y Bio-Material tienen el mismo parámetro, no obstante, como se detalló en la sección 5.2 el modelo de Bio-Material es uno de los que mejor se ajustó a los datos experimentales mientras que el de Mooney Rivlin es el modelo que menos se ajusta. Tomando al cordón que tuvo menor diferencia entre estos modelos (Tabla 16, 1.75% - L16_E1) se observa en la figura 45 la gráfica correspondiente para ese cordón con sus respectivas variables de ajuste.

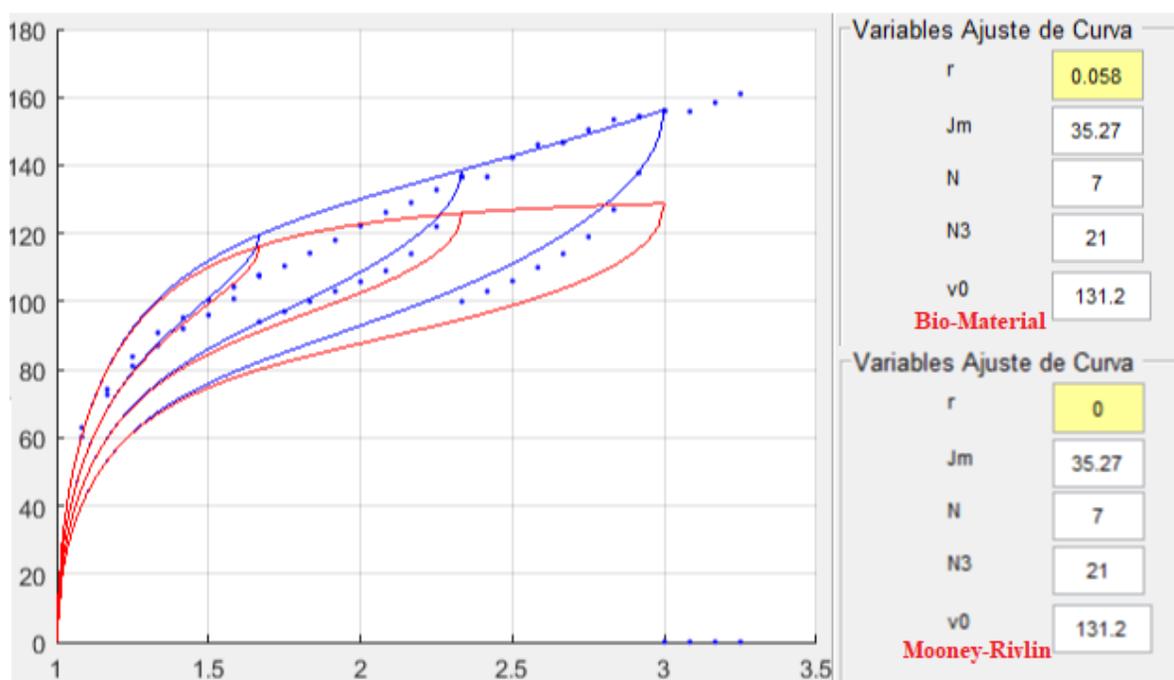


Figura 52. Comparación modelos de Mooney-Rivlin y Bio-Material.
Ejemplo para el cordón 1.75%_L16

La curva del modelo de Mooney-Rivlin (figura 52, curva roja) no se ajusta a los datos experimentales y el valor de $r = 0$, es aquel que da mejores resultados; en comparación a la curva del modelo de Bio - Material (figura 52, curva azul) que utiliza una constante $r=0.058$.

El valor recomendable (Tabla 12) para la constante del material r en el modelo de Mooney-Rivlin es entre 0 y 1, este parámetro se relaciona con el módulo de cizalla μ_0 , en la figura 44 se representa esta diferencia gráficamente, mientras más crece el valor de r la curva tiende a decaer por lo que la diferencia a los datos experimentales se incrementaría.

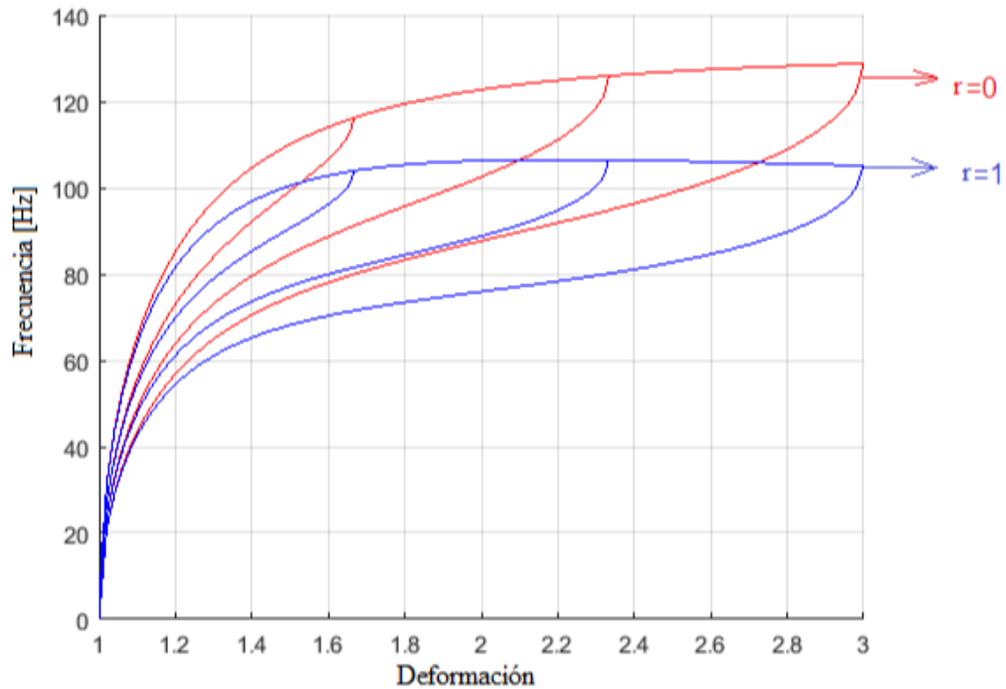


Figura 53. Rango recomendable de r en el modelo de Mooney Rivlin

El mismo análisis se lo hace para el modelo de Bio – Material donde el valor recomendable para la constante r es entre 0 y 0.5, en la figura 53 se observa la influencia, un valor aproximado de 0.05 es el más óptimo para que se ajuste con los datos experimentales. Si el valor de r disminuye al igual que sucede en Mooney-Rivlin la curva tiende a decaer, pero si los valores aumentan a partir de 0.05 la curva se muestra eleva considerablemente como en la figura 54.

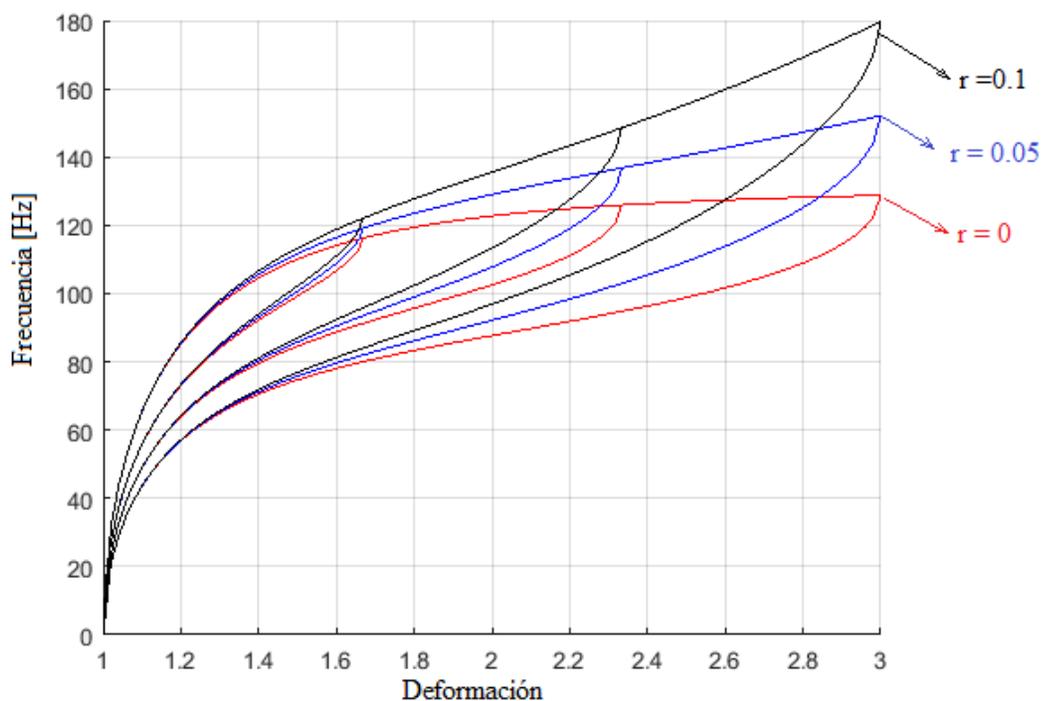


Figura 54. Rango recomendable de r en el modelo de Bio - Material

5.4. Gaussiano – No Gaussiano

Los modelos gaussianos asumen que las cadenas del polímero son largas, de conformaciones no extendidas y unidas en sus extremos. Los no gaussianos consideran cadenas cortas menores a 5 eslabones y no tan flexibles (Billmeyer, 1975). El comportamiento de los elastómeros dejara de ser gaussiano a grandes deformaciones, debido a que las cadenas pueden adoptar menos conformaciones. En este estado, se necesita mayor fuerza para producir continuar estirando al material; esto refleja en el gráfico un aumento de pendiente que se observa con facilidad en los modelos no gaussianos figura 55 y figura 56.

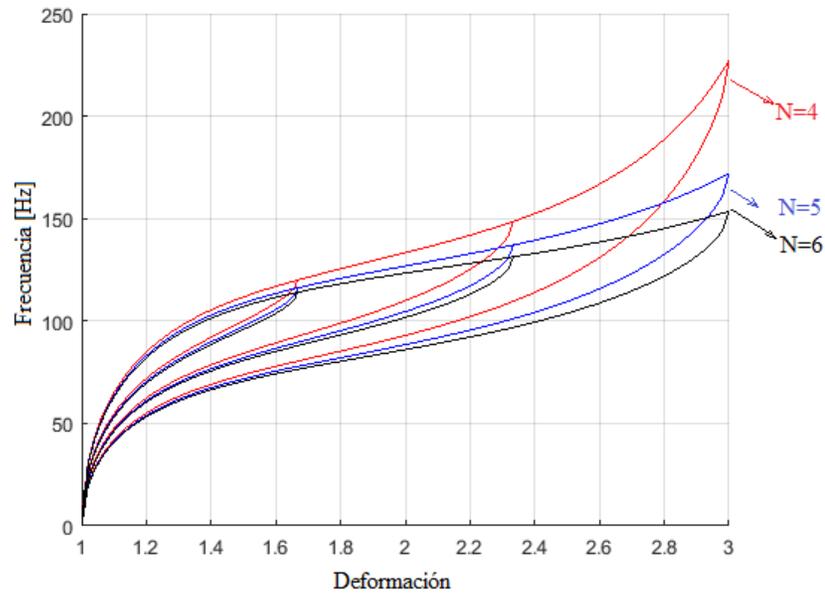


Figura 55. Variación del parámetro N de ajuste para Full Network

Se puede observar el cambio de pendiente descrito es más considerable cuando $N > 5$. Este cambio que representa una mayor frecuencia de vibración, está relacionado con el aumento de tensión debido a que son directamente proporcionales acorde a la relación de Taylor.

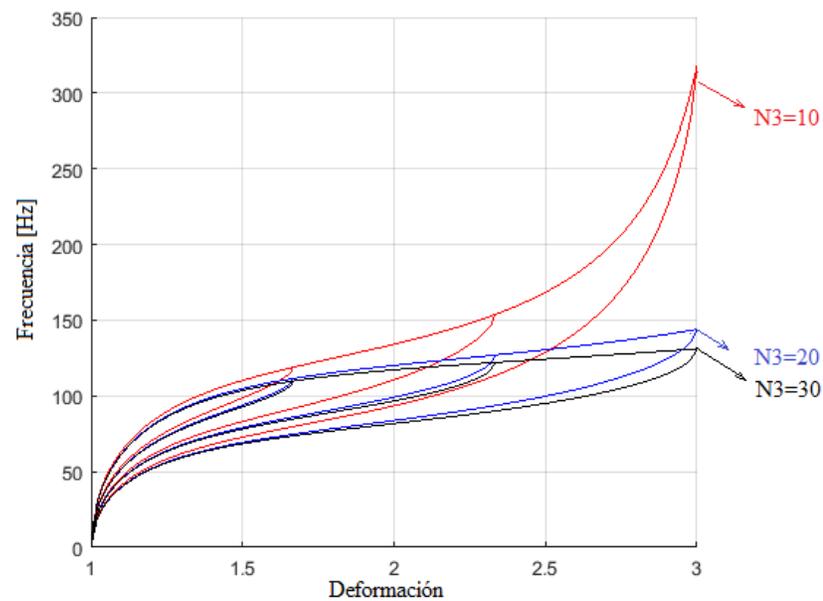


Figura 56. Variación del parámetro N3 de ajuste para James – Guth

En la figura 56 se puede observar un comportamiento similar a Full Network, pero el cambio de pendiente es más considerable cuando N_3 es menor a 20 lo cual, acorde a (Elías-Zúñiga, 2013) la relación entre N y N_3 es cercana a 1:3 donde N representa el número de eslabones en la cadena del polímero y N_3 en número de eslabones de tres cadenas idénticas orientadas a tres ejes ortogonales entre sí. En los valores ajustados para los datos experimentales (tabla 16, tabla 17 y tabla 18), se puede ver esta tendencia con mayor claridad en al menos dos de cada tres ensayos.

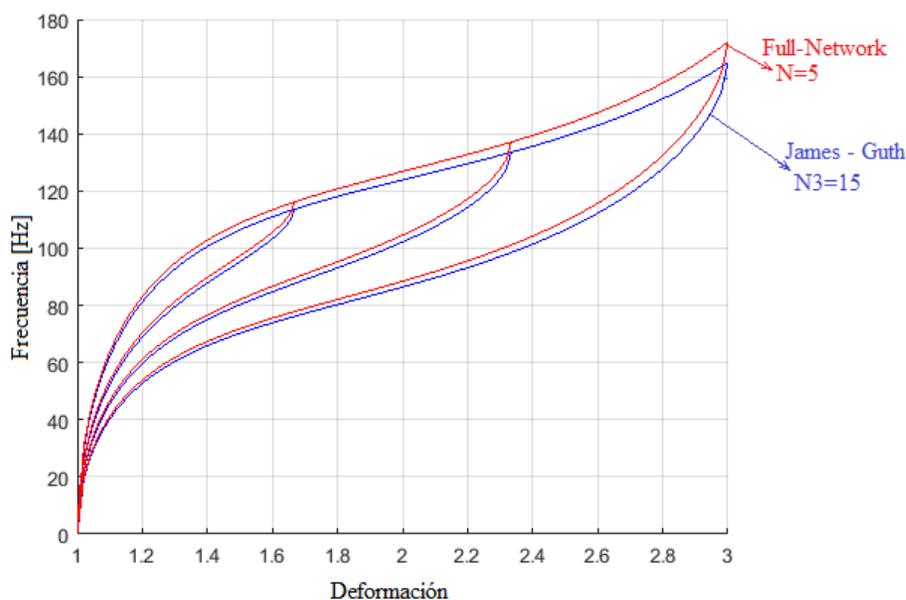


Figura 57. Comparación entre modelos Full Network y James Guth

Influencia del método en los datos experimentales

Si la pretensión inicial influye directamente en los datos medidos, se comparó datos obtenidos de ensayos donde se controló la tensión inicial y donde el cordón tuvo una pretensión mayor

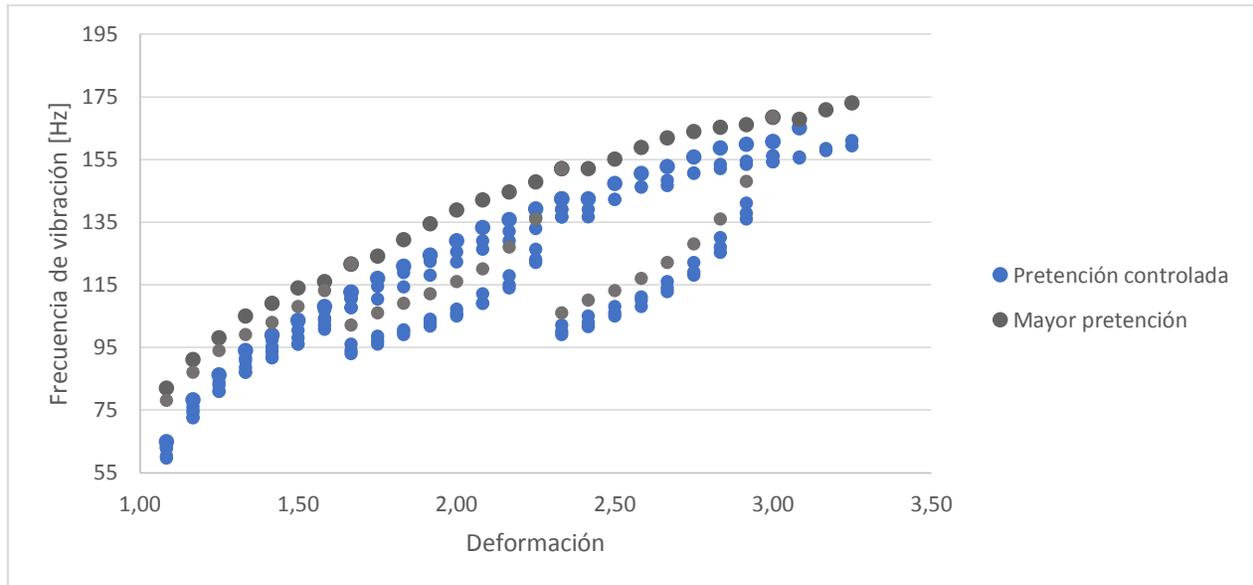


Figura 58. Efecto de la pretensión en los cordones de 1.75%

Se observa en la figura 58 que los datos donde la tensión inicial fue mayor, tienen un desfase en el sentido positivo del eje de frecuencia, afectando tanto a datos de carga como a datos de descarga.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS FINANCIERO

El siguiente capítulo trata los costos dispuestos para la presente tesis; al tratarse de un proyecto investigativo cuyo equipo y resultados serán para bien y uso de la Universidad de las Fuerzas Armadas, no es necesario realizar un análisis económico – financiero. Se toma en cuenta los costos directos e indirectos de acuerdo a las tablas indicadas posteriormente.

6.1. Costos Directos

Como costos directos se asume todos aquellos dispositivos, componentes y materiales usados para la fabricación del banco de pruebas y moldes para probetas, así como también la silicona ensayada.

Tabla 19
Dispositivos y Componentes Varios

DESCRIPCIÓN	PRECIO (\$)	CANT. (U)	TOTAL (\$)
Contador de Frecuencia	438,18	1	438,18
Plataforma Niveladora	22,79	1	22,79
Engrane trapezoidal métrico	75,00	1	75,00
Tuerca trapezoidal métrica	12,50	2	25,00
Regla metálica 1m	12,00	1	12,00
Silicona - Catalizador	30,00		30,00
Total			602,97

Tabla 20
Componentes Eléctricos

DESCRIPCIÓN	PRECIO (\$)	CANT. (U)	TOTAL (\$)
Detector de Láser	23,17	1	23,17
Controlador motor a pasos	15,00	1	15,00
Sensor	8,00	1	8,00
Láser	2,00	1	2,00
Integrado	2,00	1	2,00
Resistencias	2,00	Varios	2,00
Motor DC	7,00	1	7,00
Motor a Pasos	44,99	1	44,99
Total			104,16

Tabla 21
Materiales

DESCRIPCIÓN	PRECIO (\$)	CANT. (U)	TOTAL (\$)
Bronce L= 15cm, D=5cm	23,00	1	23,00
Grilon Plancha (varias medidas)	83,68	1	83,68
Planchas de Acero A36, 250 x 110 x 20 mm	9,00	3	27,00
Ejes de Acero 1045 d=1/2", L=1300mm	3,25	2	6,50
Acrílico azul 30 x 30 cm	7,00	1	7,00
Eje de Duralon negro d=75mm, L=55mm	3,00	1	3,00
Tabla de Madera 1400 x 400 x15 mm	10,00	1	10,00
Rodamiento 6205	2,08	1	2,08
Rodamiento 60022R	1,14	2	2,28
Seguro Interior 32mm	0,85	2	1,70
Seguro Interior 52mm	1,94	2	3,88
Pasadores	0,54	4	2,16
Rodela Plana 1/4"	0,02	6	0,12
Pernos	~	~	1,20
Tuercas	~	~	1,23
Brocas	~	~	5,33
Total			180,17

Tabla 22*Total Costos Directos*

DESCRIPCIÓN	TOTAL (\$)
Dispositivos y Componentes Varios	602,97
Componentes Eléctricos	104,16
Materiales	180,17
Total	887,30

6.2. Costos Indirectos

Como costos indirectos se asume al costo por uso de laboratorios de la universidad, servicios básicos (luz), transporte, impresiones y el tiempo invertido.

Tabla 23*Uso de Laboratorios*

DESCRIPCIÓN	PRECIO DIARIO (\$)	DIAS	TOTAL (\$)
Lab. de Procesos de Manufactura	5,00	130	650
Lab. de Mecánica de Fluidos	5,00	20	100
Lab. de Mecánica de Materiales	5,00	5	25
Lab. de Resistencia de Materiales (Civil)	5,00	3	15
Lab. de Ciencia de Materiales	5,00	30	150
Total			940

Tabla 24*Varios*

DESCRIPCIÓN	PRECIO (\$)	CANTIDAD	MESES	TOTAL (\$)
Mano de Obra	400,00	2	9	7200
Luz	30,	1	9	270
Transporte	15,00	2	9	270
Impresiones	30,00	1	1	30
Total				7770

6.3. Costos Totales

Tabla 25*Total Costos del Proyecto*

DESCRIPCIÓN	TOTAL (\$)
Costos Directos	887,30
C.I. Uso de Laboratorios	940
C.I. Varios	7770
Total	9597,3

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La comparación de resultados determinó que los modelos gaussianos de Bio – Material y Gent así como los no gaussianos James - Guth y Full – Network tienen buenas aproximaciones a los datos experimentales cuando su deformación es mayor a dos veces su longitud inicial, puesto que tuvieron menores índices de diferencia y al acercarse a ese valor las curvas de carga se intersecan. Hay que comentar también que en la mayoría de ensayos, los valores de los parámetros N_3 y N de James - Guth y Full – Network superaron cifras de 15 y 5 respectivamente, lo que en teoría indica que las cadenas de elastómero no se consideran totalmente cortas, lo cual es propio de un comportamiento gaussiano, pero destaca la versatilidad de modelar ambos casos.

Se implementó un mecanismo de movimiento por tornillo roscado a dos extremos para generar el desplazamiento longitudinal, accionado manualmente por una perilla en un extremo y mediante un motor a pasos Nema 23 colocado en el otro; el motor es controlado por Arduino y programado para permitir una mínima distancia de desplazamiento de 1 milímetro. La disposición de los componentes de la bancada permite que el láser y el receptor siempre realicen la medida en la mitad del cordón debido a que las partes móviles se juntan o separan dependiendo del sentido de giro. El método de sujeción es por tenazas intercambiables realizadas de dos materiales suaves (Grilon y Acrílico) y montadas en los soportes móviles.

Se fabricó moldes para cordones de 3 milímetros de diámetro y 25 cm de largo; para la mezcla de la silicona RTV2 se toma en consideración porcentajes en peso al 1.5, 1.75 y 2 de catalizador, de los cuales se determinó la deformación máxima mediante ensayos, concluyendo que el

porcentaje de catalizador es inversamente proporcional a la distancia de rotura de los cordones; esto debido a que la silicona se torna más rígida y como consecuencia, también aumenta su frecuencia de vibración.

Se realizó ensayos para determinar parámetros como la densidad (determinación del peso y volumen), el módulo de cizalla (ensayo de tracción), coeficiente b de ablandamiento del esfuerzo (ensayo uniaxial de carga y descarga) que intervienen en el modelamiento matemático y se verificó que existen cambios en las propiedades del material en función del porcentaje de catalizador.

Se estudió el Efecto Mullins en la vibración de los cordones durante los ciclos de carga y descarga, donde se observó que una probeta de longitud inicial L_0 que es estirada a una longitud L_n (siendo $n = 1, 2, 3$ y $L_1 < L_2 < L_3 < \dots < L_n$) tiene una frecuencia $v_{n\text{-carga}}$ respectiva, siendo v_n directamente proporcional a L_n . Para todas las distancias menores a L_n existe una reducción de su frecuencia respecto a su $v_{n\text{-carga}}$ inicial, tal y como indican los gráficos del ANEXO E3.

Se realizó cinco mediciones de frecuencia en cada punto de deformación, tanto en carga como en descarga, se observó que la frecuencia de vibración tiene menor variación cuando el material es descargado a diferencia de la frecuencia de carga que se estabiliza después de realizar algunas mediciones; se trabajó con los promedios para ajustar los modelos matemáticos mediante un script de Matlab®, que calcula la diferencia de los datos experimentales respecto a los datos teóricos. Cada modelo tiene un parámetro de ajuste para determinar la relación que tuvo menor diferencia; se implementó una interfaz gráfica que facilitó el ingreso de las variables de entrada y constantes relacionadas con la geometría y características físicas del material.

El presente estudio abre las puertas a trabajos futuros para el modelamiento y simulación del comportamiento de nuevos elastómeros como los reforzados con nanotubos de carbono o nanopartículas.

6.4. Recomendaciones y Trabajos Futuros

Un banco de pruebas es el medio que ayuda a que los ensayos estén correctamente realizados, al tratarse de una máquina relativamente larga se debe tener en consideración el pandeo provocado por el movimiento de las pinzas, por lo que la posición de los agujeros de las guías de ayuda debe ser concéntricos entre ellos para que la desalineación no provoque una fuerza adicional a las consideradas para la selección del motor. El fomix colocado en las pinzas evita que exista filos cortantes y dañe al material, evitando resultados no deseados.

Un resultado exitoso depende de la buena elaboración del material, para la silicona es de suma importancia ser lo más exactos posibles en medir y adicionar el porcentaje de catalizador requerido, por lo que se recomienda realizar la mezcla en una balanza de exactitud; de igual forma se debe cuidar el método de mezcla debido a que una agitación rápida origina una gran cantidad de burbujas. Los moldes influyen directamente en el acabado de los cordones por lo que deben ser construidos con precisión y un buen acabado superficial que facilite el desmoldeo y evite imperfecciones.

Para la realización de los ensayos es recomendable poner marcas de control en los cordones, esto ayuda a verificar que el material no resbale provocando errores en la toma de datos. Para los ensayos de carga y descarga es muy importante comprobar que la tensión inicial del material virgen sin deformar sea aproximadamente la misma para todos los cordones esto ayuda en la repetibilidad de los ensayos, tomar en cuenta que si en un ensayo de carga y descarga el desplazamiento fue diferente en alguno de los tramos del cordón (mayor), las condiciones del ensayo cambian y se debe analizar ese cordón de manera particular.

Para realizar el desplazamiento entre puntos de toma de datos, es prioritario que la velocidad de movimiento sea baja. Previo a la medición de frecuencia, es recomendable esperar un tiempo entre 1 y 2 minutos para que la medición sea más estable, debido a que existen esfuerzos residuales por el movimiento de las cadenas de polímero.

Es recomendable que los ensayos de tracción se realicen con el mínimo de probetas indicadas en la norma ASTM D638, el cual sugiere un mínimo de 5 ensayos para que los datos sean confiables.

Bibliografía

- Abaqus-docs*. (n.d.). Retrieved from Mullins effect : <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-mullins.htm>
- Askeland, D. R. (2003). *The science and engineering of materials*. Monterey: Thomson Learning.
- ASTM Internacional. (2015). ASTM D638 – 14. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. United States: ASTM International.
- Beatty, M. F. (2003). An Average-Stretch Full-Network Model for. *Journal of Elasticity* 70.
- Beatty, M. F., & Chow, A. C. (1983). On the transverse vibration of a rubber string. *Journal of Elasticity*.
- Billmeyer, F. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Reverté.
- Boczkowska, A., & Awietjan, S. (2012). Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers. *IntechOpen*.
- Bouasse, H., & Carrière, Z. (1903). Sur les courbes de traction du caoutchouc vulcanisé. *Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse*.
- Brown, R. (2006). *Physical testing of rubber*. New York: Springer Science & Business Media.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F: Mc Graw Hill.
- Coreño Alonso, J., & Méndez Bautista, M. T. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Profesores al día [polímeros]*.

- Drechsel, J. S. (2007). Characterization of synthetic, self-oscillating vocal fold models. *Brigham Young Univ.*
- Elías-Zúñiga, A. &. (2003). Stress-softening effects in the transverse vibration of a non-Gaussian rubber string. *Meccanica*, 419-433.
- Elías-Zúñiga, A. B.-R. (2013). A nonmonotonous damage model to characterize mullins and residual strain effects of rubber strings subjected to transverse vibrations. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Fraunhofer-Gesellschaft. (2012, Junio 4). *Artificial muscle as shock absorber*. Retrieved from Phys.org: <https://phys.org/news/2012-06-artificial-muscle-absorber.html>
- Fung, Y. (1967). Elasticity of soft tissues in simple extension. *Am. J. Physiol.*
- García Diez, S. (2006). La tecnología de los elastómeros rtv (vulcanización a temperatura ambiente) y su aplicación en la escultura. *Revista Iberoamericana de Polímeros*.
- Gent, A. N. (2005). *Rubber Elasticity: Basic Concepts and Behavior*. Akron, Ohio: The University of Akron.
- González Carbonell, R., Álvarez García, E., Moya Rodríguez, J. L., & Abreu González, K. (2009). Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF. *Ingeniería Mecánica, Vol. 12. No.3*, 57-66.
- Grijota, L. A. (2006). *Simulación por elementos finitos de efectos inelásticos en materiales elastómeros*. España: Universidad de Zaragoza.

- Johnson, M. A. (1993). The Mullins effect in uniaxial extension and its influence on the transverse vibration of a rubber string. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 83-115.
- Johnson, M. A. (1995). The Mullins effect in equibiaxial extension and its influence on the inflation of a balloon. *International Journal of Engineering Science*, 223-245.
- Juárez Varón, D., Ferrándiz Bou, S., & Balart Gimeno, R. (2015). *Análisis del estado del arte de elastómeros termoplásticos y mejora del confort térmico para el sector de ortopedia del pie y puericultura ligera*. Alcoy: Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Área de Innovación y Desarrollo, S.L.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson Educación.
- Kim, B., Beom Lee, S., Lee, J., Cho, S., Park, H. P., Yeom, S., & Park, S. H. (2012). A Comparison Among Neo-Hookean Model, Mooney-Rivlin Model, and Ogden Model for Chloroprene Rubber. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*.
- losadhesivos.com. (n.d.). *La web de los adhesivos*. Retrieved from Elásticos:
<https://www.losadhesivos.com/elastomero.html>
- Matsuura, K., & Naruse, K. (2012). Use of Silicone Elastomer-Based Microfluidic Devices and Systems in Reproductive Technologies . *IntechOpen*.
- Mooney, M. (1940). A theory of large elastic deformation. *Journal of applied physics*, 582-592.

- Netzsch. (n.d.). *Netzsch*. Retrieved from <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/es/industrias-sectores/glossary/mullins-effect/>
- Ogden, R. W., & Roxburgh, D. G. (1999). A Pseudo-Elastic Model for the Mullins Effect in Filled Rubber. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, vol. 455.
- Pucci, E. &. (2002). A note on the Gent model for rubber-like materials. *Rubber chemistry and technology*, 839-852.
- Ramis, J., Alba, J., Rey, R. d., Escuder, E., & Sanchís, V. J. (2010). New absorbent material acoustic based on kenaf's fibre. *Materiales de Construcción*.
- Riera, M. D.-S. (2006). Modelización y simulación del comportamiento mecánico de materiales elastoméricos. *Abaquselastomeros*.
- Sperling, L. (2006). *Introduction to Physical Polymer Science*. New Jersey: Wiley Interscience.
- The MathWorks, Inc. (n.d.). *MathWorks*. Retrieved from MATLAB:
<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Wolf, A. T., & Descamps, P. (2003). Determination of Poisson's Ratio of Silicone Sealants from Ultrasonic and Tensile Measurements. *ASTM International*.
- Yang, S. (., & Jiang, K. (2012). Elastomer Application in Microsystem and Microfluidics. *IntechOpen*.
- Zhao, D. L. (2017). Transverse vibration of nematic elastomer Timoshenko beams. *Physical Review*.

Zúñiga, A. E. (2006). Caracterización del ablandamiento de los elastómeros cuando son sometidos a esfuerzos biaxiales. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*.

Zuñiga, A., & Beatty, M. F. (2002). A new phenomenological model for stress-softening. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*.