



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Efecto de la rigidez de la punta de impacto en la
relación de amortiguamiento

presentada por

Ing. Adán Castro Miranda

como requisito para la obtención del grado
de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. Eladio Martínez Rayón

Codirector de tesis

Dr. Dariusz Szwedowicz Wasik



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos, **16/enero/2020**

OFICIO No. SAC/019/2020
Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. ADÁN CASTRO MIRANDA
CANDIDATO (A) AL GRADO DE MAESTRO(A) EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "*Efecto de la rigidez de la punta de impacto en la relación de amortiguamiento*", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente.

GVGR/chg



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Mor., **15/enero/2020**

OFICIO No. DIM/010/2020
Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Adán Castro Miranda con número de control MI7CE073 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Efecto de la rigidez de la punta de impacto en la relación de amortiguamiento" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Eladio Martínez Rayón
Director de tesis

Dr. Dariusz Sławomir Szwedowicz
Codirector de Tesis

Dr. Andrés Blanco Ortega
Revisor 1

Dra. Claudia Cortés García
Revisor 2

Dr. Quirino Estrada Barbosa
Revisor 3

C.c.p. M. E. Guadalupe Garrido Rivera Depto. Servicios Escolares.
Expediente /
Ing. Adán Castro Miranda Estudiante
Iniciales ABO/mrsr

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490Cuernavaca, Morelos.

Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 1421, e-mail: dim@cenidet.edu.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx

Agradecimientos

Al Consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado en cuanto a lo económico, para la realización de mis estudios de maestría

A mis padres y hermanos: Quienes siempre han estado apoyándome incondicionalmente en mis estudios y en todas las metas propuestas en mi vida.

A mis directores: Dr. Eladio Martínez Rayón y Dr. Dariusz Slawomir Szwedowicz Wasik, por sus aportaciones en la realización de este trabajo de investigación, sus contribuciones en mi formación académica y su paciencia para con mi persona.

Al comité revisor de tesis: Dra. Claudia Cortés García, Dr. Andrés Blanco Ortega y Dr. Quirino Estrada Barbosa, por el espacio proporcionado, sus contribuciones y correcciones muy valiosas en este trabajo de investigación.

A las personas del área administrativa, especialmente a Doña Roció Salazar Ruiz por los consejos y regaños durante mi estancia de maestría en este centro.

A mis compañeros, que también pusieron su granito de arena, gracias por el apoyo brindado en este trabajo de investigación.

.

Resumen

Las cargas súbitas o repentinas se caracterizan por su peligrosidad, al poner fácilmente en falla las estructuras y/o la incertidumbre en la exactitud del movimiento en mecanismos. En el presente trabajo de investigación se analiza la respuesta al impacto en materiales polímeros elastómeros, específicamente utilizados como puntas en los topes de impacto. También se analiza las propiedades mecánicas de los mismos, proponiendo diferentes formas geométricas del material ensayado.

Se utilizaron diferentes pruebas experimentales cuasi-estáticas y dinámicas para obtener la caracterización del material a través de la reología del mismo. Los valores paramétricos resultantes fueron la base de esta metodología. Mismos que se acondicionaron al método de Runge Kutta de cuarto orden; se resolvió el sistema de ecuaciones de forma numérica en Matlab y se compararon resultados entre este y los obtenidos experimentalmente.

En cuanto a las propiedades de los materiales analizados, los especímenes de Silicón-Neopreno y poliuretano presentaron un comportamiento viable en cuanto a la disipación de energía, con un 97% y un 51% comparado con el material uno que disipó un 4%. Los comportamientos en la reología del material son: parámetros viscosos y elásticos, se mantienen constantes en el modelo Kelvin-Voig; en el modelo de Maxwell los parámetros se incrementan un 5% en su viscosidad, mientras que en la rigidez hay un incremento del 9% y hasta en un 200% en el poliuretano, esto sucede para los dos volúmenes analizados.

De la diferencia de resultados experimentales cuasi-estáticos y numéricos, se registraron los valores de RMS o media cuadrática, con los cuales se observaron errores de un 4% comprendidos en los diferentes materiales, además de que fueron muy cercanos a cero, mismos datos son aceptables dentro del sistema. Dinámicamente el comportamiento del material es el siguiente: de forma teórica, se calculó la energía disipada; en el espécimen uno fue de 27%, el silicón de 30% y el poliuretano con un 38%, con lo que se observó que el error con los datos experimentales sigue siendo manejable. El decremento logarítmico obtenido teóricamente apunta que el mejor material en amortiguar las oscilaciones es el Silicón- Neopreno, esto confirma que la metodología implementada en esta investigación es satisfactoria para análisis similares.

Abstrac

Abrupt loads are characterized by their danger, by easily putting in failure structures and / or uncertainty in the accuracy of movement in mechanisms. In this research work it is analyzed the impact response on elastomeric polymer materials, specifically used as tips on impact stops, energy dissipation and mechanical properties thereof, assuming different geometric shapes of the material tested.

The different quasi-static and dynamic experimental tests were used to obtain the characterization of the material through its rheology. The resulting parametric values were the basis of this methodology. The parametric values were conditioned to the fourth order Runge Kutta method; the system of equations was solved numerically in Matlab and were compared between this and those obtained experimentally, to reach accurate conclusions.

Regarding the properties of the materials analyzed, the Silicone-Neoprene and polyurethane specimens showed a much better performance in terms of energy dissipation, with 97% and 51% compared to the number one that dissipated 4%. The behaviors in the rheology of the material are: viscous and elastic parameters remain constant in the Kelvin-Voig model; in the Maxwell model the parameters have a 5% increase in viscosity, while in the rigidity there is an increase of 9% and up to 200% in the polyurethane, this happens for the two volumes analyzed.

From the difference in quasi-static and numerical experimental results, the RMS or quadratic mean values were recorded, with which 4% errors included in the different materials were observed, in addition to being very close to zero, same data are acceptable within the system. Dynamically the behavior of the material is as follows: theoretically, the dissipated energy is calculated; the number one it is 27%, the silicone 30% and the polyurethane with 38%, which shows that the error with the experimental data is still manageable. The logarithmic decrease theoretically obtained indicates that the best material in damping oscillations is silicone-neoprene, this confirms that the methodology implemented in this research is feasible for similar analyzes.

Tabla de contenido

Capítulo 1	Introducción	1
Capítulo 2	Estado del arte	3
2. 1 Breve reseña.....		3
2. 2 Antecedentes.....		3
2.3 Trabajos realizados		5
2.4 Conclusión del estado del arte.....		9
2.5 Objetivos		9
2.6 Alcances y limitaciones		10
Capítulo 3	Marco teorico	11
3.1 Clasificación de los polímeros		11
3.1.1 Termoplásticos.....		11
3.1.2 Termoestables		12
3.1.3 Elastómeros.....		12
3.2 Modelo de Maxwell.....		12
3.2.1 Comportamiento a Fluencia		13
3.2.2 Comportamiento a relajación		14
3.2.3 Comportamiento de recuperación		14
3.3. Modelo de Kelvin-Voigt.....		15
3.3.1 Comportamiento a Fluencia		15
3.3.2 Comportamiento a relajación		16
3.3.3 Comportamiento a recuperación.....		16
3.4 Principio de superposición de Boltzmann		17
3.5 Modelos avanzados de viscoelásticidad		18
3.6 Conservación de energía y cantidad de movimiento o impulso		19
3.7 Frecuencia natural y curvas de histéresis.....		21
3.8 Decremento logarítmico		22
3.9 Péndulo simple.....		24
3.10 Péndulo Charpy modificado		25
3.11 Energía disipada y parámetros involucrados.....		25
3.12 Velocidades dinámicas involucradas en un péndulo Charpy		27
3.13 Impulso normal del impacto		31
3.14 Fuerza de impacto.....		32

3.15 Media cuadrática o RMS	33	
Capítulo 4	Metodología	35
4.1 Introducción al capítulo	35	
4.2 Modelo para la caracterización cuasi-estática	35	
4.3 Metodología cuasi-estática.....	37	
4.4 Metodología para análisis numéricos (<i>Runge Kutta</i>).....	39	
4.5 Decremento logarítmico en Matlab	46	
4.6 Método de newton-Rapshon.....	47	
4.7 Pruebas dinámicas a impacto	49	
4.8 Banco para pruebas y señales dinámicas.....	49	
4.9 Metodología experimental dinámica	52	
4.10 Metodología para resultados dinámicos	54	
4.11 Comparación de la fuerza de impacto en Matlab	56	
Capítulo 5	Resultados	58
5.1 Gráficos de pruebas experimentales dinámicas.....	58	
5.2 Datos de pruebas dinámicas	63	
5.3 Datos experimentales en la máquina universal a tensión compresión con ciclos marca <i>Shimadzu</i>	66	
5.4 Parámetros obtenidos a partir de modelos reológicos	70	
5.5 Gráficos obtenidos numéricamente (<i>Runge- Kutta</i>)	71	
Capítulo 6	Discusion de resultados	76
6.1 Energía cuasi-estática a histéresis	76	
6.2 Parámetros con valores reologicos	77	
6.3 Comportamiento del material en <i>Runge-Kutta</i>	79	
6.4 Comportamiento dinámico a impacto.....	80	
6.5 Amortiguamiento en los materiales	81	
Capítulo 7	Conclusiones y recomendaciones	84
7.1 Conclusiones de análisis cuasi-estáticos	84	
7.2 Conclusiones de análisis dinámicos	85	
7.3 Recomendaciones.....	86	
Referencias	87	
Anexos	91	

Índice de Figuras

Figura 1. Prototipo de tope de impacto. (Romero, 2006).	3
Figura 2. Prototipo de tope de impacto, aros cónicos. (Martínez, 2015).	4
Figura 3. Diferencias de alturas en ensayos. (Askeland, 1998).	6
Figura 4. Respuesta del material viscoelástico sometido a un estado tensional. (Rodríguez, 2013).	13
Figura 5. Se presenta una respuesta inicial de deformación debido a elemento resorte y una respuesta inicial debido al elemento viscoso. (Balart, 2007).	14
Figura 6. Representación del modelo en paralelo de Kevin-Voigt. (Rodríguez, 2013).	15
Figura 7. En este caso hay una relajación de tipo exponencial decreciente (Balart, 2007).	17
Figura 8. Al graficar las tensiones en función del tiempo por separado (azul y rojo) y al englobarlas en una sola grafica (verde). (Balart, 2007).	18
Figura 9. Para este caso al graficar las deformaciones en función del tiempo por separado (azul y violeta) y al englobarlas en una sola grafica (amarillo). (Balart, 2007).	18
Figura 10. Combinación de modelos básicos (Maxwell y Kevin-Voigt y/o Burgers).	19
Figura 11. El gráfico verde indica la respuesta de deformación real de los materiales viscoelásticos, el de color azul la respuesta al combinar Maxwell y Kevin-Voigt. Balart (2013).	19
Figura 12. Representación del impacto. (Serge, 2011).	20
Figura 13. Bucle de histéresis para materiales elásticos. (Rao, 1990).	22
Figura 14. Caída de oscilación medida por decremento logarítmico, (Thomson, 1982).	23
Figura 15. Péndulo simple.	24
Figura 16. Péndulo Charpy modificado (Espino, 2004).	25
Figura 17. Péndulo antes del impacto.	26
Figura 18. Representación antes y después del impacto.	27
Figura 19. Posición inicial del péndulo de impacto.	28
Figura 20. Diagrama antes del impacto.	30
Figura 21. Diagrama después del impacto.	30
Figura 22. Representación impulsiva del impacto	32
Figura 23. Representación de iteraciones Newton-Rapshon.	34
Figura 24. Combinación de modelos (Maxwell y Kevin-Voigt, y/o burgers).	36
Figura 25. Espécimen ensayado.	37
Figura 26. Sistema masa-resorte-amortiguador. (Tomado de S. Nakamura)	40
Figura 27. Sistema masa-resorte-amortiguador adaptado.	41
Figura 28. Diagrama de flujo para la resolución numérica en MATLAB.	45
Figura 29. Diagrama de flujo para la resolución numérica de decremento logarítmico en MATLAB.	46
Figura 30. Diagrama de flujo para la resolución numérica de raíces en MATLAB.	48
Figura 31. Sensor de fuerza.	50
Figura 32. Adquisidor de datos NI PXI 1031.	50
Figura 33. Amplificador de señales Kistler 5010.	51
Figura 34. Amplificador "Kistler LabAmp", Type 5165A SN 4981779	51
Figura 35. Diagrama de conexión (Hernández, 2019).	52
Figura 36. Soporte, a) Diseño de soporte metálico, b) Fotografía de soporte.	53
Figura 37. Montaje	53

<i>Figura 38. a) Péndulo antes de impactar, b) Péndulo al momento del impactar.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 39. Posición angular de los rebotes del péndulo.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 40. Duración del tiempo de impacto.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 41. Diagrama de flujo para la fuerza de impacto en MATLAB.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 42. Posición angular para 16°. a) espécimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 43. Posición angular para 22°. a) espécimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 44. Fuerza de impacto para 16°. a) Especimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 45. Fuerza de impacto para 22°. a) Especimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 46. Fuerza de impacto a) Decremento de impacto b) decremento en barra azul de impacto.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 47. Fuerza vs deformación a ciclos. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 48. Tension vs porcentaje de deformación a ciclos. a) volumen uno, b) volumen dos.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 49. Fuerza vs Deformación a ciclos. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 50. Tension vs Porcentaje de Deformación a ciclos. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 51. Fuerza vs Deformación a ciclos. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 52. Tension vs porcentaje de deformación a ciclos. a) volumen uno, b) volumen dos.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 53. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número uno, a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 54. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número dos, a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 55. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número tres, a) volumen uno. b) volumen dos</i>	<i>74</i>
<i>Figura 56. Gráfico que representa el coeficiente de correlación en pruebas numéricas.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 57. Gráfico que representa el coeficiente de correlación en pruebas experimentales.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 58. Comparación de los ciclos de histéresis.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 59. Energía disipada en cada material. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 60. Valores paramétricos. a) volumen uno. b) volumen dos.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 61. Diferencia entre datos experimentales y numéricos, a) Datos experimentales, b) Datos numéricos.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 62. Diferencia y obtención de RMS entre datos experimentales y numéricos.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 63. Diferencia entre diferentes ángulos de impacto.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 64. Diferencia entre: a) Decremento logarítmico, b) Amplitud de ciclos</i>	<i>82</i>
<i>Figura 65. Representación de la caída del amortiguamiento.</i>	<i>83</i>

Simbología

σ	Tensión
ξ	Constante elástica
η	Constante viscosa
ε	Deformación
e	Exponencial
m_A, m_B	Masas de los cuerpos sometidos a impacto
$v_A, v_B, v'_A, v'_B,$	Velocidades, antes y después de ocurrir el impacto
g	Aceleración de la gravedad
H_0	Altura inicial
H_1	Altura en el primer rebote
C_R	Cociente de restitución
m	Masa del material
K	Rigidez
u	Trabajo realizado por unidad de volumen
x	Amplitud en el eje x
ζ	Razón de amortiguamiento
w_n	Frecuencia Natural
δ	Decremento logarítmico
t	Tiempo
$\ln \frac{x_1}{x_2}$	Amplitud de ciclos
τ_d	Periodo de tiempo
\emptyset	Giro completo
π	Constante Pi
M	Masa del péndulo
L	Longitud del péndulo
θ	Ángulo de giro del péndulo
E_p	Energía potencial de entrada del sistema

m_c	<i>Masa del péndulo</i>
h	<i>Distancia entre impacto y el centro de gravedad</i>
E_d	<i>Energía potencial disipada</i>
E_t	<i>Energía total disipada por el sistema</i>
L	<i>Distancia al punto giro del péndulo</i>
L_r	<i>Centro de gravedad del péndulo</i>
θ_i	<i>Ángulo inicial del péndulo</i>
θ_f	<i>Ángulo final del péndulo</i>
E_c	<i>Energía cinética</i>
ω_i	<i>Velocidad angular del péndulo justo antes del impacto.</i>
I_i	<i>Momento de inercia del péndulo con el punto de giro</i>
e	<i>Coefficiente de restitución</i>
v_s	<i>Velocidad del soporte posterior al impacto</i>
v_1	<i>Velocidad lineal de péndulo antes del impacto</i>
v_2	<i>Velocidad lineal del péndulo posterior al impacto</i>
K_f	<i>Cantidad de movimiento angular final</i>
K_i	<i>Cantidad de movimiento angular inicial</i>
r_g	<i>Ubicación del centro de gravedad del péndulo</i>
l_g	<i>Momento de inercia del péndulo y centro de gravedad</i>
m_s	<i>Masa del soporte metálico</i>
P_N	<i>Impulso normal de impacto</i>
F_i	<i>Fuerza aplicada al impacto</i>
t_1	<i>Tiempo inicial del impacto</i>
m_e	<i>Masa equivalente</i>
x_N^2	<i>Número de datos al cuadrado.</i>

Índice de tablas

Tabla 1. Características de los especímenes volumen uno.....	38
Tabla 2. Características de los especímenes volumen dos.....	38
Tabla 3. Datos obtenidos experimentalmente para la caracterización, volumen uno.....	38
Tabla 4. Datos obtenidos experimentalmente para la caracterización, volumen dos.....	39
Tabla 5. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número uno, volumen uno.	42
Tabla 6. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número dos, volumen uno.....	42
Tabla 7. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número tres, volumen uno.....	42
Tabla 8. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número uno, volumen dos.....	42
Tabla 9. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número dos, volumen dos.....	43
Tabla 10. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen número tres, volumen dos.....	43
Tabla 11. Datos de las muestras a 16° volumen uno.....	64
Tabla 12. Datos de las muestras a 16° volumen dos.....	64
Tabla 13. Datos de las muestras a 18° volumen uno.....	64
Tabla 14. Datos de las muestras a 18° volumen dos.....	64
Tabla 15. Datos de las muestras a 20° volumen uno.....	65
Tabla 16. Datos de las muestras a 20° volumen dos.....	65
Tabla 17. Datos de las muestras a 22° volumen uno.....	65
Tabla 18. Datos de las muestras a 22° volumen dos.....	65
Tabla 19. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número uno, volumen uno.....	70
Tabla 20. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número uno, volumen dos.....	70
Tabla 21. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número dos, volumen uno.....	71
Tabla 22. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número dos, volumen dos.....	71
Tabla 23. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número tres, volumen uno.....	71
Tabla 24. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen número tres, volumen dos.....	71
Tabla 25. Decremento logarítmico.....	81

Capítulo 1

Introducción

Los impactos y choques son casos típicos de excitaciones cotidianos que inducen a vibraciones forzadas no periódicas. Estos normalmente se caracterizan por su aplicación repentina, tener una alta severidad y ser de corta duración. Las vibraciones resultantes por impactos son causadas por diferentes fuentes, por ejemplo, prensas, troqueladoras, el badajo de una campana, automóviles circulando por topes, entre otros.

El ingeniero encargado de la eficiencia en la máquina, hace prevenciones respecto al impacto en estructuras y mecanismos, para reducir o evitar por completo que estos sean dañados. Por lo anterior, se ponen en práctica las técnicas para tener un control y si es posible evitar esto. Existen dos formas de controlar las vibraciones causadas por impacto: cuando el dispositivo conserva sus propiedades mecánicas, el control es de tipo pasivo, mismo que es económico para ciertos casos; cuando las propiedades que aíslan el impacto pueden ser alteradas en tiempo real y según sea el tipo de impacto que se esté controlando en el dispositivo, se dice que es control activo. En este centro de investigación se ha venido investigando topes de impacto: dispositivos pasivos, absorberdores de cargas súbitas entre diferentes cuerpos, mismos que se han modificado con diferentes materiales, geometrías, y otras características. Con las modificaciones hechas al dispositivo, también se han replanteado los modelos en función, con la finalidad de optimizar el funcionamiento en general.

Las variables que se desean analizar de forma especial son: valores obtenidos de pruebas a compresión cuasi-estática, tiempo vs deformación y la fuerza máxima de impacto vs ángulos de retorno de impacto. Esto último cómo, se menciona se obtuvo de forma experimental, utilizando un banco de pruebas de impacto tipo Charpy con sensor de fuerzas dinámicas para impacto. Dicha fuerza puede ser grande dependiendo de la posición angular del brazo, logrando así comparar las diferencias que hay en las curvas de histéresis y por lo tanto cuantificar la energía que se disipa en cada polímero elastómero. En concreto se obtienen valores asociados a la capacidad de absorción de energía de impacto, para la elaboración de una metodología que ayude a verificar esta capacidad de absorción con modelos reológicos de materiales viscoelásticos, que se utilizan en puntas de tope de impacto.

Por lo mencionado, se propone analizar de forma experimental, la absorción de energía de materiales poliméricos elastómeros que se utilizan como punta de topes de impacto, para suavizar el cambio de rigidez en el momento de contacto. Se medirá la capacidad de absorción de energía de diferentes materiales y volúmenes respectivamente, y con ello se propone una metodología real que permita verificar lo mencionado. A continuación, el párrafo siguiente da una breve reseña de cómo está constituido este trabajo de investigación, en los siguientes capítulos se aborda el contenido estructural del mismo.

En el capítulo 2 de este documento se presenta el estado del arte, con la literatura necesaria y elaborada con el análisis de los resultados obtenidos. En el capítulo 3 se presenta la teoría necesaria para llevar a cabo la investigación y elaboración de la metodología. En el capítulo 4 se desarrolla la metodología, basándose en resultados experimentales, mismos que se comparan y se analizan. En el capítulo 5, se plasman los resultados obtenidos en pruebas y en la elaboración de la metodología antes mencionada. En el capítulo 6 se analizan y se ponen a discusión los resultados obtenidos. En el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones según lo analizado en este trabajo de investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

2. 1 Breve reseña

Los topes de impacto son dispositivos que se han venido desarrollando e investigando, desde hace algunos años por estudiantes en este centro de investigación (CENIDET). Para lograr que el mismo sea eficiente, se han hecho mejoras y con ellas se han implementado nuevos modelos. En este apartado se mencionan los cambios realizados, desde que se comenzó a trabajar con topes de impacto.

2. 2 Antecedentes

Espino (2004), analizó de forma experimental y numérica la punta de tope de impacto en caucho natural con forma ovalada de dureza 55 Shore A. Comparó los resultados obtenidos tanto de forma experimental como numérica en cuanto a la disipación de energía. En dicho estudio se concluyó que el uso de un caucho disminuye el coeficiente de restitución y recomendó realizar experimentación sobre un material con propiedades geométricas simples (ejemplo: esferas, barras, cubos) para obtener una fuerza de impacto que no sea perturbada por efecto de geometrías complejas (ejemplo: formas de ojivas, formas esféricas, etc.).

Romero (2006), diseñó, construyó y caracterizó un prototipo de tope de impacto por medio de fricción seca regulable, Figura 1. El propósito fue reducir las fuerzas de contacto y el periodo de disipación de energía. En ambas categorías el prototipo superó a los topes convencionales, ya que disipó la misma cantidad de energía en un lapso menor de tiempo y reduce las fuerzas de impacto en relación a los topes metálicos.

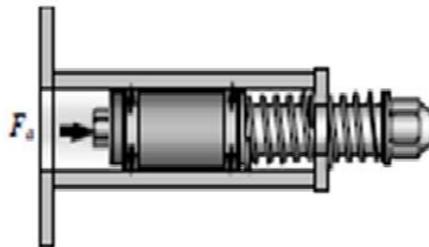


Figura 1. Prototipo de tope de impacto (Romero, 2006).

Jiménez (2008), investigó de forma numérica la respuesta dinámica de un tope de impacto que incluye aros cónicos deformables, como medio para disipar la energía generada en un evento de impacto. De la investigación realizada se concluyó que

los aros cónicos deformables en conjunto con la fricción seca, son una opción viable para ser utilizados como sistema de amortiguamiento y de disipación de la onda de esfuerzos generada por impacto.

Rodríguez (2013), llevó a cabo de forma numérica y experimental el análisis en un elastómero tipo Hytrel 555, con una geometría rectangular sometida a cargas de impacto. Obtuvo un historial de la fuerza de impacto que se muestra a través del tiempo. Esto permitió conocer la fuerza máxima de impacto y su presencia en el tiempo, así como la duración total del impacto. Tales magnitudes fueron de interés para poder adoptar una muestra representativa, que permitió analizar y compararse con resultados numéricos, la fuerza máxima y el tiempo de impacto fue su objetivo.

Martínez (2015), analizó el comportamiento de topes de impacto regulables, que utilizan resortes de paso variable, como dispositivo de restitución para suavizar el cambio de rigidez del sistema, como el que se observa en la Figura 2

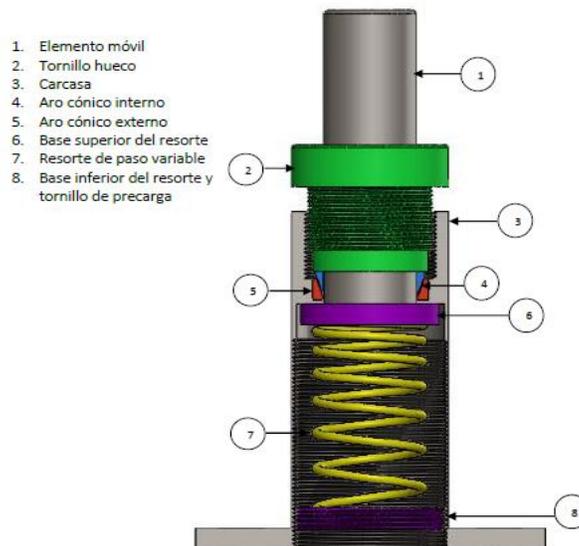


Figura 2. Prototipo de tope de impacto, aros cónicos (Martínez, 2015).

En dicha investigación, Martínez (2015) obtuvo que la implementación de bronce y Nylamid para la configuración de los aros cónicos deformables, contribuye en la disminución de la magnitud de la fuerza de impacto, los límites de precarga están relacionados con la mínima y máxima carrera que el elemento móvil puede desarrollar en función de los aros cónicos utilizados.

2.3 Trabajos realizados

Al ser impactados o colisionar, los objetos pierden su forma original de forma global a causa de las vibraciones o de forma local, específicamente en el punto de contacto. A continuación se presentan investigaciones relacionadas con estos fenómenos, de suma importancia que serán el punto de despegue en esta investigación.

Los topes de impacto se han diseñado en forma empírica desde hace mucho, se le atribuye a Ormondroyed y a Den Hartog la utilización de topes elásticos, como absorbedores de vibración desde 1928, y se ha empleado para el amortiguamiento de álabes de turbinas desde 1931 y en las alas de avión en 1945, (Espino, 2004).

Cuando se habla de impacto se hace alusión a varios contextos, en general representa un fenómeno que es básicamente de muy poca duración. El impacto puede ser definido según Barrientos et al. (2002) como una “transferencia rápida de energía” o “aplicación rápida de fuerza”, donde la palabra “rápida” se refiere a la relación entre el tiempo de impacto y los periodos naturales de vibrar de los cuerpos que impactan.

Shigley (1990), define al impacto como la fuerza externa que se aplica a una estructura o a una parte de ésta, si el intervalo de tiempo en la aplicación de la carga es menor que $1/3$ del mínimo periodo natural de vibración de la pieza o estructura. De esta manera se liga la clasificación de impacto o carga dinámica, al tiempo de aplicación y a las propiedades intrínsecas de rigidez y masa del cuerpo que recibe la carga. Las cargas de impacto, así definidas, tienen efectos vibratorios sobre la estructura, ya que excitan sus frecuencias naturales, como si se aplicaran excitaciones sinusoidales en un alto rango de frecuencias, al mismo tiempo.

En una prueba de impacto Charpy (Askeland, 1998), menciona, “si se conoce la diferencia de la alturas, inicial y final, durante el recorrido del péndulo, se puede conocer la energía disipada de un material”, figura 3.

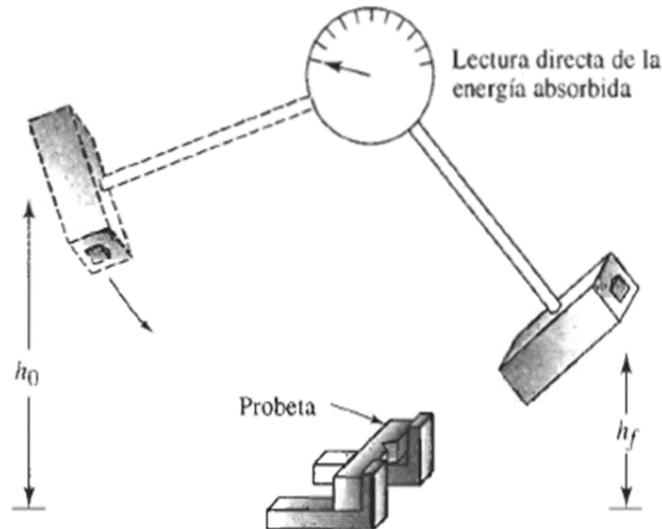


Figura 3. Diferencias de alturas en ensayos (Askeland, 1998).

Ortega (2005), presentó ensayos de impacto en la máquina Charpy, en donde se analizaron didacticamente el comportamiento de algunos metales y polímeros. Tomando en cuenta diversos factores como la geometría, la velocidad de impacto y la relación dúctil-frágil en relación con la temperatura.

Söver A *et al.* (2009), llevaron a cabo un trabajo de investigación en el que el objetivo principal era, presentar una nueva máquina de prueba de alta velocidad instrumentada para pruebas de impacto de elastómeros. Se tomaron 5 especímenes de diferente elastómeros, donde todas las muestras tenían la misma geometría esférica de 20 mm de diámetro. Las cuales se ensayaron bajo las mismas condiciones de temperatura, es decir, a 23 ° C (temperatura ambiente). Los otros parámetros de prueba que son, temperatura y geometría de la muestra, se mantuvieron constantes.

Rahmé P. *et al.* (2011), realizaron pruebas de impacto en una superficie de Kavler y diferentes polímeros en forma de esferas, esto con la intención de analizar el comportamiento de sus propiedades al ser impactados, agregando dos configuraciones diferentes. Se comprobó que los polímeros analizados tienen mejor disipación de energía.

Reincke K. *et al.* (2011), analizaron materiales elastómeros para la caracterización del comportamiento de la fractura a mayor velocidad de carga. Donde aplicaron diferentes métodos de prueba. Una prueba de impacto de tracción con muescas instrumentada y otra prueba de dardo de caída libre instrumentada. Los diagramas de carga-deformación registrados, se pueden usar para la evaluación de las características de deformación y fractura, y para un análisis de mecánica de fractura.

Ledezma R. (2014), recopiló un avance sobre aislamientos de vibraciones producidas por impacto usando rigidez no lineal. Consideró un sistema MKC (masa-

rigidez-amortiguador) de un grado de libertad. En donde, la masa representa el elemento a proteger de vibraciones externas y se analiza con base en su dinámica e interacción con el conjunto rigidez-amortiguador que, a su vez, representa el medio aislante.

Este sistema aislante tiene como objetivo absorber la energía proveniente del impacto en forma de deformación y disiparla posteriormente. Usualmente el sistema aislante se diseña para obtener una baja frecuencia natural, lo que conlleva a un aislamiento vibratorio aceptable. Este sistema aislante es pasivo, es decir, que sus propiedades permanecen constantes y en la práctica se obtiene con soportes elásticos de diferentes tipos, por ejemplo, resortes helicoidales, resortes de cable, elastómeros, resortes neumáticos, entre otros.

Osterlof R. et al. (2014), presentan una metodología eficiente para elastómeros. Utilizan curvas de descarga en tensión uniaxial, cizallamiento puro y el inflado de una membrana de caucho. Los resultados experimentales de la extensión biaxial son cruciales cuando se ajustan los parámetros del material hiperelástico, y la técnica de inflado de burbujas es un método para obtener estos datos cuando el equipo de prueba especializado no está disponible. La metodología presentada permite la obtención de parámetros relacionados con la primera y segunda capa invariante, que es necesaria para un buen ajuste entre los resultados de medición y simulación.

Pavioni O. et al. (2015), muestra una forma sencilla y novedosa de obtener el coeficiente de restitución correspondiente al choque entre una pelota y el piso. En la cual se obtiene simultáneamente el coeficiente de restitución para el rebote de una pelota contra el suelo y el coeficiente de arrastre propio de una esfera que se mueve en un medio viscoso.

Aguilar R. et al. (2016), propusieron un método simplificado, donde se encuentra la rigidez efectiva, mediante los puntos del diagrama de histéresis, los cuales definen el comportamiento del modelo anti sismos.

Brogliato B. et al. (2016), hacen referencia al modelado matemático de impacto de una masa resorte-amortiguador. La masa es propuesta, con diferentes modelos viscoelásticos y reológicos. Donde calcula, fuerzas de impacto, así como los tiempos de impacto y el trabajo que existe en dicha colisión. Usa una capa goma adicional, la cual disminuye la carga del umbral de daño. Por debajo de este umbral, la respuesta está dominada por la deformación elástica global, que disminuye el daño interno y externo y, por lo tanto, la cantidad de energía absorbida.

Mohagheghian et al. (2017), analizaron la combinación de un polímero con una placa metálica delgada en una configuración de dos capas. Sometieron a una carga casi-estática y de impacto por un penetrador. Encontraron que la energía requerida para perforar la placa con doble capa, excede significativamente la del sustrato

metálico desnudo. Esto muestra el potencial de recubrimientos de polímero como una solución efectiva de ajuste retroactivo.

Una capa de polímero que mejora la energía a la perforación a consecuencia de su gran ductilidad. De esta forma, la energía absorbida por la capa de metal se puede maximizar. La sinergia entre las capas de metal y polímero también depende del tipo de polímero y la velocidad de carga. Un polímero con alto endurecimiento por deformación funciona mejor en condiciones de impacto. Sin embargo, bajo carga cuasi-estática, el rendimiento de doble capa es menos sensible al límite elástico y al endurecimiento por deformación del polímero.

Mark S. *et al.* (2017), llevaron a cabo experimental y numéricamente, un análisis de estructuras poliméricas sometidas a impacto, donde se experimentó con dos esferas, una para impactar y la otra para recibir el impacto, de 0.33 Kg. aproximadamente cada una, y capas poliméricas, estas últimas son el punto de análisis. Para dicho análisis emplearon una metodología, la cual consta de los pasos siguientes, de A a C:

En el paso A, el impactador se eleva a una altura fija donde la energía total del sistema es únicamente la energía potencial gravitacional del impactador, calculada a partir de la masa y la altura vertical desde la posición de equilibrio.

En el Paso B, el impactador ha sido lanzado. En el momento justo antes del impacto, toda la energía potencial en el Paso A se ha transformado en energía cinética dentro del impactador. Con el impacto, parte de la energía se transfiere al receptor, y parte se refleja y/o disipa.

En el Paso C, parte de la energía permanece con el impactador, y ambas esferas se mueven en la dirección del balanceo, alcanzando una altura final dictada por la mecánica y la dinámica de todo el sistema. En la posición de altura máxima después del impacto (que define el paso C), toda la energía en el sistema vuelve a ser de forma potencial gravitacional. A partir de este estado evaluaron; 1) la energía total del sistema después del impacto, 2) la energía total disipada por la estructura del laminado, y 3) la energía transmitida al receptor.

Para este estudio se usaron 3 probetas de Nylon y 3 probetas de PVC, a las cuales se les realizan los ensayos bajo diferentes ángulos de carga. El resultado demostró, que independientemente del mecanismo que propicia la deformación de la probeta, el comportamiento dúctil, se caracteriza por una absorción de energía que posibilita que el material experimente una deformación plástica.

Fombuena. *et al.* (2017), analizaron un material polímero, en el cual aplicaron un modelo matemático, mejor conocido como Burger, mediante la resolución de un caso práctico, dieron a conocer la utilidad de varios modelos reológicos matemáticos para la comprensión y predicción por parte del alumnado, del comportamiento mecánico de un polímero en un proceso como la fluencia y/o relajación, donde interviene la variable tiempo.

2.4 Conclusión del estado del arte

De acuerdo a la literatura revisada en el documento, se analizan diferentes materiales polímeros sometidos a diferentes tipos de cargas para verificar disipación de energía. Por ejemplo, Rodríguez (2013) solo le interesaba obtener las fuerzas máximas en función del tiempo en un material sin analizar curvas de histéresis. Las investigaciones citadas no hacen comparaciones con las curvas de histéresis para verificar el grado de disipación de energía que tiene el material, o alguna metodología donde se tengan inmersos los valores de pruebas dinámicas y estáticas con leyes de reología para materiales viscoelásticos. A diferencia de esto, se propone hacer el análisis de la disipación de energía comparando curvas de histéresis y diseñando un algoritmo en Matlab con el método Runge Kutta para obtener curvas en función del comportamiento del material. Esto basándose en modelos reológicos viscoelásticos y en el coeficiente de restitución.

2.5 Objetivos

Objetivo General

Evaluar experimentalmente el grado de disipación de energía de materiales polímeros utilizados como puntas para tope de impacto comparando valores de histéresis y coeficientes de restitución para diferentes volúmenes de material.

Objetivos particulares

- ✓ Analizar las curvas de histéresis de diferentes volúmenes de material polimérico bajo cargas cuasi estáticas.
- ✓ Analizar la cantidad de energía disipada para diferentes volúmenes del material polimérico bajo cargas de impacto.
- ✓ Relacionar las propiedades plásticas de los materiales poliméricos con las curvas de histéresis de respuesta cuasi estática y de impacto.
- ✓ Elaborar descripción reológica del comportamiento de los polímeros usados en el diseño de puntas para topes de impacto y su relación con la disipación de energía.

- ✓ Diseñar una metodología con métodos numéricos para una mejor interpretación del comportamiento del material.

2.6 Alcances y limitaciones

- Se utilizaron materiales poliméricos como sujetos de prueba, particularmente polímeros elastómeros y/o siliconas.
- Se realizaron pruebas cuasi-estáticas y bajo cargas de impacto para poder comparar la respuesta del material a diferentes velocidades de carga.
- La disipación de energía se contabilizó a partir de sus gráficas de histéresis y coeficientes de restitución.
- Los modelos reológicos fueron la base del cálculo de la respuesta del material.

Capítulo 3

Marco teórico

Es importante tener una perspectiva de lo que se desea hacer, sobre todo tener las bases para llevar a cabo esta investigación. En el presente capítulo se plasma la teoría necesaria con la cual se cumplió con el objetivo, desde la descripción y particularidades de los conceptos a utilizar.

Para Navarro, (2017), los topes de impacto generalmente se utilizan para limitar el desplazamiento y también pueden ser utilizados para reducir la vibración. Los topes de impacto son elementos mecánicos que se someten a intensas cargas de corta duración, y como consecuencia absorben grandes cantidades de energía, en reducidos periodos de tiempo.

Estos dispositivos utilizan como punta de tope de impacto polímeros elastómeros. Este material es el más acertado para estos topes pasivamente hablando. Específicamente en este apartado se hace alusión a la teoría utilizada y que hasta la fecha está disponible para poder complementar la investigación propuesta.

3.1 Clasificación de los polímeros

Es de suma importancia analizar y clasificar los diferentes materiales polímeros, para llevar a cabo un estado del arte y tener información suficiente acerca de estos materiales que suelen tener características propias basadas en la elasticidad. Se muestra una clasificación que contiene las características fundamentales de este tipo de materiales.

3.1.1 Termoplásticos

En los termoplásticos las moléculas quedan enmarañadas unas con otras, pero sin que se entrelacen o articulen entre sí con enlaces covalentes. La elevación de la temperatura hace que la fuerza de los enlaces secundarios se debilite y esto facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo, fluyendo como un líquido altamente viscoso.

Un termoplástico se ablanda, llegando a fluir cuando se somete a un calentamiento y vuelve a ser sólido y rígido cuando baja la temperatura. Estos procesos son totalmente reversibles y pueden repetirse de forma reiterada.

3.1.2 Termoestables

Un polímero termoestable es aquel que no reblandece ni fluye por mucho que se eleve la temperatura, es más, llega antes a descomponer que a fluir. No pueden ser los plásticos termoestables moldeados repetidas veces por esta razón. Los polímeros termoestables se endurecen al calentarse y no se ablandan al continuar calentando. Los polímeros termoestables generalmente son más duros, más resistentes y más frágiles que los termoplásticos y tienen mejor estabilidad dimensional.

3.1.3 Elastómeros

Los elastómeros vulcanizados tienen una estructura poco reticulada, distancia entre nudos muy grande, y admiten altas deformaciones de tipo elástico, es decir, que cesando los esfuerzos que originan la deformación, recuperan al menos en parte, su forma original (Juárez, 2012). En este trabajo los polímeros que cobran relevancia son los elastómeros, este es el punto de partida de esta investigación.

3.2 Modelo de Maxwell.

El modelo de Maxwell es utilizado para la representación de esfuerzos y deformaciones en materiales plásticos, los cuales presentan comportamientos viscoelásticos. Este es empleado en estudios e investigaciones, con la finalidad de obtener información de respuesta del material a largo plazo, estas investigaciones de material se presentan en este documento para la caracterización del mismo.

Este modelo considera la combinación de un elemento elástico y un elemento viscoso (Figura 4), donde se consideran las ecuaciones matemáticas de la ley Hooke (parte elástica) y Newton (parte viscosa), (Balart, 2007).

Para la parte elástica se tiene:

$$\sigma_1 = \xi \cdot \varepsilon_1 \quad (2.1)$$

Donde σ_1 , es la tensión soportada, ξ es la constante de elástica y ε_1 es la deformación sufrida por el material.

Para la parte viscosa se tiene:

$$\sigma_2 = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (2.2).$$

Donde η , es la constante viscosa del material, $d\varepsilon_2$, la deformación sufrida por el elemento con respecto al tiempo y σ_2 , es la tensión soportada.

Despejando la deformación ε_1 y ε_2 de las Ec. (2.1) y (2.2) al derivar cada una con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{\sigma_2}{1} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2.4)$$

Se sabe que: $\varepsilon_{total} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ y diferenciando esta expresión con respecto al tiempo:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (2.5)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (2.3) y (2.4) en (2.5), se obtiene así el modelo de Maxwell.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\sigma}{1} \quad (2.6)$$

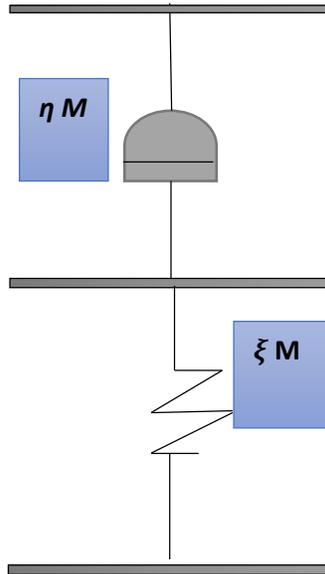


Figura 4. Respuesta del material viscoelástico sometido a un estado tensional. (Rodríguez, 2013).

3.2.1 Comportamiento a fluencia

El modelo de Maxwell explica fenómenos a largo plazo en los materiales plásticos. En la fluencia implica que la tensión sea constante, entonces la derivada con

respecto al tiempo es cero, (Figura 5) por lo cual una parte de la Ecuación (2.6) se anula, Fombuena V. et al. (2017). Obteniendo una solución, queda la siguiente expresión:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\sigma}{1} \quad (2.7)$$

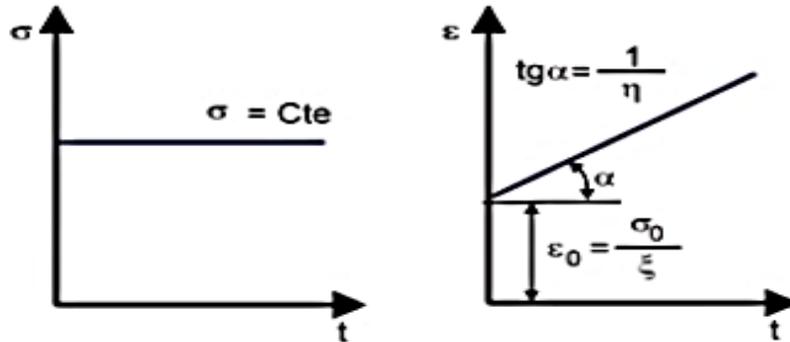


Figura 5. Se presenta una respuesta inicial de deformación debido al elemento resorte y una respuesta inicial debido al elemento viscoso (Balart, 2007).

3.2.2 Comportamiento a relajación

El modelo de Maxwell explica fenómenos a largo plazo en los materiales plásticos. En la relajación implica que la deformación sea constante, entonces la derivada con respecto al tiempo es cero, por lo cual la parte izquierda de la ecuación (2.6), Se anula (Balart, 2007). Quedando la siguiente expresión:

$$0 = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (2.8)$$

Hallando la solución a la ecuación (2.8) se obtiene.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\left[\frac{\xi}{\eta}\right]t} \quad (2.9)$$

3.2.3 Comportamiento de recuperación

El modelo Maxwell también permite explicar el fenómeno de recuperación, es cuando el material trabaja con una determinada tensión y se anula dicha tensión $\sigma = 0$, eliminando los términos de la derecha de la expresión general Fombuena V. et al. (2017).

$$\varepsilon(t) = C \quad (2.10)$$

Gráficamente, cuando se anula en un momento dado una tensión, hay una recuperación parcial debido al elemento elástico, pero con el paso del tiempo ya no se produce ninguna recuperación.

3.3. Modelo de Kelvin-Voigt

La diferencia de este modelo con respecto al de Maxwell es la configuración, en este caso los componentes elástico y viscoso están en paralelo (Figura 6).

Teniendo en cuenta las ecuaciones (2.1) y (2.2) para cada elemento y considerando que las tensiones son aditivas en esta configuración, el modelo de Kelvin-Voigt es:

$$\sigma = \xi \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.11)$$

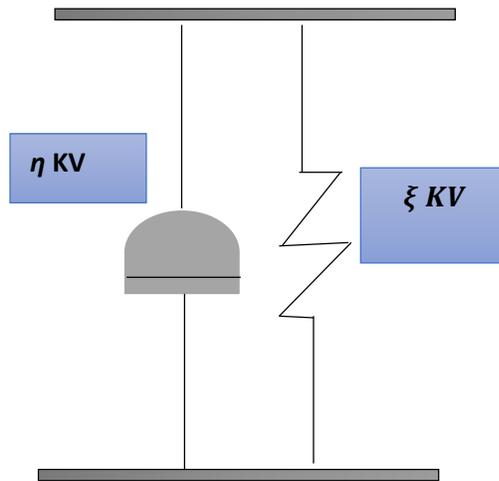


Figura 6. Representación del modelo en paralelo de Kelvin-Voigt. (Rodríguez, 2013).

3.3.1 Comportamiento a fluencia

El modelo de Kelvin-Voigt explica fenómenos a largo plazo en los materiales plásticos. En la fluencia cuando la tensión es constante, la expresión es la misma que la Ecuación (2.11), Fombuena V. et al. (2017).

Al dar resolución a la ecuación diferencial se obtiene:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\xi} \left(1 - e^{-\left[\frac{\xi}{\eta}\right].t} \right) \quad (2.12)$$

Donde la deformación con respecto del tiempo $\varepsilon(t)$ es igual, a un cociente de la tensión inicial entre la constante elástica $\frac{\sigma}{\xi}$, multiplicada por 1, menos exponencial e elevada a menos el cociente de la constante elástica entre la constante viscosa por el tiempo $-\left[\frac{\xi}{\eta}\right].t$. Gráficamente, cuando el material trabaja a una tensión constante, experimenta una fluencia creciente con el paso del tiempo de forma exponencial.

3.3.2 Comportamiento a relajación

En este fenómeno la deformación es constante, por tanto en la expresión general (2.11) se anula un término como se aprecia, y se obtiene la ecuación (2.13), donde se observa que la tensión es proporcional al desplazamiento y que no se produce relajación con respecto del tiempo.

$$\sigma = \xi \cdot \varepsilon_1 \quad (2.13)$$

Gráficamente como la deformación es constante, no hay ningún tipo de relajación, la tensión es constante con el paso del tiempo.

3.3.3 Comportamiento a recuperación

Este fenómeno ocurre cuando el material trabaja con una determinada tensión, la cual se anula en un momento determinado $\sigma = 0$, eliminando el primer término en la expresión general. Al dar una solución a dicha ecuación queda la siguiente expresión:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{-\left[\frac{\xi}{\eta}\right].t} \quad (2.14)$$

Gráficamente, cuando la tensión se elimina, experimenta una relajación de tipo exponencial decreciente con el paso del tiempo, (Figura 7).

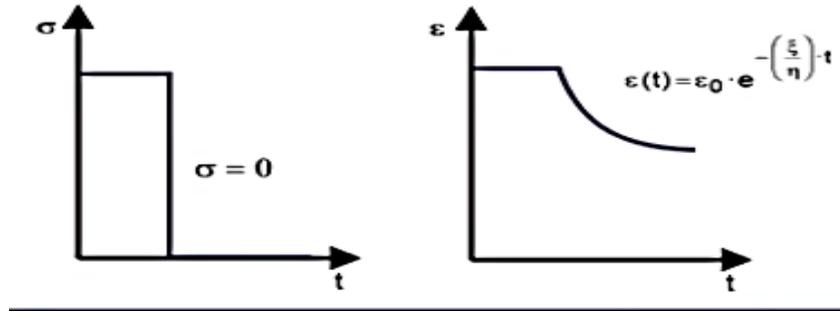


Figura 7. Relajación de tipo exponencial decreciente (Balart, 2007).

3.4 Principio de superposición de Boltzmann

Como ya se mencionó anteriormente, un material plástico presenta una parte elástica, que es del tipo instantánea, y una parte viscosa, que es dependiente del tiempo. El principio de Boltzmann permite llevar a cabo un análisis de estados tensionales complejos para evaluar la respuesta, como la superposición de la deformación frente a estados tensionales simples, (Balart, 2007).

Este principio establece que: se tiene una ley de tensiones total, provocará una ley de deformaciones total, sobre un sistema y viceversa.

$$\sigma_{total} = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \quad (2.15)$$

$$\epsilon_{total} = \epsilon_1(t) + \epsilon_2(t) \quad (2.16)$$

Cabe mencionar que este principio es aplicable a materiales viscoelásticos en su zona lineal cuando los niveles de deformación son relativamente pequeños. Este principio se puede englobar en las imágenes de figuras 8 y 9, que resumen gráficamente el comportamiento tensional y de deformación.

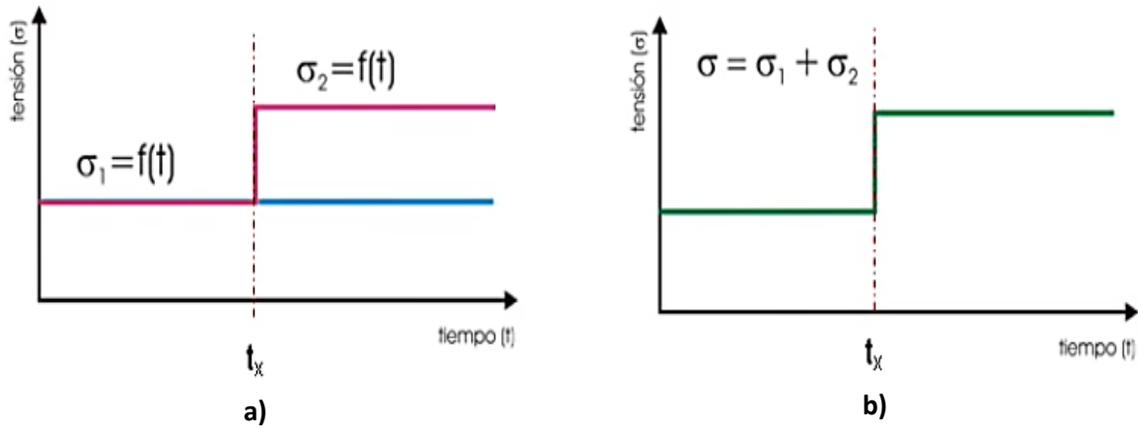


Figura 8. Gráficas de tensiones en función del tiempo por separado (azul y rojo); y englobadas en una sola grafica (verde), (Balart, 2007).

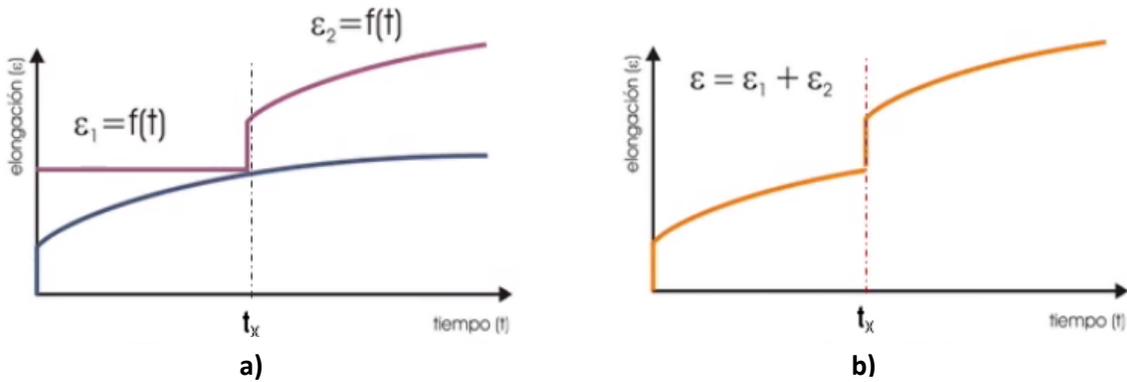


Figura 9. Gráficas de las deformaciones en función del tiempo por separado (azul y violeta); englobadas en una sola grafica (amarillo), (Balart, 2007).

3.5 Modelos avanzados de viscoelásticidad

La combinación de modelos simples como los explicados anteriormente permite obtener modelos más complejos que se ajustan mejor a la realidad en que ocurre el comportamiento de la viscoelásticidad (Figuras 10 y 11), (Balart, 2013).

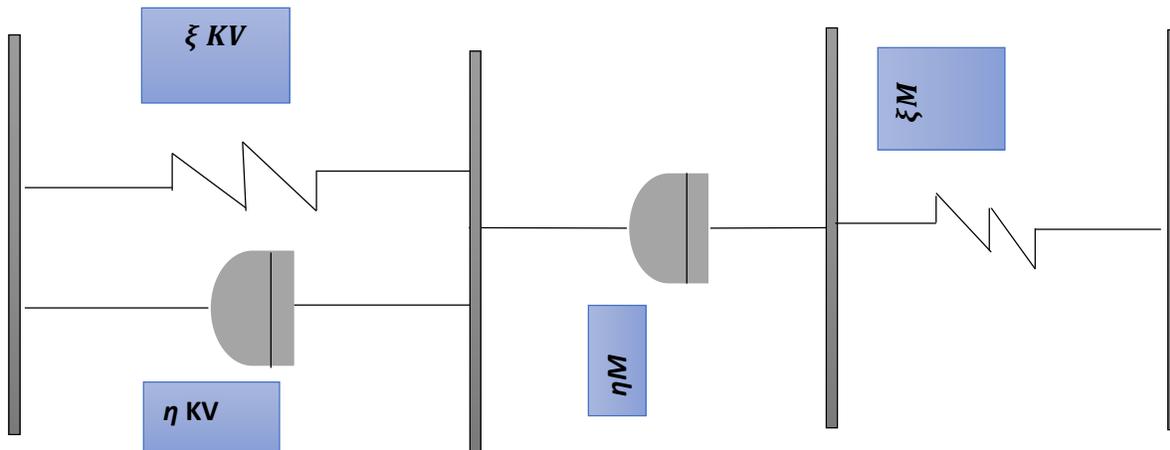


Figura 10. Combinación de modelos básicos (Maxwell y Kevin-Voigt y/o Burgers).

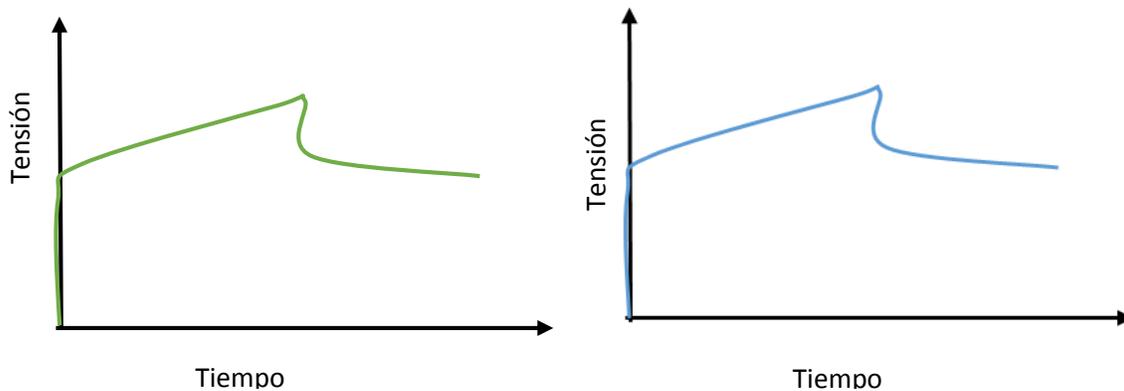


Figura 11. Gráficos la respuesta de deformación real de los materiales viscoelásticos (verde), respuesta al combinar Maxwell y Kevin-Voigt (azul), Balart (2013).

3.6 Conservación de energía y cantidad de movimiento o impulso

En el impacto intervienen dos cuerpos, uno que incide o choca y que constituye la carga que produce el efecto, y otro que recibe el choque, y tiene una respuesta, el cual es el objeto de investigación.

El método usual de tratar los problemas de impacto es aplicar las leyes de conservación de la energía y de conservación de la cantidad de movimiento o impulso. La de conservación de la energía indica:

“La energía cedida por cuerpo impactador, es igual a la energía recibida y absorbida por el cuerpo impactado”

Sin embargo, en la realidad se presentan dificultades y los modelos ideales que permiten efectuar los cálculos son simplificados. Para simplificar el problema se supone:

- a) Las deformaciones se establecen instantáneamente en toda la pieza, es decir que la velocidad de propagación de las ondas de deformación es infinita.
- b) Se supone que no hay pérdidas de energía durante el choque y que la masa del elastómero es despreciable frente a la masa que tiene el péndulo el impacto.

Se consideran los cuerpos representados en la Figura 12. La colisión se presenta de forma repentina en las esferas que tienen la normal a la superficie en contacto y se le da el nombre de línea de contacto, (Serge, 2011).

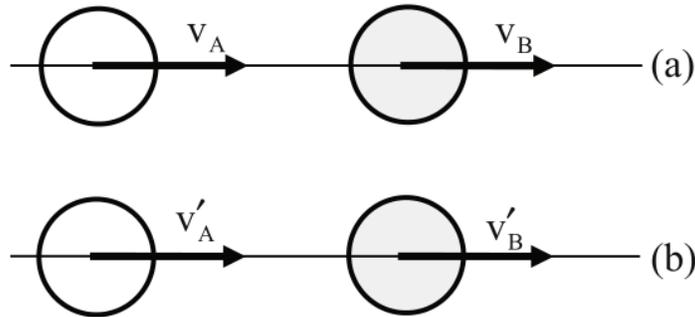


Figura 12. Representación del impacto, (Serge, 2011).

El impacto central directo entre dos cuerpos (a) y (b) está descrito por el principio de conservación de energía y momento lineal.

$$\frac{1}{2} m_A v_B^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 = \frac{1}{2} m_A v_B'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B'^2 \quad (2.17)$$

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (2.18)$$

Para ello, las variables; m_A, m_B son las masas de los cuerpos y las variables restantes v_A, v_B, v'_A, v'_B , son las velocidades, antes y después de ocurrir el impacto.

(Ramírez, 2008), realizó consideraciones, arreglos algebraicos, factorizando y realizando cociente en sus términos, para las ecuaciones (2.17) y (2.18), se obtiene:

$$v_A - v_B = -v'_A - v'_B \quad (2.19)$$

Como la hipótesis de partida fue una colisión perfectamente elástica se supone que el valor uno es indicador de este tipo de choque.

Una vez ocurrido el impacto la energía cinética se transforma, ya sea en calor, energía sonora o de deformación elástica. El coeficiente de restitución considera que el impacto es inelástico, es decir menor a la unidad:

$$C_R = -\frac{v'_A - v'_B}{v_A - v_B} \quad (2.20)$$

Un caso de interés resulta cuando el choque se realiza contra un cuerpo fijo. En este caso particular la velocidad del segundo cuerpo es nula antes y después del choque, lo que permite simplificar la expresión del cociente (2.20):

$$C_R = -\frac{v'_A}{v_A} \quad (2.21)$$

También es necesario tomar en cuenta otras condiciones de impacto en caída horizontal, como la altura inicial, el rebote después del impacto y la aceleración de la gravedad. Primero tener en cuenta, calcular la velocidad inicial antes y después del impacto:

$$v_A = \sqrt{2gH_0}, \quad v'_A = \sqrt{2gH_1} \quad (2.22)$$

Donde gH_0 , es la aceleración de la gravedad por la altura del cuerpo. Y H_1 la altura del primer rebote. Si se sustituyen las ecuaciones (2.22) en la ecuación (2.21), se obtendrá finalmente el cociente de restitución C_R .

$$C_R = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} \quad (2.23)$$

3.7 Frecuencia natural y curvas de histéresis

Es de suma importancia comprender el fenómeno de frecuencia natural en los materiales, se liga con la histéresis en algunos casos, la cual se define en este mismo apartado. Un cuerpo dependiendo su forma, su masa o el material del que esté hecho, oscilará con ciertas frecuencias propias a las que se les denomina frecuencias naturales.

La frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se elimina la señal de excitación. Todo sistema posee una o varias frecuencias naturales, de forma que al ser excitadas se producirá un aumento importante de vibración (Gonzales, 2018). La ecuación de la frecuencia natural es:

$$w_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.24)$$

Donde (m) es la masa del material y (K) la rigidez que posee. De esta ecuación se deduce que si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará, y si la masa aumenta, la frecuencia natural disminuye, (Sanáis, 2013).

Al momento del impacto hay una deformación, absorción o disipación interna del material; esto ocurre por la fricción interna existente entre planos, los cuales se deslizan cuando hay deformaciones. Cuando un cuerpo con amortiguamiento es sometido a vibraciones, el diagrama de esfuerzo-deformación muestra la pérdida de energía por unidad de volumen en cada ciclo, debido al amortiguamiento, esto es llamado histéresis de la carga, Figura 13 (Rao, 1990).



Figura 13. Bucle de histéresis para materiales elásticos (Rao, 1990).

Cuando la carga aplicada a un cuerpo elástico se incrementa, el esfuerzo σ y la deformación ε , también se incrementan. El área bajo la curva $\sigma - \varepsilon$, ésta dada por:

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (2.25)$$

Donde u es el trabajo realizado o energía consumida por unidad de volumen (Rao, 1990)

3.8 Decremento logarítmico

La cantidad de amortiguamiento que presenta un sistema, es medible y es necesario para ver el decaimiento de las oscilaciones libres. Si existe mucho amortiguamiento será mayor la caída de las oscilaciones (figura 14). A mayor amortiguamiento,

mayor será la caída. El decremento logarítmico se define como el logarítmico natural de la razón de amplitudes sucesivas cualesquiera. Considérese una vibración amortiguada:

$$x = X e^{-\zeta w_n t} \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2} w_n t + \phi) \quad (2.26)$$

Gráficamente se representa en la Figura 14, aquí es donde se introduce el llamado decremento logarítmico. La expresión para el decremento es entonces (Thomson, 1982):

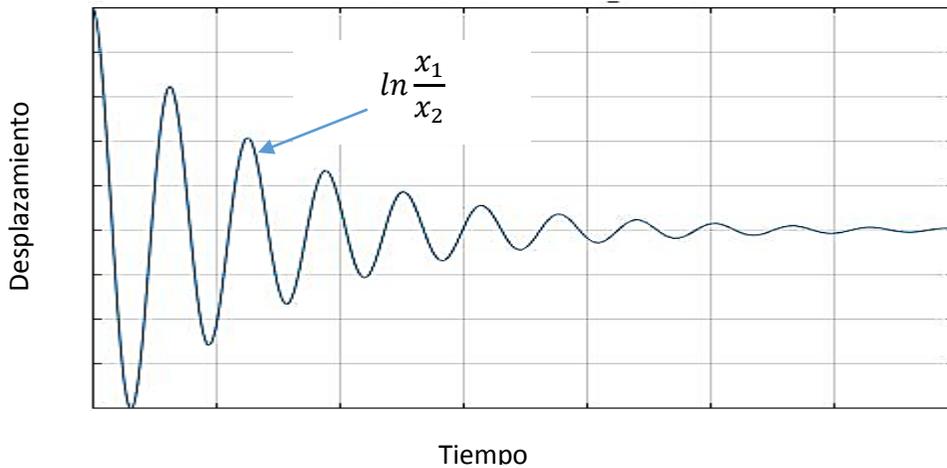


Figura 14. Caída de oscilación medida por decremento logarítmico, (Thomson, 1982).

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln \frac{e^{-\zeta w_n t} \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2} w_n t + \phi)}{e^{-\zeta w_n (t_1 + \tau_d)} \text{sen}(\sqrt{1-\zeta^2} w_n (t_1 + \tau_d) + \phi)} \quad (2.27)$$

Si se sabe que los valores del seno son iguales cuando el tiempo se incrementa en el periodo amortiguado τ_d , la razón de la Ecuación (2.27) se reduce a lo siguiente.

$$\delta = \ln \frac{e^{-\zeta w_n t_1}}{e^{-\zeta w_n (t_1 + \tau_d)}} = \ln e^{\zeta w_n \tau_d} = \zeta w_n \tau_d \quad (2.28)$$

Sustituyendo el periodo amortiguado, $\tau_d = \frac{2\pi}{w_n \sqrt{1-\zeta^2}}$, la expresión para el decremento logarítmico se vuelve

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.29)$$

Cuando la razón de amortiguamiento ζ es pequeño, $\sqrt{1 - \zeta^2} \cong 1$, (2.26) se puede escribir como:

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (2.30)$$

3.9 Péndulo simple

El péndulo simple está formado de una masa que se pueda considerar puntual, (**M**), suspendida de un hilo que tiene una masa despreciable y longitud (**L**), mismo que gira libremente en su extremo superior. Siguiendo la notación de la figura 15, la desviación se mide por el ángulo (θ) que forma el hilo con la vertical. Si se aplica el principio de conservación de energía para dicho péndulo se obtiene lo siguiente:

Cuando el hilo se desvía de dicho ángulo, la masa se eleva una altura (**h**):

$$h = L - L \cos \theta \quad (2.31)$$

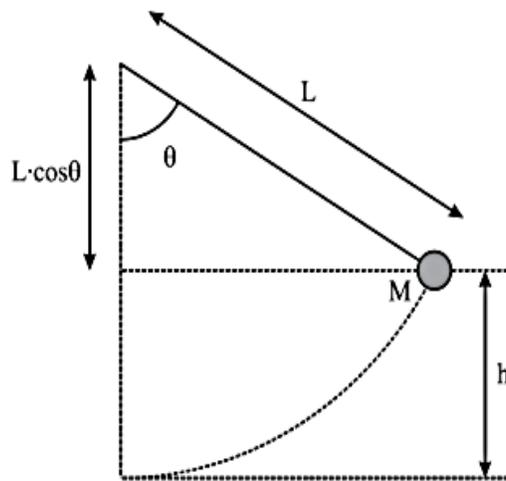


Figura 15. Péndulo simple.

La trayectoria del péndulo es un arco de circunferencia de radio (**L**), su velocidad entonces es:

$$v = L (d / dt) \quad (2.32)$$

Al aplicar la conservación de la energía, la suma de la energía cinética y de la potencial debe ser constante en todo punto de la trayectoria:

$$E = 1 / 2 M v^2 + Mgh \quad (2.33)$$

Sustituyendo (**h**) y (**v**) por sus expresiones se llega a:

$$E = 1 / 2 ML^2 (d / dt)^2 + MgL (1 - \cos \theta) \quad (2.34)$$

3.10 Péndulo Charpy modificado

El péndulo Charpy es un dispositivo creado por Georges Charpy (1865-1945) que se utiliza para determinar la tenacidad de un material. Se generalizó primero en los Estados Unidos y luego en el mundo. Una de las empresas pioneras en su uso fue la SATEC System, que realizó pruebas de choque a flexión y tracción con dos posiciones del martillo, alcanzando 325.4 Joules (32.54 kgf-m) o 135.6 Joule (13.56 kgf-m) según el método empleado (Chagoyén-Méndez et al, 2016).

Se cuenta con un péndulo Charpy modificado en este centro de investigación (Espino, 2004), mismo con que se realizan las pruebas dinámicas de impacto a materiales, figura 16.



Figura 16. Péndulo Charpy modificado (Espino, 2004).

3.11 Energía disipada y parámetros involucrados

Tomando en cuenta la ley de conservación de la energía, cuando el péndulo se encuentra en la posición inicial con un ángulo (θ), tiene el máximo de la energía potencial, que se conoce como energía de entrada, figura 17. Esta energía puede ser calculada con la siguiente ecuación.

$$E_p = m_c \cdot g \cdot h \quad (2.35)$$

Donde:

E_p = Es la energía potencial de entrada del sistema

m_c = Es la masa con la que *cuenta* el péndulo Charpy

g = Es la aceleración gravitatoria

h = Distancia entre el punto de impacto y el centro de gravedad del péndulo (m)

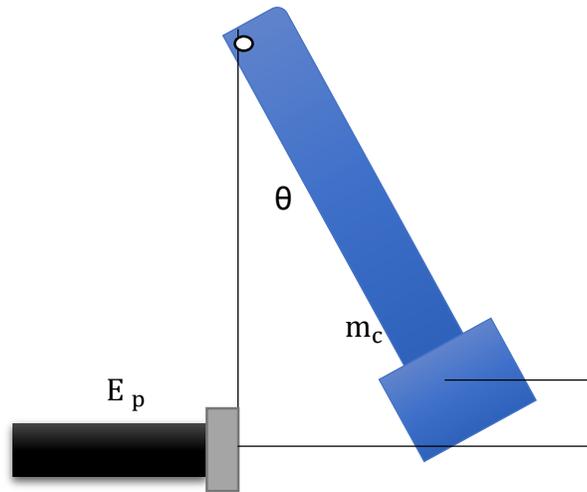


Figura 17. Péndulo antes del impacto.

Teniendo en cuenta la diferencia de energía potencial antes y después al primer impacto, se puede obtener la energía que el sistema logra disipar por completo, (Figura 18), de tal forma que la energía potencial disipada (E_d), es la diferencia de la energía (E_1), respecto de la energía (E_2), es decir;

$$E_d = E_1 - E_2 \quad (2.36)$$

Tomando en consideración las alturas en diferentes posiciones del brazo del péndulo de impacto, la ecuación (2.36) se desarrolla de la forma siguiente:

$$E_d = m_c \cdot g \cdot (L - L_r \cos \theta_i)_1 - m_c \cdot g \cdot (L - L_r \cos \theta_f)_2 \quad (2.37)$$

Donde:

E_d = Es la energía total disipada por el sistema

m_c = Es la masa del péndulo Charpy

L = Distancia al punto giro del péndulo

L_r = Centro de gravedad del péndulo

θ_i = Ángulo inicial del péndulo

θ_f = Ángulo final del péndulo

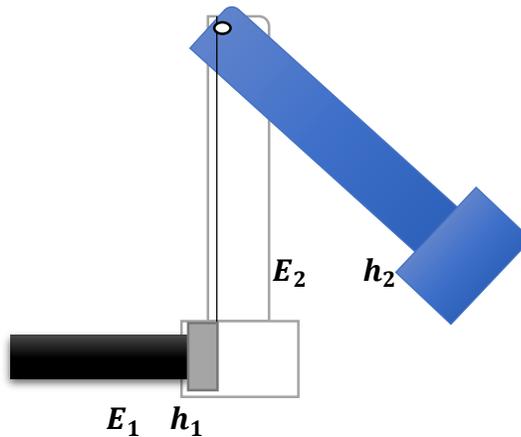


Figura 18. Representación antes y después del impacto.

3.12 Velocidades dinámicas involucradas en un péndulo Charpy

Las velocidades antes y después del impacto del péndulo contra el dispositivo se obtienen de la siguiente forma (Estrada, 2009): se tiene la posición inicial del péndulo de impacto, en este caso se cuenta solamente con energía potencial (E_p). La configuración inicial del péndulo Charpy, donde (θ) es ángulo de partida respecto a la vertical y (h) es la altura que existe entre el punto de impacto del péndulo y el centro de gravedad de la máquina de impacto, (Figura 19).

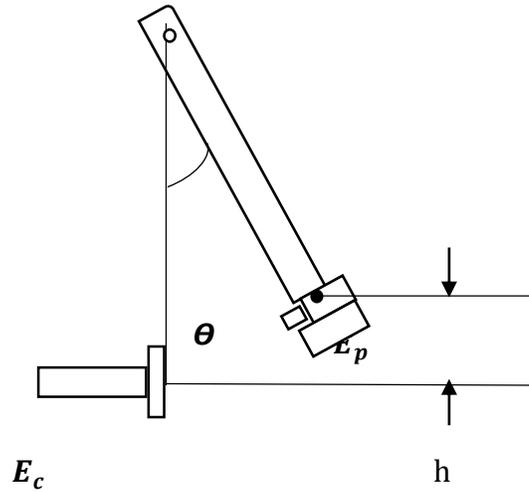


Figura 19. Posición inicial del péndulo de impacto.

Cuando el péndulo se suelta de su posición inicial, la energía potencial (E_p), se convierte en energía cinética (E_c), por conservación de energía, estas dos energías se convierten en igualdad, teniendo que:

$$m_c \cdot g \cdot h = \frac{I_i \omega_i^2}{2} \quad (2.38)$$

Donde:

m_c = Es la masa con la que cuenta el péndulo Charpy (3.455 kg).

g =Gravedad (9.81 m/s)

h =Distancia entre el punto de impacto y el centro de gravedad del péndulo.

ω_i =Velocidad angular del péndulo justo antes del impacto.

I_i =Momento de inercia del péndulo respecto al punto de giro (0.19211 kg m²).

Al despejar la velocidad angular del péndulo antes del impacto, se tiene que:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2m_c \cdot g \cdot h}{I_i}} \quad (2.39)$$

Entonces el vector de la velocidad lineal, se obtiene de la siguiente manera:

$$v_1 = \omega_i r \quad (2.40)$$

Donde la (r) es la distancia que existe desde el punto de giro del péndulo de impacto, hasta donde este mismo hace contacto con el dispositivo montado (0.4m).

El vector de la velocidad lineal del soporte metálico con el elastómero y el péndulo en el instante posterior al impacto, se calculan aplicando el coeficiente de restitución, como sigue:

$$e = \frac{v_s - v_2}{v_1} \quad (2.41)$$

en donde:

e =coeficiente de restitución

v_s =Velocidad del soporte posterior al impacto (m/s)

v_1 =Velocidad lineal de péndulo antes del impacto (m/s)

v_2 =Velocidad lineal del péndulo posterior al impacto (m/s)

Para obtener la velocidad (v_2) del péndulo después al impacto, se tiene:

$$v_2 = \omega_f r \quad (2.42)$$

Al sustituir la ecuación (3.40) y (3.42) en (3.41) se obtiene la velocidad del soporte metálico (v_s) posterior al impacto.

$$v_s = r(e\omega_i + \omega_f) \quad (2.43)$$

Finalmente para conocer la variable (ω_f); se plantean diagramas de cantidad de movimiento antes y después al impacto (figura 20). Se tiene que $m_c \omega_i r_g$ es la cantidad de movimiento lineal del péndulo en su centro de gravedad antes del impacto, y $l_g \omega_i$ es la cantidad de movimiento angular.

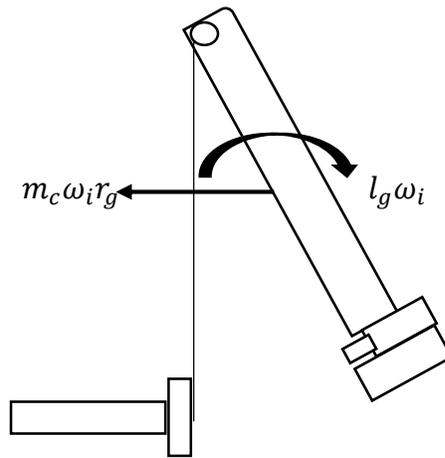


Figura 20. Diagrama antes del impacto.

La Figura 22 por otro lado muestra el diagrama de cantidad de movimiento una vez transcurrido el impacto, con sus respectivas velocidades inicial y final. Se toma en consideración la cantidad de movimiento lineal respecto al centro de gravedad del soporte metálico, es decir, $m_s r (e \omega_i + \omega_f)$.

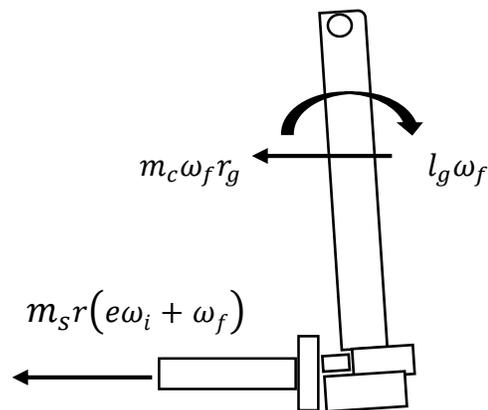


Figura 21. Diagrama después del impacto.

Con los diagramas anteriores, se aplica el principio de conservación de impulso angular:

$$K_f = K_i \quad (2.44)$$

En donde:

K_f =Cantidad de movimiento angular final (kg.m²/s)

K_i =Cantidad de movimiento angular inicial (kg.m²/s)

Los datos obtenidos al realizar los diagramas de las figuras 2.18 y 2.19 se sustituyen en el principio de conservación de impulso angular (Ec. 2.44), obteniendo la siguiente ecuación:

$$-m_s r^2 (e\omega_i + \omega_f) - m_c \omega_f r_g^2 - l_g \omega_f = m_c \omega_i r_g^2 - l_g \omega_i \quad (2.45)$$

Al despejar la variable faltante (ω_f), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\omega_f = \frac{m_c r_g^2 + l_g - m_s r^2 e}{m_s r^2 + m_c r_g^2 + l_g} (\omega_i) \quad (2.46)$$

Donde:

r_g = Es la ubicación del centro de gravedad del péndulo 0.194 m.

l_g = Momento de inercia del péndulo con respecto a su centro de gravedad 0.04194 kg.m²

m_s = Masa del soporte metálico de 0.586 Kg.

3.13 Impulso normal del impacto

El impacto de diferentes partículas es distinto de cero durante el intervalo de tiempo de t_1 y t_2 . Es decir Δt , y la fuerza (\mathbf{F}) que se aplica en ese instante de tiempo, es conocido como impulso y que se representa típicamente como se muestra en Figura 22. Para determinar analíticamente la cantidad del impulso transmitido al sistema, es conveniente usar una fuerza triangular. De forma ideal, el impulso se calcula: (Burns, 2015).

$$P_N = \frac{F_i(t_2 - t_1)}{2} \quad (2.47)$$

Donde:

P_N = Es el impulso normal de impacto

F_i = Es la fuerza aplicada al impacto

t_1 = Tiempo inicial del impacto

t_2 = Tiempo final del impacto

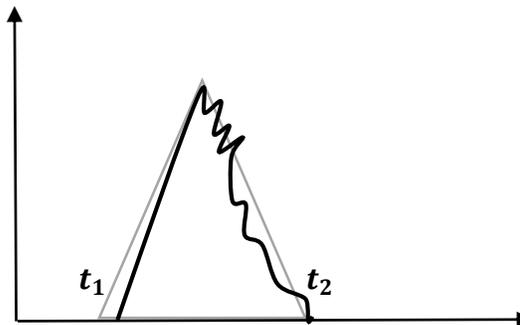


Figura 22. Representación impulsiva del impacto

3.14 Fuerza de impacto

La fuerza de impacto de un cuerpo con otro está en función de las diferentes velocidades iniciales, contenidas en las dos masas participantes (m_c) y (m_s), del péndulo y del dispositivo empotrado, el coeficiente de restitución (e) y la variación del tiempo que dura el impacto (Δt) entre estos, (Burns, 2015). La fuerza de impacto se representa con la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{2m_e(1+e)(v_f - v_i)}{\Delta t} \quad (2.48)$$

donde:

m_e = es la masa equivalente, misma que se calcula de la siguiente forma, teniendo en cuenta las masas del péndulo y del dispositivo:

$$m_e = \frac{m_c \cdot m_s}{(m_c + m_s)} \quad (2.49)$$

Al efectuar una comparación de: un impacto perfectamente elástico ($e = 0$), se tiene que el péndulo impactado no rebota. Y de un impacto inelástico ($e = 1$), se tiene que el péndulo regresa a la misma altura de donde fue soltado, si esto último

sucediera, habría un impulso mucho mayor, en el mismo tiempo de impacto. En la práctica es común encontrar valores superiores a cero e inferiores a uno, (Burns, 2015).

3.15 Media cuadrática o RMS

Son medidas estadísticas que pretenden resumir en un solo valor a un conjunto de valores. Representan un centro de entorno en el cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos. La media cuadrática o RMS es muy útil para calcular variables que toman valores positivos y negativos, se suele utilizar cuando el símbolo de la variable es no es importante, por ejemplo, para calcular la media de errores de medida. La media cuadrática es ampliamente utilizada para el cálculo de la media de un conjunto de números con las alternancias de cantidades con valores positivos y negativos.

La media cuadrática para una colección de N valores $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ de una variable discreta x, viene dada por la siguiente fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (2.50)$$

3.16 Coeficiente de correlación R²

El coeficiente de correlación determina el grado de asociación lineal entre X e Y, sin establecer a priori ninguna direccionalidad en la relación entre ambas variables; evalúa específicamente la adecuación a la recta lineal que defina la relación entre dos variables cuantitativas. Si se desea medir o cuantificar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas se debe calcular un coeficiente de correlación. Se trata de un índice que mide si los puntos tienen tendencia a disponerse en una línea recta. Puede tomar valores entre -1 y +1. Es un método estadístico paramétrico, ya que utiliza la media, la varianza y por tanto, requiere criterios de normalidad para las variables analizadas, las propiedades con las que el método cuenta son:

- Carece de unidades de medida (adimensional).
- Sólo toma valores comprendidos entre [-1,1].
- Cuando $|r|$ esté próximo a uno, $r = +1$ (recta lineal creciente de izquierda a derecha) o $r = -1$ (recta lineal decreciente), se tiene que existe una relación lineal muy fuerte entre las variables.
- Cuando $r \approx 0$, puede afirmarse que no existe relación lineal entre ambas variables. Se dice en este caso que las variables no tienen relación.

3.17 Método de Newton-Rapshon

Este método es uno de los más utilizados para localizar raíces ya que en general es muy eficiente y siempre converge para una función de polinomios. El método consiste en producir una sucesión de aproximaciones que se acerquen a la solución, estas sucesiones son las iteraciones (Figura 23). Se requiere que las funciones sean diferenciables, y por tanto, continuas, para poder aplicar este método. Se debe partir de un valor inicial para la raíz: x_i , el cual puede ser cualquier valor, el método convergirá a la raíz más cercana.

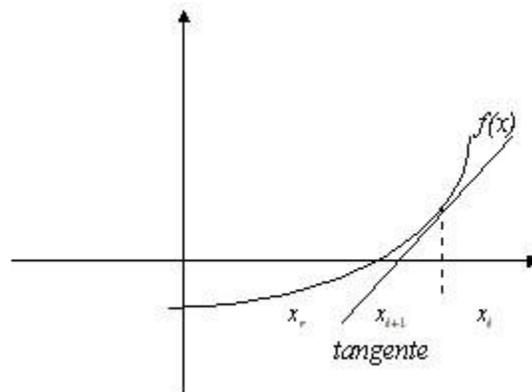


Figura 23. Representación de iteraciones Newton-Rapshon.

La ecuación de este método se indica a continuación...

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (2.51)$$

si $f'(x_n) \neq 0$, es decir, una función derivable

4.1 Introducción al capítulo

Las propiedades elásticas y de disipación de energía están dadas principalmente por los cuerpos deformables presentes en el sistema. Los cuerpos deformables están conectados a cuerpos rígidos que son responsables de la transmisión o aislamiento por vibraciones de movimiento. Por lo general, estos componentes están hechos con dos materiales diferentes, material viscoelástico y material elástico. Esta combinación de materiales, junto con características geométricas específicas, logra la funcionalidad deseada.

En la actualidad el diseño de elementos mecánicos disipadores se basa principalmente en los resultados de caracterizaciones cuasi-estáticas del material. El análisis de los sistemas mecánicos que contienen componentes elastómeros, ha demostrado que es esencial determinar el modelo del componente correcto para obtener predicciones precisas del comportamiento dinámico de estos sistemas mecánicos Ramírez A. et al. (2012).

4.2 Modelo para la caracterización cuasi-estática

El presente apartado describe la metodología en la prueba cuasi-estática, llevada a cabo en la máquina universal a tensión-compresión con ciclos marca *Shimadzu*. Se caracterizaron tres elastómeros comerciales de diferente volumen, que se utilizan como soportes en la industria automotriz.

Como se mencionó en el Capítulo 1, al combinar modelos reológicos de viscoelasticidad, se procede a la obtención de modelos más complejos, como es el caso del modelo de Burger o modelo avanzado de viscoelasticidad Fombuena V. et al. (2017). Para obtener las constantes elásticas y viscosas de los materiales elastómeros, se combinaron los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt (Figura 24). Con los datos recopilados de la prueba cuasi-estática, se abordó el modelo mencionado y se obtuvieron los parámetros numéricos para cada elastómero.

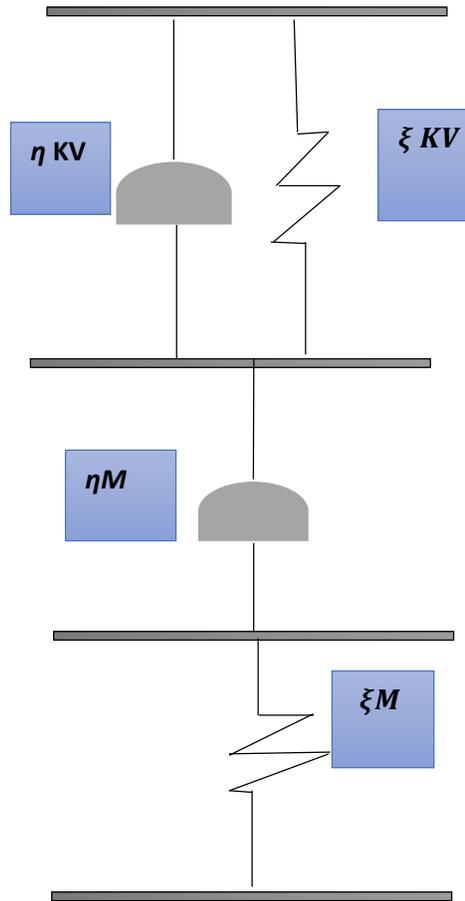


Figura 24. Combinación de modelos (Maxwell y Kelvin-Voigt, y/o Burgers).

Se sabe que, de acuerdo al modelo compuesto en la figura 24, la deformación que el sistema sufre al aplicar una carga constante en un cierto periodo tiempo es:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_1 Maxwell + \epsilon_2 KelvinVoigt \quad (3.1)$$

De acuerdo a las ecuaciones a fluencia mencionadas por Balart (2013), se obtiene el siguiente modelo matemático, para modelos reológicos como el de la Figura 25.

$$\epsilon_{total} = \frac{\sigma_o}{\xi_M} + \frac{\sigma_o}{\eta_M} + \frac{\sigma_o}{\xi_{K-V}} \left(\mathbf{1} - e^{-\left[\frac{\xi_{K-V}}{\eta_{K-V}} t \right]} \right) \quad (3.2)$$

Donde la deformación total que el sistema sufre está distribuida en todo el modelo.

$\frac{\sigma_o}{\xi_M}$ = Es el cociente de la tensión inicial aplicado al sistema en un tiempo cero, inversamente proporcional al primer parámetro de Maxwell en el resorte a obtener.

De acuerdo al modelo reológico, la primera tensión está correspondida con el porcentaje de deformación justo al empezar a aplicar la fuerza constante.

$\frac{\sigma_o}{\eta_M}$ = También corresponde al modelo Maxwell, se obtiene el parámetro viscoso de acuerdo a la tensión (σ_o) que se aplica al sistema, se hace una estimación de la pendiente que se traza en dicho gráfico, al dividir la tensión constante sobre la pendiente calculada se obtiene dicho parámetro.

$\frac{\sigma_o}{\xi_{K-V}}$ = Correspondiente al parámetro de resorte del segundo modelo Kelvin-Voigt en el sistema, representa la diferencia entre la máxima deformación que el sistema alcanza con el crecimiento exponencial, debe prolongarse la línea recta hasta t=0 segundos y determinar el valor correspondiente de deformación, considerando la deformación instantánea del material.

$(1 - e^{-\left[\frac{\xi_{K-V}}{\eta_{K-V}} t\right]})$ = Está relacionado al último parámetro viscoso del modelo de Kelvin-Voigt, el cual se obtiene de la zona creciente exponencial, zona de transición de la curva, después de la tensión inicial y antes de la pendiente generada por el material, tomando el tiempo justo cuando ocurre la transición Fombuena V. et al (2017).

4.3 Metodología cuasi-estática

Los materiales utilizados en las pruebas fueron elastómeros comerciales para topes automotrices (Figura 25). Cada espécimen cumplió ciertos estándares, como la norma ASTM D-575, que describen pruebas de compresión a bajas velocidades de deformación cuasi-estáticas.



Figura 25. Especimen ensayado.

Los elementos para dichas pruebas, fueron seleccionados de acuerdo a investigaciones sobre propiedades mecánicas de los polímeros elastómeros, tales como grado de dureza y viscoelasticidad. Estos son los parámetros más importantes en este estudio, pues de ellos depende la cantidad de energía que disipa el material. Las Tablas 1 y 2 muestran las especificaciones de las medidas de cada uno de los elementos con los que se realizó el análisis.

Tabla 1. Características de los especímenes volumen uno.

Número de Espécimen	Nombre de Espécimen	Altura (mm)	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Dureza Shore ° A
1	Hule	11	31	9	50
2	Silicón-Neopreno	11	31	9	60
3	Poliuretano	11	31	10	70

Tabla 2. Características de los especímenes volumen dos.

Número de Espécimen	Nombre de Espécimen	Altura (mm)	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Dureza Shore ° A
1	Hule	13.6	40.5	10.7	50
2	Silicón-Neopreno	13.6	40.6	10.7	60
3	Poliuretano	13.6	40	10.7	70

Con los datos experimentales de la prueba, se obtienen parámetros para cada material, las siguientes tablas contienen los parámetros con la reología explicada. Los datos de las Tablas 3 y 4 de tiempos y porcentajes de deformación se tomaron de la base de datos arrojados por el sistema. Graficando estos datos y siguiendo el procedimiento mencionado por Balart (2013) y por Fombuena V. et al. (2017) sobre la obtención de parámetros, se prosiguió y obtuvo la información necesaria para caracterizarlos. Este procedimiento se usó en los diferentes volúmenes de material.

Tabla 3. Datos obtenidos experimentalmente para la caracterización, volumen uno.

Numero de Espécimen	Tensiones (MPa)	% Deformación			Tiempo (s)	
		σ_0	$\%_M$	$\%_{KV}$	$\%_{KV}$	t_M
1	2.025	0.030	1.65	0.0314	56	5
2	2.025	0.021	0.55	0.0217	56	3
3	2.025	0.019	1.2	0.0203	58	5

Tabla 4. Datos obtenidos experimentalmente para la caracterización, volumen dos.

Número de Espécimen	Tensiones (MPa)	% Deformación			Tiempo (s)	
		σ_0	$\%_M$	$\%_{KV}$	$\%_{KV}$	t_M
1	2.025	0.023	1.10	0.06	60	5
2	2.025	0.022	1.00	0.09	60	5
3	2.025	0.017	1.08	0.04	60	5

La caracterización se calcula al sustituir los datos de la Tabla 3 y 4 en la ecuación (3.2) explicada en este documento.

$$\epsilon_{total} = \frac{\sigma_0}{\xi_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} + \frac{\sigma_0}{\xi_{K-V}} \left(1 - e^{-\left[\frac{\xi_{K-V}}{\eta_{K-V}} t \right]} \right) \quad \text{Reescribiendo (3.2).}$$

Fombuena V. et al... (2017).

Los resultados de los parámetros reológicos, se obtuvieron utilizando datos arrojados por el sistema de la máquina *Shimadzu* en las pruebas cuasi-estáticas, las cuales se muestran en el apartado correspondiente a resultados del capítulo 5 de este documento.

4.4 Metodología para análisis numéricos (*Runge Kutta*)

Los métodos numéricos, como ya se ha mencionado hasta ahora, son procedimientos donde se obtienen casi de forma exacta soluciones a problemas lógico-numéricos, a través de algoritmos computacionales (Chapra, 2007). Las ecuaciones diferenciales pueden ser lineales o no lineales; las primeras tienen soluciones analíticas, en la mayoría de los casos las ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, no tienen solución analítica, es por este motivo que los métodos numéricos son muy útiles. Existen varios métodos numéricos, usados en la actualidad para la aproximación a soluciones, en este caso se optó por hacer uso del método numérico de *Runge-Kutta*, método que es más exacto con las aproximaciones reales.

Para la solución numérica en esta investigación, se tomó como guía el ejemplo de valor inicial para ecuaciones diferenciales ordinarias, del libro *Análisis numérico y visualización gráfica con MATLAB* del autor S. *Nakamura* (1997).

El sistema tomado como referencia tiene una estructura como la que se muestra en la Figura 26, de tres grados de libertad. Se tienen tres parámetros elásticos (ξ) y dos parámetros viscosos (η), tres masas (M) y dos fuerzas (F) aplicadas al sistema (Nakamura, 1997).

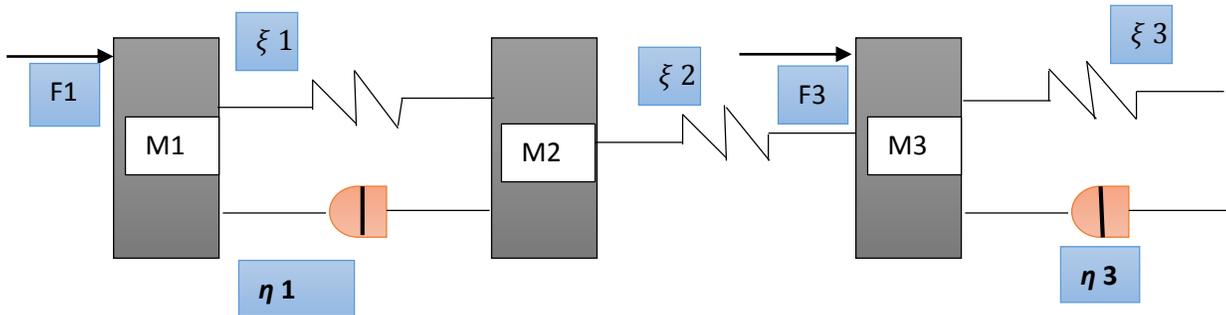


Figura 26 .Sistema masa-resorte-amortiguador (Tomado de S. Nakamura).

El sistema de la Figura 27 satisface un conjunto de seis ecuaciones diferenciales (EDO) de primer orden, donde, las constantes y condiciones iniciales son:

$$\xi 1 = \xi 2 = \xi 3 = 1$$

$$M1=M2=M3=0$$

$$F1 (t)=0.01, F3 (t)=0$$

$$\eta 1=, \eta 3= 0.1$$

Se pide resolver este sistema de ecuaciones de cuarto orden de forma numérica con este método, para $0 \leq t \leq 30$ s con incrementos de $h=0.1$. Una vez comprendido el ejemplo mencionado con anterioridad se procedió a adaptar el modelo reológico de Burger al sistema del ejemplo, la Figura 27 muestra la adaptación final del sistema.

En el sistema implementado vertical de la figura 27, se puede visualizar, en primera instancia que se suprimió el elemento elástico ($\xi 1$), de la figura 3.3, quedando solo el elemento viscoso ($\eta 1$) en su lugar. Además, la masa efectiva es la misma en los tres casos y es un sistema resorte-amortiguador, como lo menciona la literatura en métodos energéticos, de 1/3 (Thomson, 1982), y una fuerza aplicada en la misma masa en el extremo.

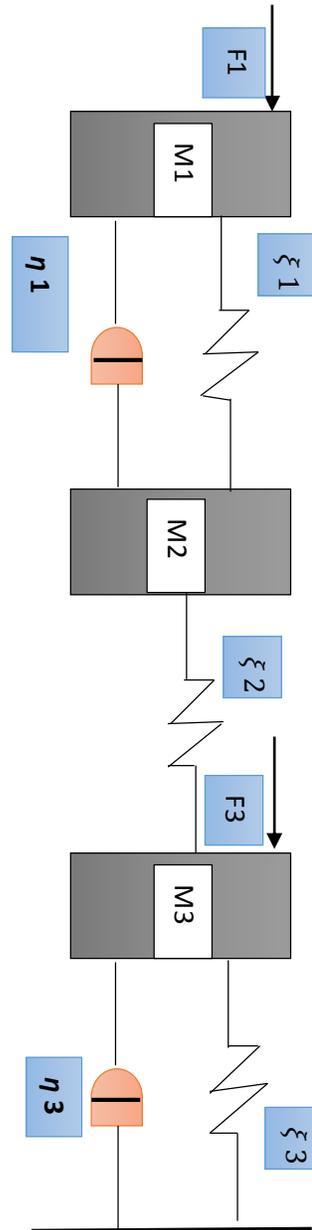


Figura 27. Sistema masa-resorte-amortiguador adaptado.

Siguiendo la misma metodología del ejemplo explicado anteriormente, y de acuerdo a los valores paramétricos obtenidos en las Tablas 18 hasta la 23 de reología, se sabe entonces que los valores iniciales para este sistema de ecuaciones diferenciales, son los que se muestran de la Tabla 5 a la 10 para los materiales ensayados.

Tabla 5. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 1, vol. 1.

Parámetros	Valores numéricos			
ξM	25	MPa	25,000,000	Pa
ηM	0.25	MPa/s	250,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(t)	2			

Tabla 6. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 2, vol. 1.

Parámetros	Valores numéricos			
ξM	28	MPa	28,000,000	Pa
ηM	0.20	MPa/s	200,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(T)	2			

Tabla 7. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 3, vol. 1

Parámetros	Valores numéricos			
ξM	84	MPa	84,000,000	Pa
ηM	0.15	MPa/s	150,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(T)	2			

Tabla 8. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 1, vol. 2

Parámetros	Valores numéricos			
ξ_M	29	MPa	29,000,000	Pa
η_M	0.20	MPa/s	200,000	Pa/s
ξ_{K-V}	0.35	MPa	350,000	Pa
η_{K-V}	0.00048	MPa/s	480	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(T)	2			

Tabla 9. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 2, vol. 2

Parámetros	Valores numéricos			
ξ_M	32	MPa	32,000,000	Pa
η_M	0.15	MPa/s	150,000	Pa/s
ξ_{K-V}	0.35	MPa	350,000	Pa
η_{K-V}	0.00048	MPa/s	480	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(T)	2			

Tabla 10. Parámetros numéricos y/o valores iniciales para el espécimen N° 3, vol. 2

Parámetros	Valores numéricos			
ξ_M	88	MPa	88,000,000	Pa
η_M	0.10	MPa/s	100,000	Pa/s
ξ_{K-V}	0.35	MPa	350,000	Pa
η_{K-V}	0.00048	MPa/s	480	Pa/s
M1	1/3			
h	0.1			
n	1			
F1(T)	2			

Con los valores iniciales que se tienen a través de la reología, se procede a construir un conjunto de seis ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden que se definió como:

$$4(A) \quad y_4 = \dot{y}_1, y_5 = \dot{y}_2, y_6 = \dot{y}_3$$

Donde las (y) corresponden a desplazamientos iniciales y (\dot{y}) corresponden a las velocidades iniciales, se procede a escribir las ecuaciones mencionadas:

$$\dot{y}_1 = y_4$$

$$\dot{y}_2 = y_5$$

$$\dot{y}_3 = y_6$$

$$4(B) \quad \dot{y}_4 = \frac{-\eta_1 y_4 - \xi_1 y_1 + \eta_1 y_5 + \xi_1 y_2 + F_1}{M_1}$$

$$\dot{y}_5 = \frac{\eta_1 y_4 + \xi_1 y_1 - \eta_1 y_5 - (\xi_1 + \xi_2) y_2 + \xi_2 y_3}{M_2}$$

$$\dot{y}_6 = \frac{\xi_2 y_2 - \eta_3 y_6 - (\xi_2 + \xi_3) y_3 + F_3}{M_3}$$

Escribiendo el sistema **4(B)** en forma matricial para obtención del método numérico, se tiene.

$$3(D) \quad \dot{y} = f(y, t)$$

Matriz 4.A.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\xi_1}{M_1} & \frac{\xi_1}{M_1} & 0 & -\frac{\eta_1}{M_1} & \frac{\eta_1}{M_1} & 0 \\ \frac{\xi_1}{M_2} & -\frac{\xi_1 + \xi_2}{M_2} & \frac{\xi_2}{M_2} & \frac{\eta_1}{M_2} & -\frac{\eta_1}{M_2} & 0 \\ 0 & \frac{\xi_2}{M_3} & -\frac{\xi_2 + \xi_3}{M_3} & 0 & 0 & -\frac{\eta_3}{M_3} \end{pmatrix}$$

Dando así lugar al Método de *Runge-Kutta* de cuarto orden

$$x(:, n + 1) = x(:, n) + (1/6) * (K1 + 2 * K2 + 2 * K3 + K4) \quad (4.3)$$

Donde **K1**, **K2**, **K3** y **K4** se obtienen de las soluciones en expansiones de Taylor y (**n**) es una variable de almacenamiento, que al inicio es igual a la unidad. Una vez mostrado el método *Runge-Kutta* de cuarto orden, se procedió a ejecutarlo en el software de MATLAB, esto con la intención de comparar datos experimentales que ya se tenían, con los datos numéricos de salida y las curvas de desplazamiento.

A continuación se presenta un diagrama de bloques del proceso y funcionamiento del programa numérico mencionado en los párrafos anteriores (Figura 28). En el diagrama de flujo mostrado a continuación, se puede apreciar que se anexa a la programación la **Ecuación 4D** en forma expandida o bien la **Matriz 4.A**, también se

agregó la función de archivo M “`function f=F3m (x,C,F)`” para poder resolver las operaciones de las matrices sobre el programa.

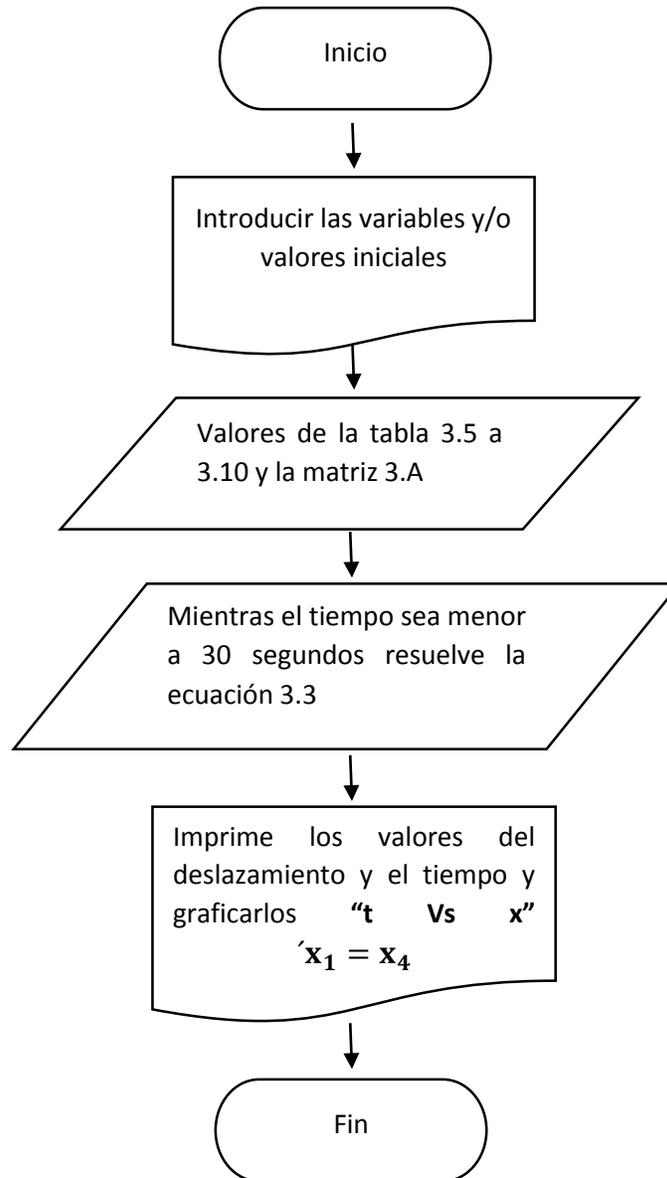


Figura 28. Diagrama de flujo para la resolución numérica en MATLAB.

4.5 Decremento logarítmico en Matlab

El decremento logarítmico, como se hace mención en el apartado 3.14, sirve para verificar la caída de cada uno de los ciclos vibrantes en la señal de amortiguamiento. Este momento se hace un código numérico en Matlab para comprobar la caída sufrida en cada material, y con ello analizar e inspeccionar el comportamiento de los valores paramétricos, de forma individual; el amortiguamiento es variable en un 5% en cada uno de los materiales. A continuación se realiza un diagrama de flujo para el algoritmo que analizó el amortiguamiento (figura 29).

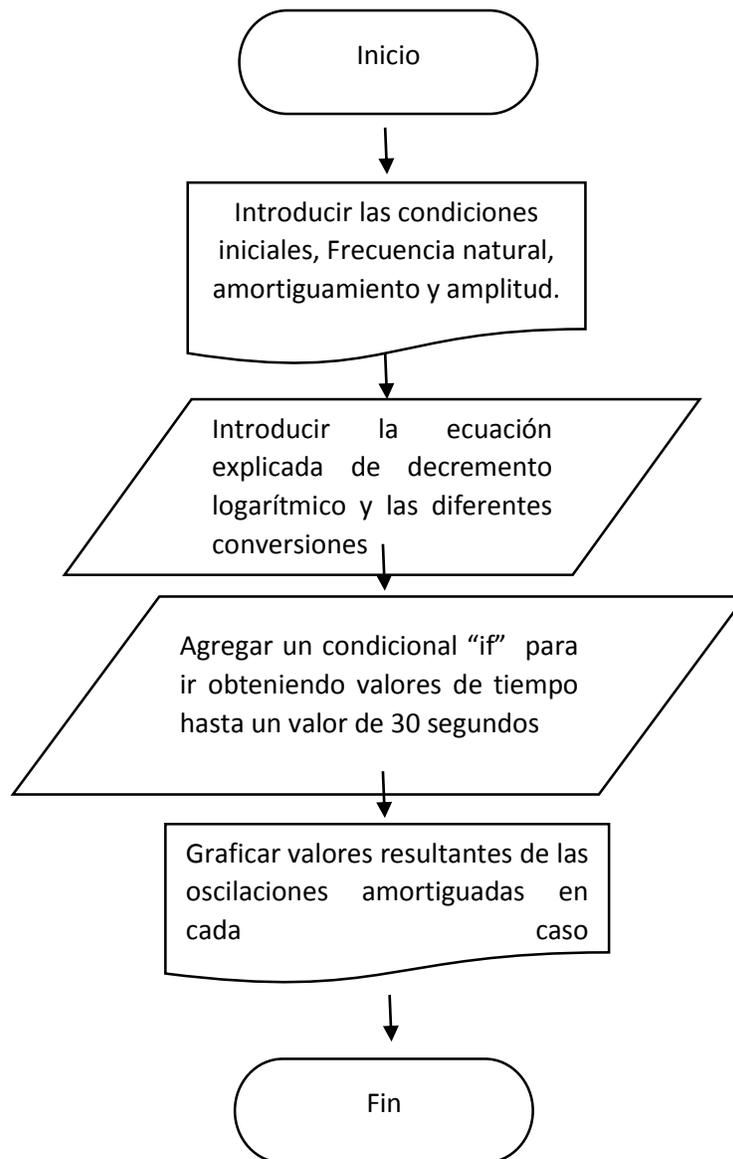


Figura 29. Diagrama de flujo para la resolución numérica de decremento logarítmico en MATLAB.

4.6 Método de newton-Rapshon

Este método es de suma importancia en método en métodos numéricos para encontrar raíces o aproximaciones de estas, a funciones que son derivables. En este apartado se explica la metodología de forma numérica, elaborada con código de Matlab para verificar los valores en las raíces, con los parámetros obtenidos en el método con el modelo matemático de Burger, explicado en este capítulo. Una vez encontrados los RMS o media cuadrática de la diferencia de los datos experimentales y los obtenidos numéricamente mismos que fue muy cercana a cero, a partir de la función de esta diferencia, se procede obtener la raíz mencionada. A continuación se registra un diagrama de flujo, utilizado para encontrar las raíces en las funciones propuestas en un principio, Figura 30.

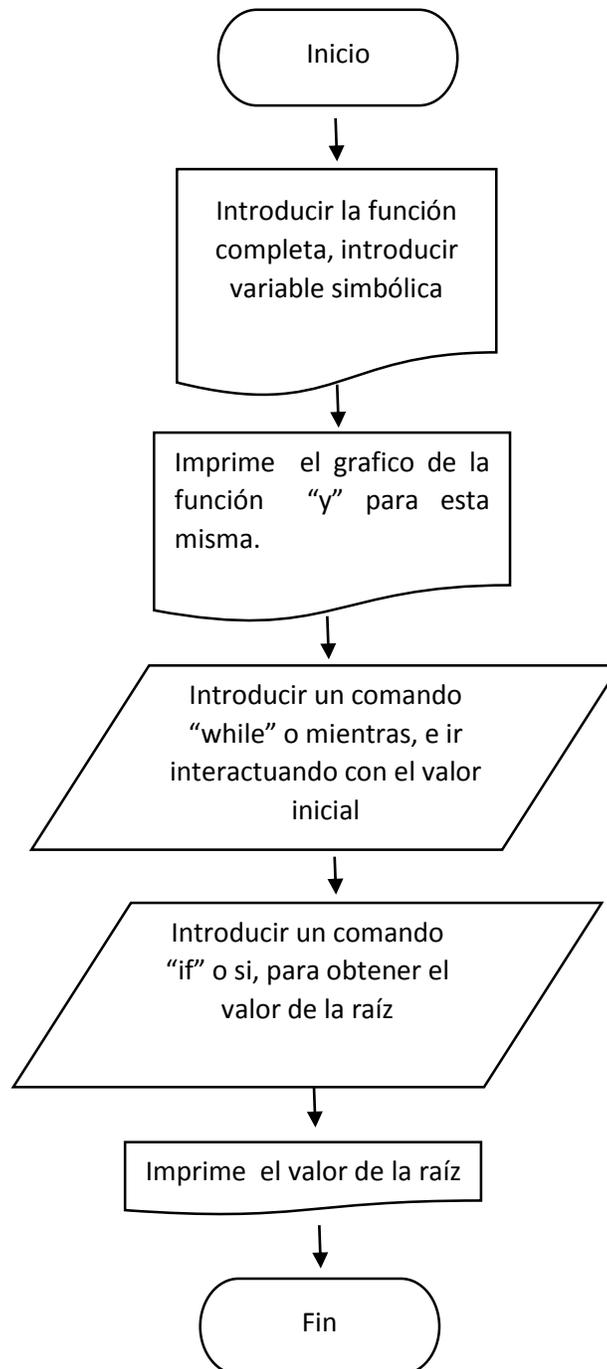


Figura 30. Diagrama de flujo para la resolución numérica de raíces en MATLAB.

4.7 Pruebas dinámicas a impacto

A comparación de las pruebas cuasi-estáticas, la velocidad de esta prueba es la que cobra relevancia en este apartado. La velocidad de impacto es la que se puede controlar definiendo el ángulo y por lo tanto la altura del brazo del péndulo Charpy.

El objetivo en este capítulo es evaluar la energía que se disipa a diferentes ángulos de caída, aplicando el concepto del coeficiente de restitución e histéresis, mismo que se ha mencionado en el capítulo anterior. Con esto se busca verificar los datos obtenidos en la prueba cuasi-estática, y si es así, la metodología numérica usada en el Capítulo 3 será aceptada para pruebas futuras.

4.8 Banco para pruebas y señales dinámicas

Actualmente se realizan las pruebas dinámicas con el péndulo modificado mencionado en el Capítulo 3, para esto es necesario hacer mención a grandes rasgos de las características de los sensores utilizados.

El efecto Hall es la generación de un campo eléctrico en un conductor, que está sometido a un campo magnético, que es atravesado por una corriente eléctrica. Definido este principio, mismo que se utiliza en estos sensores para medir la cantidad de impacto, se explican las características. En primera instancia, la celda de carga que es un sensor piezoeléctrico de material cristalino, con un rango de carga 500 lbf, una sensibilidad de 11.38 mV/lbf, linealidad $<\pm 1:0$ % FSO, modelo 9712A500 y temperatura -55 a 120° C, (Figura 31). Esta es la encargada de medir la magnitud del primer impacto, así como los siguientes. El sensor de efecto Hall se utiliza para conocer el ángulo de la aplicación de carga previo al impacto, así como los ángulos posteriores al impacto (Quiñónez, 2009).



Figura 31. Sensor de fuerza.

Para el procesamiento de señales enviadas, se utilizó un adquisidor de datos NI PXI 1031 de National Instruments, mismo que cuenta con 4 módulos, PXI 8381 (Módulo de interfaz), PXI 4472B (Módulo de sonido y vibración), PXI 6722 (Módulo de salida analógica de alta velocidad), PXI 4220 (Módulo de entrada puente/Tensión), (figura 32), (Hernández, 2019).



Figura 32. Adquisidor de datos NI PXI 1031.

Para obtener una amplificación de señal aumentada en la salida, se hizo uso de un amplificador de carga de modo dual Kistler TIPO 5010, (Figura 33).



Figura 33. Amplificador de señales Kistler 5010.

Es esencial que la instrumentación mencionada, esté funcionando en perfectas condiciones, para que los resultados sean lo más preciso posible. Para ello fue necesario realizar una calibración de los sensores y adquirente de datos. Para ello se utilizó un amplificador de carga y unidad de adquisición de datos para mediciones dinámicas “Kistler LabAmp”, modelo *Type 5165A SN 4981779*. Además no solo es un excelente amplificador de carga con bajo nivel de ruido para señales dinámicas, sino que también es un potente dispositivo de adquisición de datos que entrega los valores de medición digitalizados directamente a una computadora *host* para su posterior análisis. Se configura y opera en una interfaz web, fácilmente accesible mediante un navegador web estándar (Electronics & Software, Kistler), (Figura 34).



Figura 34. Amplificador “Kistler LabAmp”, Type 5165A SN 4981779

A continuación se presenta el diagrama de la conexión de los instrumentos, para la obtención de la señal de impacto. El sensor Hall es alimentado con una tensión eléctrica de 5 volts y su vez envía la señal al adquirente de datos NI PXI 1031. La celda de carga envía una señal al amplificador pasando por unos filtros y se envía al módulo NI PXI 1031. Teniendo la señal de la posición angular dada por el sensor de efecto Hall y la magnitud de impacto dada por la celda de carga, el módulo NI PXI 1031 envía estas señales a una plataforma de LabView. El lenguaje de programación gráfico permite observar las señales en tiempo real, una vez

obtenidos los datos en LabView estos son enviados a Matlab y se graficó la información (Figura 35), (Hernández, 2019).

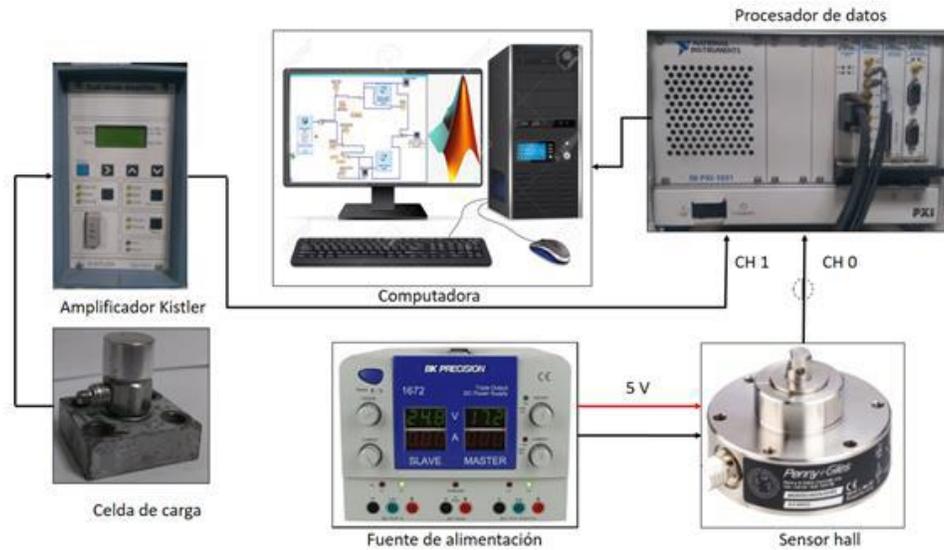
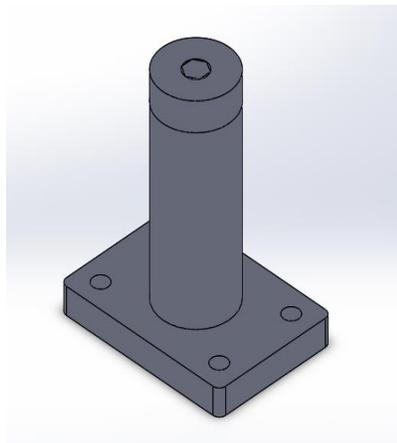


Figura 35. Diagrama de conexión (Hernández, 2019).

4.9 Metodología experimental dinámica

Mencionada la instrumentación y las características de los mismos, se procedió a realizar las pruebas dinámicas con este equipo. Para ello se construyó un soporte, metálico en su totalidad, el cual consta de una placa como base y una barra redonda laminada en frío, o bien, “Cold Rolled Steel” (Figura 36); las características y medidas se pueden ver en los anexos. Se monta en el péndulo Charpy y tiene una extensión ranurada en la parte delantera, que sirve para agregar el elastómero a analizar.



a)

b)

Figura 36. Soporte, a) Diseño de soporte metálico, b) Fotografía de soporte.

El montaje completo del dispositivo sobre el péndulo Charpy, se muestra en la Figura 37. De esta forma solo se hacía el cambio de los diferentes elastómeros para cada prueba.

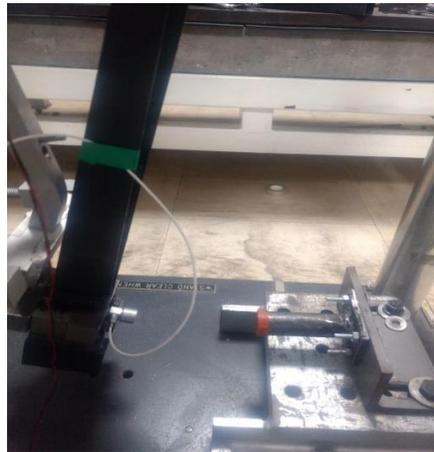


Figura 37. Montaje

El objetivo de estas pruebas dinámicas, como se mencionó anteriormente, es hacer la comparación de la energía disipada con los datos obtenidos en las pruebas cuasi-estáticas (Capítulo 3), para verificar que esta metodología sea la adecuada y se siga aplicando posteriormente. A continuación se sigue el método aplicado, este con diferentes ángulos como posición inicial, comenzando con un ángulo de 16° y posteriormente aumentado esta posición hasta los 22° :

1.- Se fijó el tope de impacto a la base del péndulo Charpy, el brazo del péndulo fue colocado a 16° con respecto a la vertical de su punto de giro y se realizaron las pruebas para cada material, montando y desmontando el mismo (Figura 38).

2.- Para cada material se realizó la prueba a 16° , 18° , 20° y 22° ; en cada ensayo se guardaron los diferentes datos y gráficos de las fuerzas y los ángulos subsecuentes después de cada impacto.

3.- Los datos extraídos se conocieron gracias al software de LabView y, los gráficos en coordinación con Matlab, como se mencionó anteriormente.

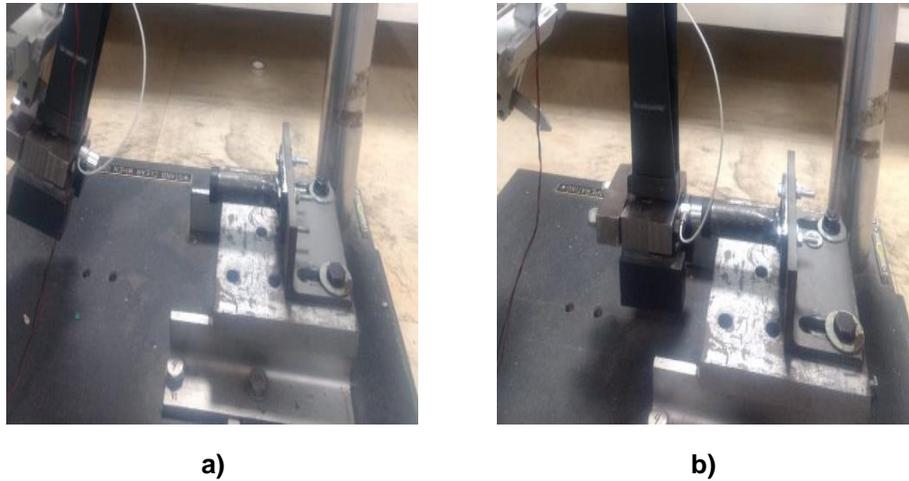


Figura 38. a) Péndulo antes de impactar, b) Péndulo al momento del impactar.

4.10 Metodología para resultados dinámicos

En primera instancia, se realizó el cálculo de energía de entrada al sistema, el cual tiene que ver con la masa y configuración de la altura del brazo pendular, mismo que se obtiene con la Ecuación (2.35). Para esto también se aplica la Ecuación (2.32) con el primer rebote del brazo pendular, el cual se obtiene visualmente de las gráficas en Matlab, figura 39.

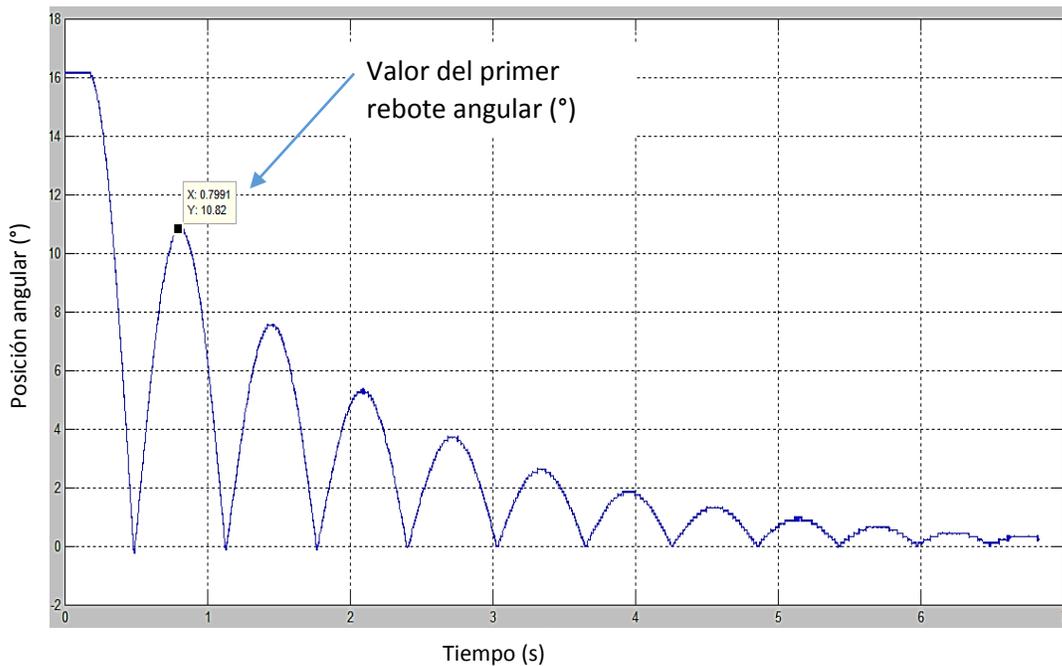


Figura 39. Posición angular de los rebotes del péndulo.

La disipación de energía del sistema, se obtuvo con la Ecuación (2.34), que es la diferencia de energía antes y después del primer impacto. La velocidad angular inicial del péndulo también es importante para llegar a datos posteriores, misma que se encontró con la Ecuación (2.36), donde se tomó en consideración la masa del péndulo. La velocidad lineal del péndulo antes del impacto, es el producto de la velocidad angular inicial y la distancia del péndulo y se llegó a ella con la Ecuación (2.37).

Para la obtención de la velocidad angular final del péndulo fue necesario hacer uso de la Ecuación (2.43), esta fue importante para la velocidad lineal del péndulo después del impacto y se calculó con la Ecuación (2.39). Por último, con estos cálculos realizados y datos obtenidos se obtuvo la velocidad lineal del dispositivo analizado con la Ecuación (2.40), y se puede comprobar el coeficiente de restitución (2.38), utilizado en un principio.

La fuerza de impacto se puede comparar de forma analítica, haciendo uso de la ecuación (2.45) y la gráfica que arrojada con los datos en Matlab, Figura 40, y con los datos experimentales. Esto con intención de verificar que el margen de error del sensor que mide la fuerza de efecto Hall no sea tan alejado.

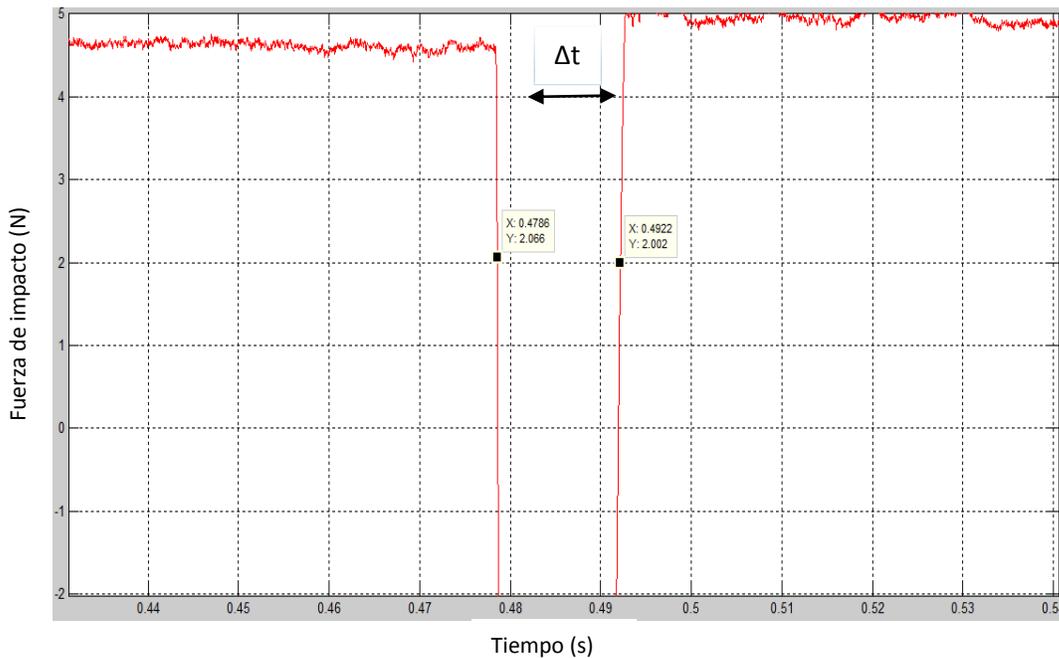


Figura 40. Duración del tiempo de impacto.

4.11 Comparación de la fuerza de impacto en Matlab

La fuerza de impacto se obtiene automáticamente en el software que se tiene predispuesto (ver el apartado 4.2 de este capítulo). Para la comparación y verificación de esta señal, se programó deliberadamente un código en Matlab, mismo que rectificó numéricamente el comportamiento de la fuerza de impacto, números de impacto, así como el tiempo en el que ocurren los mismos. A continuación se dibuja un diagrama de flujo que representa los pasos para llegar a los resultados requeridos, ver figura 41.

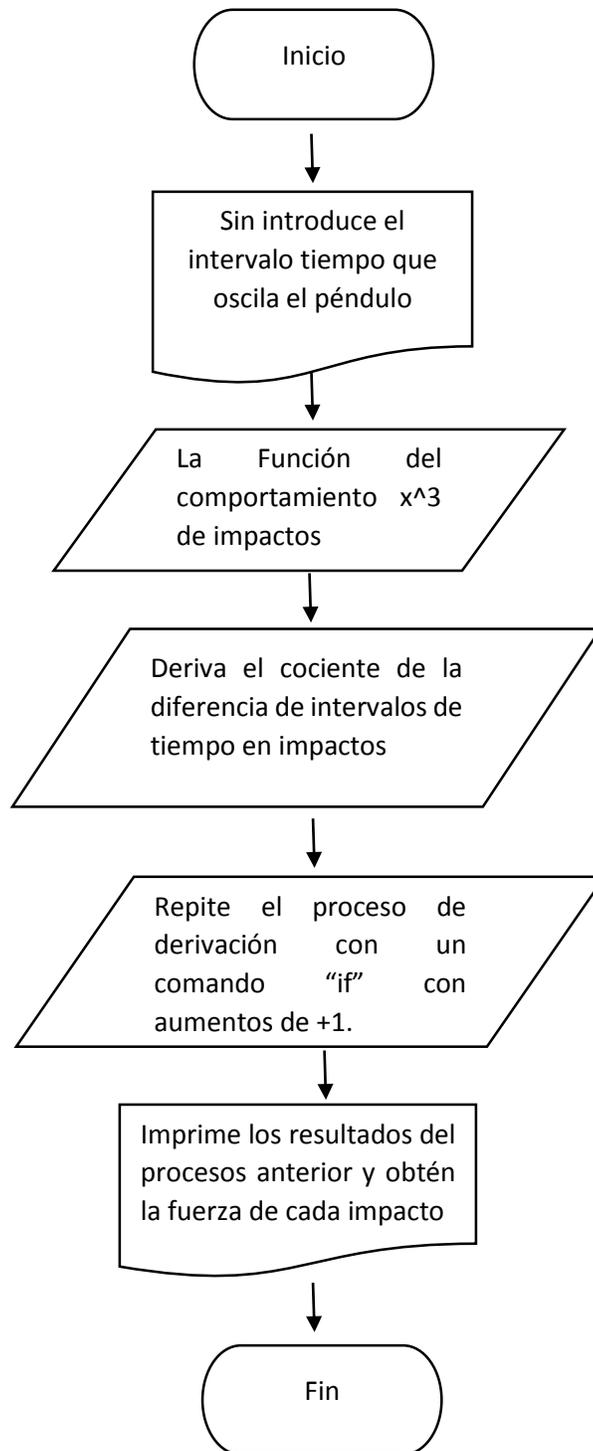


Figura 41. Diagrama de flujo para la fuerza de impacto en MATLAB.

Capítulo 5

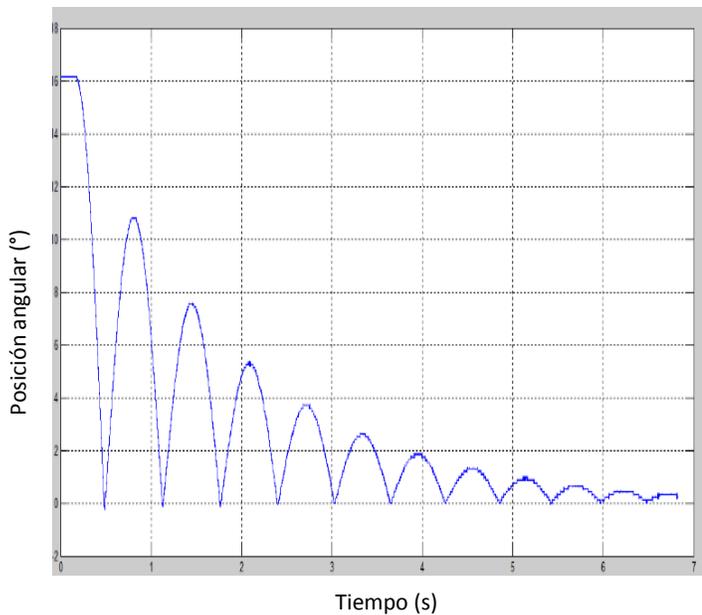
Resultados

En esta parte se presentan los resultados obtenidos de las pruebas cuasi-estáticas y dinámicas, mismas que se realizaron con los diferentes elastómeros, sometidos a diferentes ángulos de caída libre con el péndulo Charpy, y velocidades de 3 mm/s a compresión.

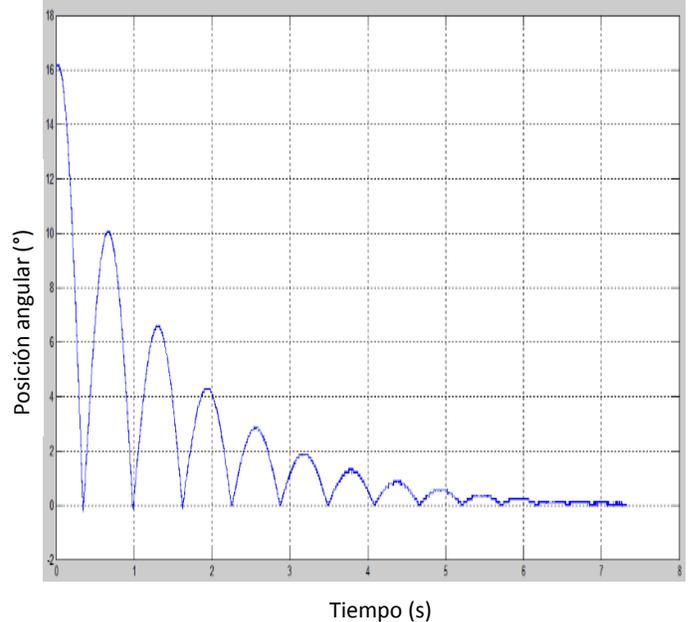
5.1 Gráficos de pruebas experimentales dinámicas

Se hace un breve resumen y comparación de los datos experimentales, obtenidos en la prueba con el péndulo Charpy, mismos que se representan en forma gráfica, siendo la posición angular y la fuerza de impacto en función del tiempo de los diferentes materiales las variables visibles. En las gráficas de la Figura 42, se notan las diferentes posiciones angulares después de tener un ángulo de caída a 16° , misma posición aplica para los 3 especímenes ensayados en este proyecto de investigación.

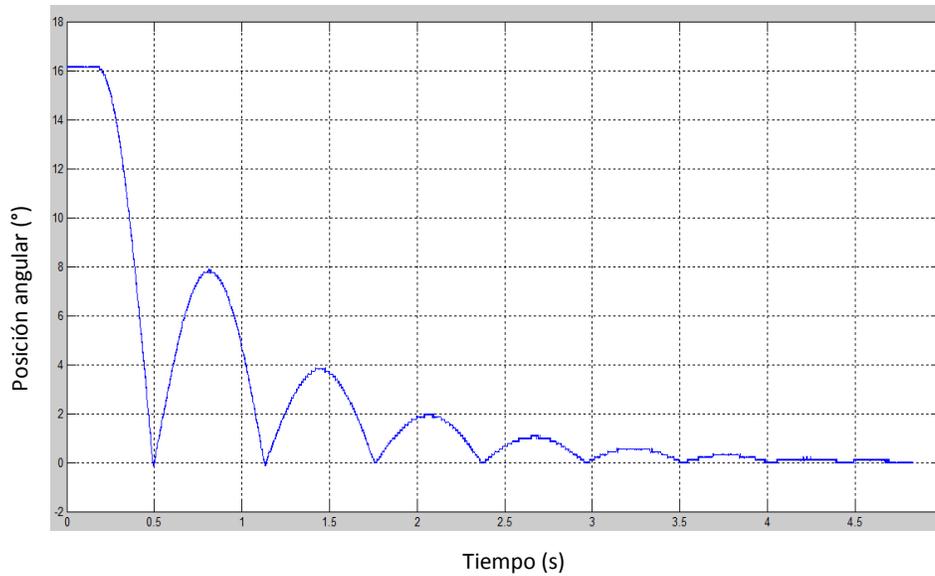
Siendo la figura 42 **a)** el espécimen de hule, **b)** el espécimen de silicón-Neopreno y **c)** el de Poliuretano. El golpe de impacto logra disiparse en función del tiempo en los tres casos, en donde se disipan los impactos en el espécimen número tres en una menor cantidad de impactos y se observa que el comportamiento en el mismo, es más absorbente que los dos materiales restantes.



a)



b)



c)

Figura 42. Posición angular para 16°. a) espécimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.

En los gráficos de las Figuras 43, se aprecian las diferentes caídas angulares después del primer impacto de caída 22°, la misma posición es aplicable en los tres tipos de materiales ensayados. Partiendo de la figura 43 **a)**, que representa el espécimen de hule o número uno, **b)** el espécimen de silicón-Neopreno y **c)** el número tres que representa al de Poliuretano. El impacto se disipa completamente en función del tiempo, como el caso de los 16° o anterior. Se aprecia que se disipan los impactos en el espécimen número tres con una menor cantidad de rebotes, e igualmente que en el caso anterior, se observa que el comportamiento en el mismo es más absorbente que los dos especímenes.

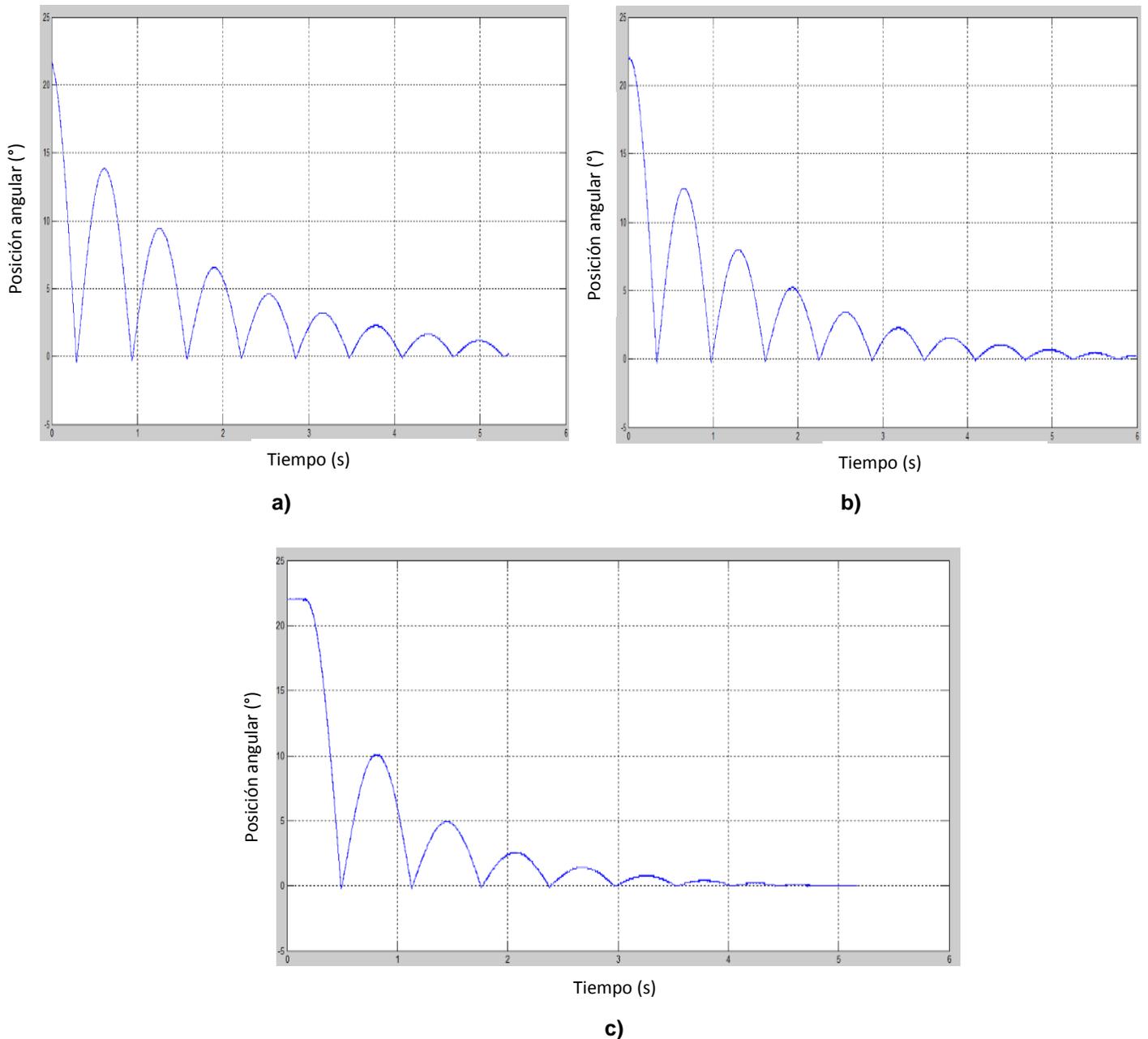


Figura 43. Posición angular para 22°. a) espécimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.

Los gráficos mostrados en las figuras 44, tienen por objetivo mostrar la fuerza con la que impacta el péndulo de Charpy; las posiciones de caídas son a 16°, mostradas para los tres diferentes materiales. La fuerza de impacto disminuye drásticamente en el espécimen número tres, los impactos son pocos y de fuerzas pequeñas. También se puede notar que el primer impacto, observando la fuerza, es mucho mayor comparada con los dos especímenes número uno y dos.

En el espécimen número uno, es decir en **a)**, el impacto es menor comparado con los anteriores y la forma de la disminución de la fuerza es más lineal de forma descendente que los casos de los materiales restantes. El orden con que se muestran las figuras son; **a)** material de hule, **b)** material de Silicón-Neopreno y **c)** Poliuretano.

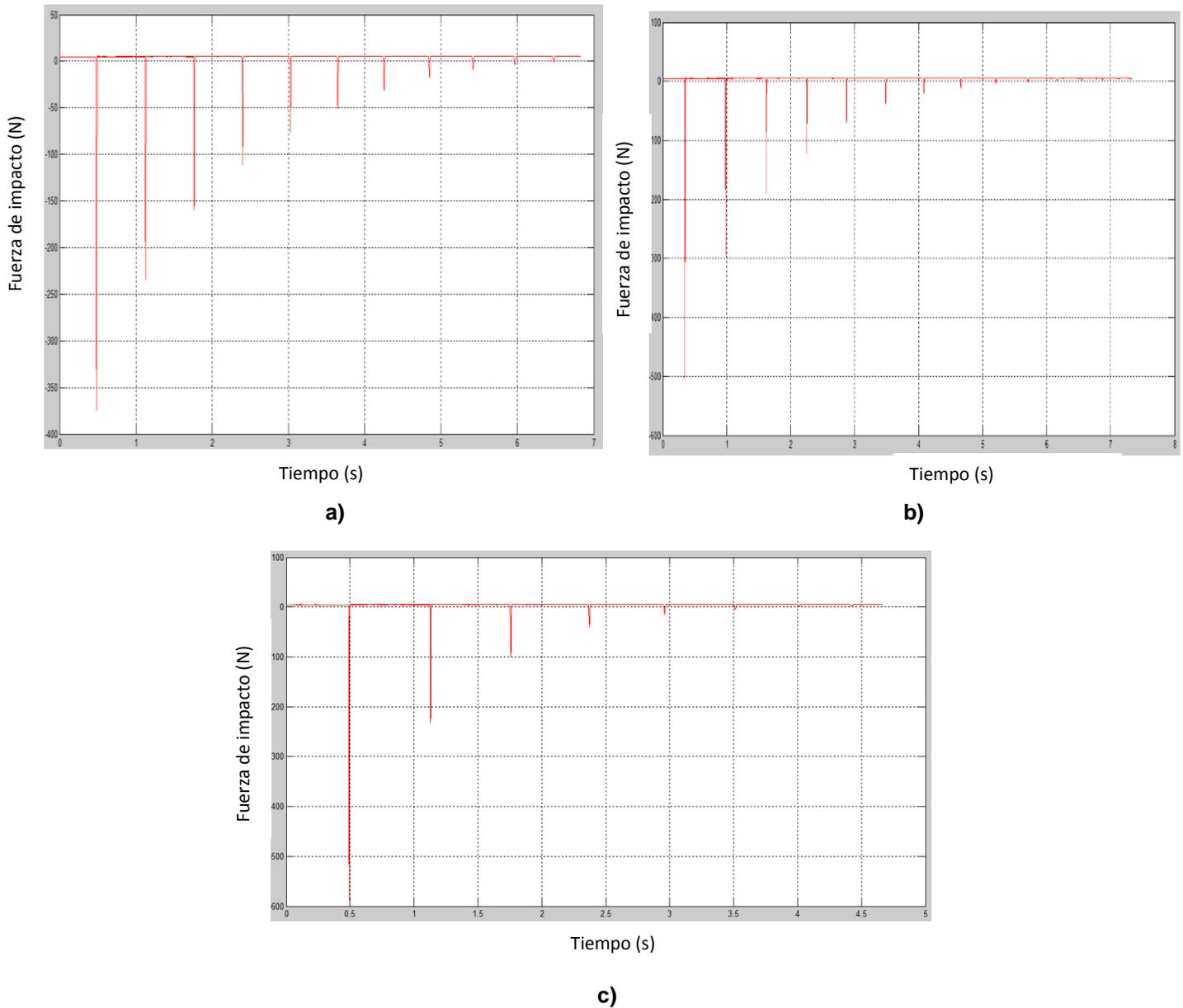


Figura 44. Fuerza de impacto para 16°. a) Especimen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.

Tal como en los 16° de posición angular, también en la fuerza de impacto se hace la comparación a 22° . En las gráficas mostradas en las figuras 45, se hace notar las diferentes fuerzas, con la que impacta el péndulo de Charpy, en función del tiempo; las posiciones de caídas son a 22° , para los tres diferentes materiales. La fuerza de impacto disminuye notablemente desde el primer impacto en el espécimen número tres, los impactos subsecuentes son pocos y de fuerzas pequeñas, comparando con los dos especímenes número uno y dos.

Para este caso, se observa que ocurre algo muy similar que en la posición a 16° , ya que, en la probeta número uno, es decir en **a)**, el impacto es menor comparado con los anteriores y la forma de la disminución de la fuerza es más lineal de forma descendente que los casos de los materiales rasantes. Donde; **a)** material de hule, **b)** material de Silicón-Neopreno y **c)** Poliuretano.

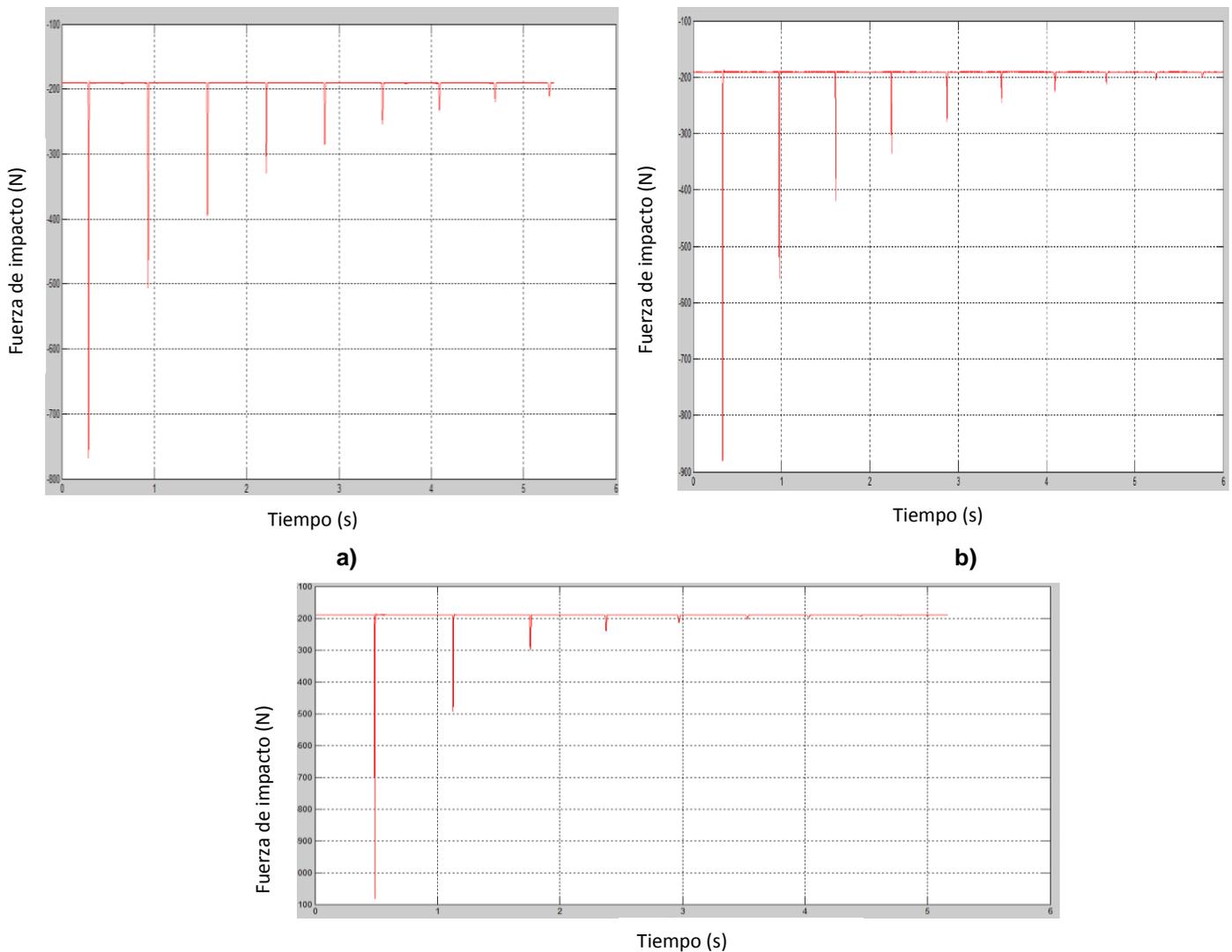


Figura 45. Fuerza de impacto para 22° . a) Especímen número uno, b) espécimen número dos y c) espécimen número tres.

El decremento de la fuerza de impacto se muestra en las Figuras 46, estas se obtuvieron de forma numérica para verificar resultados. Se puede observar y comparar estos mismos resultados de decremento de fuerza, con los obtenidos experimentalmente, el comportamiento en cuanto a las curvas es similar.

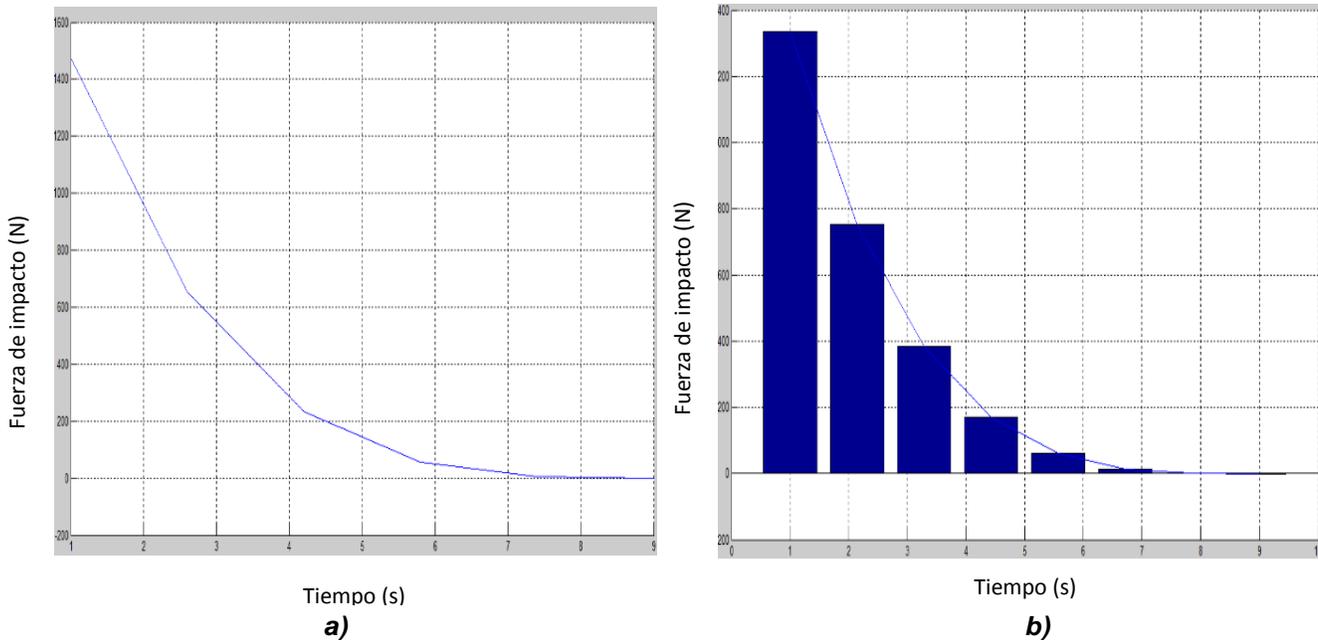


Figura 46. Fuerza de impacto a) Decremento de impacto b) decremento en barra azul de impacto.

Cabe mencionar que las pruebas hasta aquí plasmadas, se realizaron con más posiciones angulares, desde 16° hasta 22° . Las pruebas restantes y que aquí no se plasman, para un ahorro de espacio, se asemejan al comportamiento de las explicadas hasta ahora, es por esta razón y porque no es tan relevante como tal mostrarlas en este trabajo de investigación. En el próximo capítulo se hace un análisis más a fondo y se discuten los resultados tanto de estas gráficas como las gráficas de pruebas cuasi-estáticas.

5.2 Datos de pruebas dinámicas

Las pruebas dinámicas para los diferentes materiales y volumen, se muestran a continuación, destacando lo mencionado anteriormente que los materiales solo cambian de volumen pero no de forma.

En las Tablas 11 y 12 se muestran los resultados de las pruebas dinámicas de los dos volúmenes de material, obtenidos para la posición inicial a 16° , los cuales son: ángulo de restitución, la disipación de energía, el porcentaje de disipación de

energía, la energía de entrada al dispositivo, en una velocidad de 0.930 m/s, para después hacer las observaciones pertinentes y tener conclusiones de los mismos.

Tabla 11. Datos de las muestras a 16° volumen uno

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.508	0.1383	373.2	0.4587	27.202
2	0.508	0.1563	504.3	0.3969	30.743
3	0.508	0.1966	583.5	0.2480	38.670

Tabla 12. Datos de las muestras a 16° volumen dos.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.508	0.1383	342.3	0.4587	27.202
2	0.508	0.1563	355.3	0.3969	30.743
3	0.508	0.1966	530.7	0.2480	38.670

En las Tablas 13 y 14 se muestran los resultados de las pruebas dinámicas de los dos volúmenes de material, obtenidos para la posición inicial a 18°, los cuales son: ángulo de restitución, la disipación de energía, el porcentaje de disipación de energía, la energía de entrada al dispositivo, y la velocidad de 1.0513 m/s, para después hacer las observaciones pertinentes y tener conclusiones de los mismos.

Tabla 13. Datos de las muestras a 18° volumen uno.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.6439	0.1965	427.7	0.6243	30.520
2	0.6439	0.2100	547.8	0.5837	32.626
3	0.6439	0.2473	657	0.4802	38.416

Tabla 14. Datos de las muestras a 18° volumen dos.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.6439	0.1965	365.8	0.6243	30.520
2	0.6439	0.2100	388.7	0.5837	32.626
3	0.6439	0.2473	551	0.4802	38.416

En las Tablas 15 y 16 se notan los resultados de las pruebas dinámicas aplicadas a los dos volúmenes del material, resultantes para la posición inicial a 20°, los cuales son: ángulo de restitución, la disipación de energía, el porcentaje de disipación de

energía, la energía de entrada al dispositivo, y la velocidad de 1.1670 m/s, para después hacer las observaciones pertinentes y tener conclusiones de los mismos.

Tabla 15. Datos de las muestras a 20° volumen uno.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.8168	0.2049	508.2	0.6740	25.085
2	0.8168	0.2473	658.2	0.6076	30.288
3	0.8168	0.3050	771.6	0.4779	37.342

Tabla 16. Datos de las muestras a 20° volumen dos.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.8168	0.2049	426.2	0.6740	25.085
2	0.8168	0.2473	458.1	0.6076	30.288
3	0.8168	0.3050	771.6	0.4779	37.342

En las Tabla 17 y 18 se hacen notar los resultados de las pruebas dinámicas de los diferentes volúmenes, resultantes para la posición inicial a 22°, los cuales son: ángulo de restitución, la disipación de energía, el porcentaje de disipación de energía, la energía de entrada al dispositivo, y la velocidad de 1.2827 m/s, para después hacer las observaciones pertinentes y tener conclusiones de los mismos.

Tabla 17. Datos de las muestras a 22° volumen uno.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.9883	0.2880	767.7	0.6363	29.144
2	0.9883	0.3220	878.3	0.5705	32.583
3	0.9883	0.3762	1080	0.2112	38.070

Tabla 18. Datos de las muestras a 22° volumen dos.

No de espécimen	Energía de entrada J	Energía disipada J	Fuerza del primer impacto N	Coefficiente de restitución	Porcentaje de energía disipada %
1	0.9883	0.2880	459.2	0.6363	29.144
2	0.9883	0.3220	498.4	0.5705	32.583
3	0.9883	0.3762	812.5	0.2112	38.070

Para los volúmenes distintos de material, en pruebas dinámicas, los resultados fueron muy similares, de hecho son los mismos en todos los casos, excepto en la fuerza de impacto; los valores varían un poco, este hecho no cambia que el comportamiento del material se siga definiendo como lo ha venido haciendo.

5.3 Datos experimentales en la máquina universal a tensión compresión con ciclos marca *Shimadzu*

Los datos y gráficos obtenidos de la prueba cuasi-estática se enlistan en las siguientes páginas. Cabe destacar que el modo de ensayo fue a control manual y la velocidad de ensayo para los tres tipos de materiales fue de 3 mm/min para obtener las curvas de histéresis. En el caso de la aplicación de la fuerza constante, el modo fue manual, la velocidad de 11.2 N/s, con una fuerza de 1400 N aplicada a un tiempo de 125 segundos para cada espécimen.

En los anexos A, las Tablas 1 y 4A muestran un informe completo adquirido con la base de datos del software del sistema, empleado para una conexión con el equipo de prueba. En dicho informe se presenta, desde la fecha hasta características muy específicas, como geometría, velocidad cuasi-estática de prueba, así como el modo de ensayo y tipo de prueba de los elastómeros. Las tablas referidas, muestran de forma generalizada los datos de adquisición obtenidos.

Como se ha mencionado, se trata de pruebas a ciclos, lo que significa que hay desplazamientos iguales tanto positivos como negativos. En este caso, por las dimensiones mencionadas, el desplazamiento de cada ciclo fue constante, es decir, de 3 mm cada uno.

Es importante resaltar que se muestran solo datos de interés para este análisis. En este caso, se observaron: el porcentaje (%) de deformación, la fuerza (F) aplicada en dicho desplazamiento (ϵ), la tensión (σ_1) utilizada y, muy importante, el tiempo (t) en que ocurre todo lo anterior.

En las figura 47, se muestra el desplazamiento (ϵ) inicial y máximo que, como se dijo, es de 3 mm vs la fuerza aplicada en (N), de cada uno de los tres ciclos aplicados para dos volúmenes diferentes del mismo material. Cabe destacar que el área encerrada por los ciclos en cada desplazamiento, es llamada *ciclo de histéresis*, la cual representa la energía que el sistema logra disipar o eliminar a través de amortiguamientos, viscosos o de otros tipos (Rao, 1990).

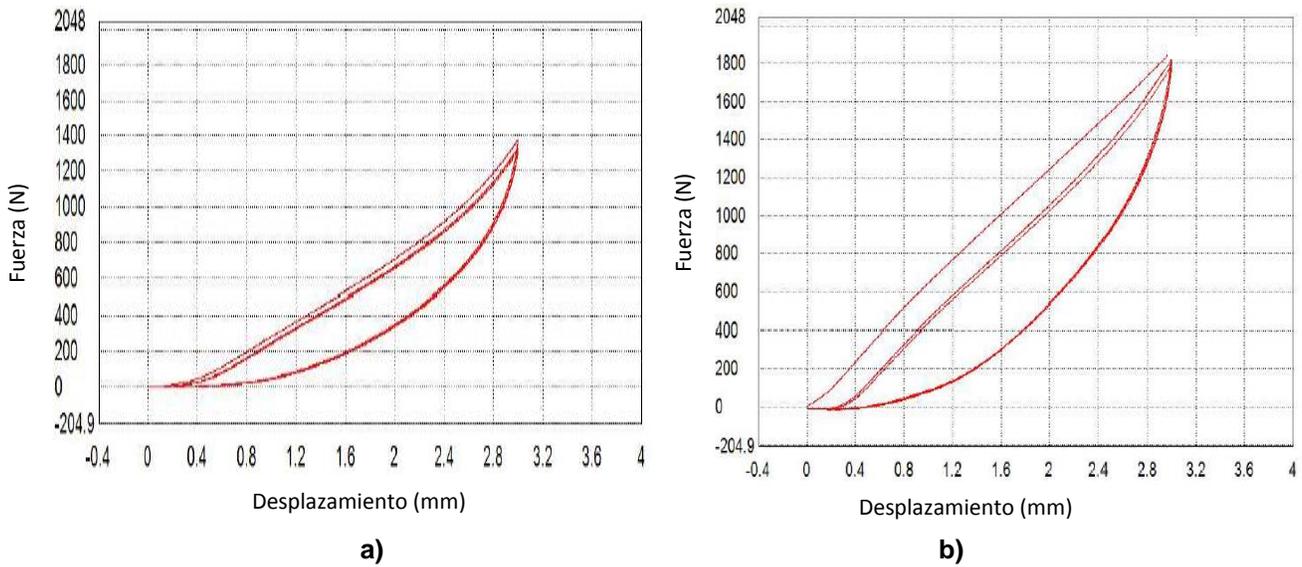


Figura 47. Fuerza vs deformación a ciclos. a) Vol. 1. b) Vol. 2.

Los gráficos de la figura 48, muestran el porcentaje (%) de deformación inicial y máximo vs la tensión (σ) aplicada para el espécimen número uno de cada uno de los tres ciclos realizados para volumen diferente de material.

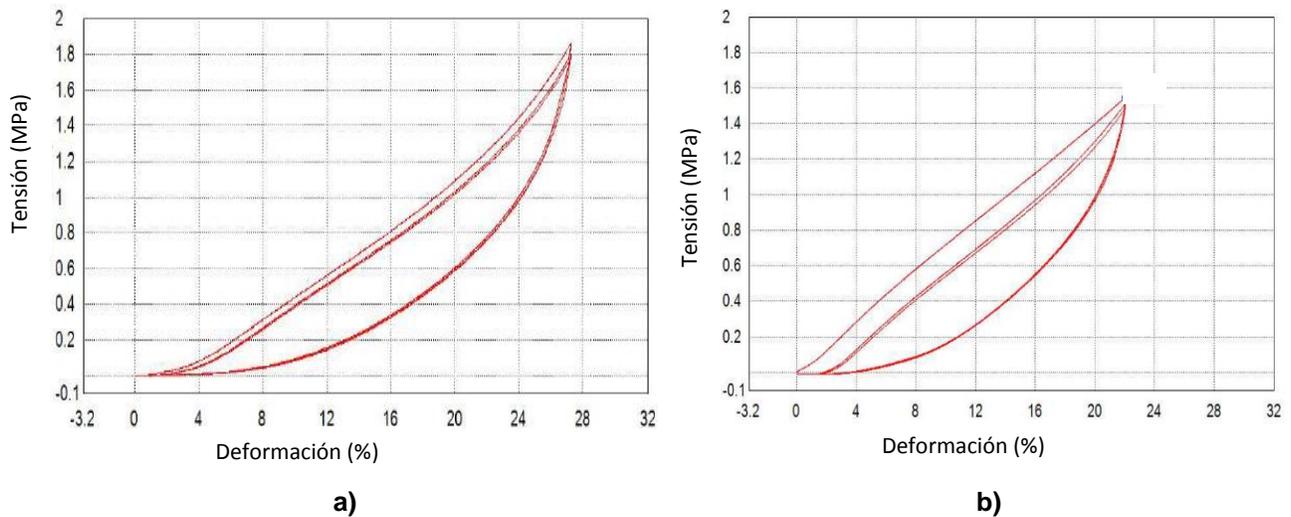


Figura 48. Tension vs porcentaje de deformación a ciclos. a) Vol. 1. b) Vol. 2.

En las Tablas 2 y 5A del Apéndice A, se muestra un informe, adquirido con la base de datos del sistema, empleado para una conexión con el equipo de prueba. Incluye desde la fecha, hasta características específicas, como geometría, velocidad cuasi-

estática de prueba, el modo de ensayo y tipo de prueba del elastómero número dos. Esta tabla, muestra de forma generalizada los datos de adquisición. Se trata de pruebas a ciclos, lo que implica, desplazamientos iguales positivos y negativos. En este caso, por las dimensiones mencionadas, el desplazamiento de cada ciclo fue de 3 mm cada uno.

En la figura 49, se muestra el desplazamiento (ϵ) inicial y máximo que, como se explicó, es de 3 mm vs la fuerza aplicada en (N), en los tres ciclos aplicados para diferentes volúmenes. Esta área, llamada *ciclo de histéresis*, representa la energía que el sistema disipa o elimina a través de amortiguamiento viscoso u otros amortiguamientos (Rao, 1990).

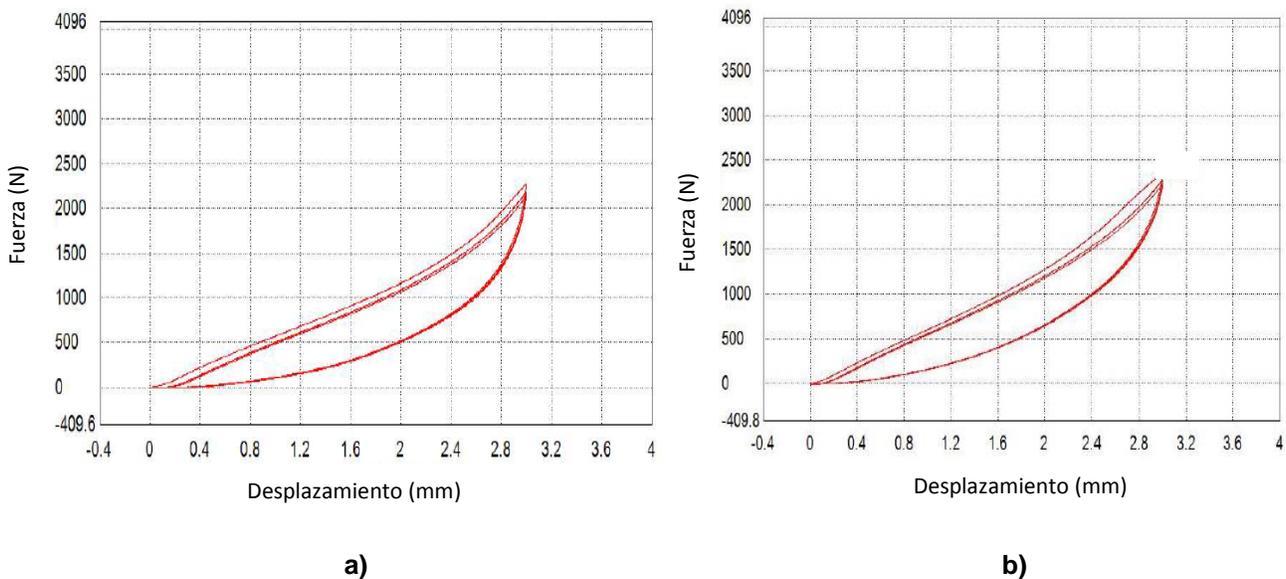


Figura 49. Fuerza vs Deformación a ciclos. a) Vol. 1. b) Vol. 2.

Los gráficos de la figura 50, muestran el porcentaje (%) de deformación inicial y máximo vs la tensión (σ) aplicada para el espécimen número dos, de cada uno de los tres ciclos realizados en diferentes volúmenes de material.

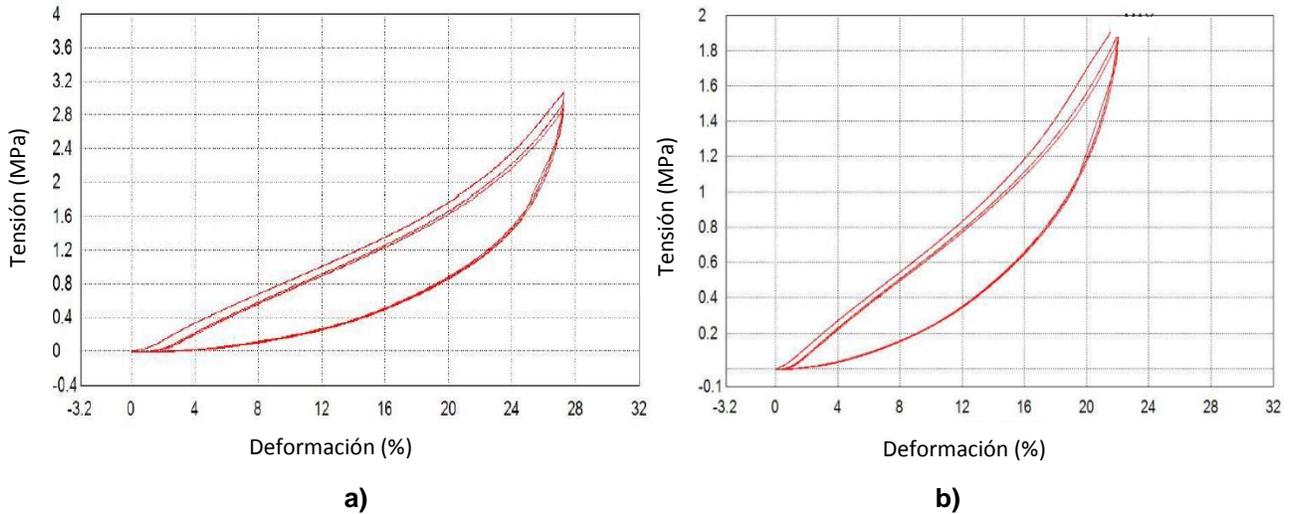


Figura 50. Tension vs Porcentaje de Deformación a ciclos. a) Vol. 1. b) Vol. 2.

En las Tablas 3 y 6A, del Apéndice A, se muestra un informe adquirido con la base de datos del sistema; se presenta desde la fecha, hasta características muy específicas, como geometría, velocidad cuasi-estática de prueba, también el modo de ensayo y tipo de prueba del elastómero número tres con volúmenes diferentes. Se trata de pruebas a ciclos, lo que significa que hay desplazamientos iguales tanto positivos como negativos. En este caso, por las dimensiones ya dichas, el desplazamiento de cada ciclo fue constante, es decir, de 3 mm cada uno.

En los gráficos de la figura 51, se muestra el desplazamiento (ϵ) inicial y máximo en mm que, como se menciona, es de 3 mm vs la fuerza aplicada en (**N**) de cada uno en los tres ciclos aplicados. Según (Rao, 1990), el área encerrada por los ciclos en cada desplazamiento, es llamada *ciclo de histéresis*, la cual representa la energía que el sistema logra disipar o eliminar a través de amortiguamiento viscoso u otros tipos de amortiguamientos.

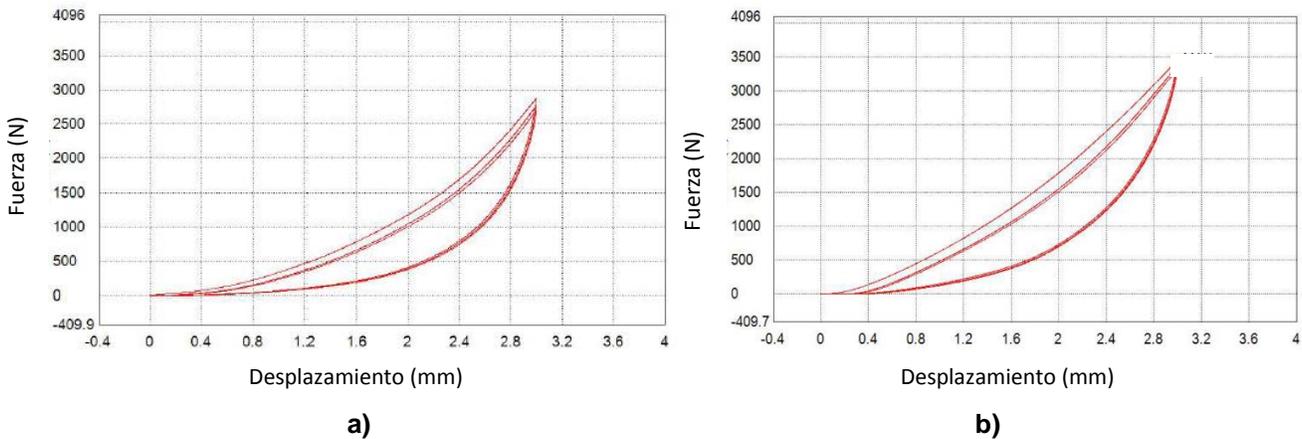


Figura 51. Fuerza vs Deformación a ciclos. a) volumen uno. b) volumen dos.

En los gráficos la figura 52, se muestra el porcentaje (%) de deformación inicial y máximo vs la tensión (σ) aplicada sobre el espécimen número tres, de cada uno de los tres ciclos realizados.

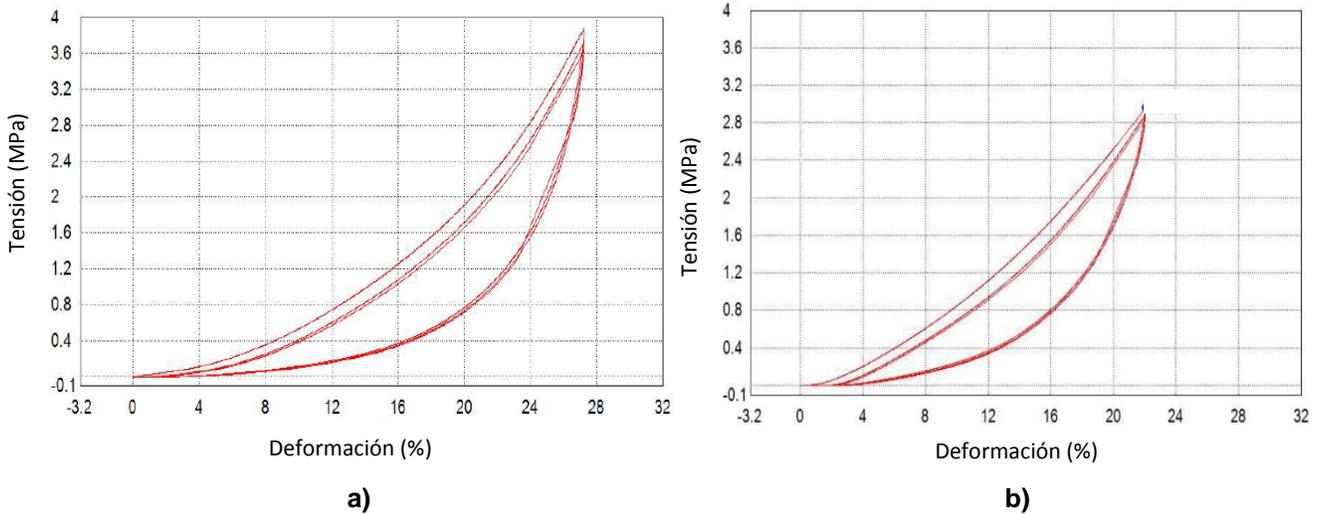


Figura 52. Tension vs porcentaje de deformación a ciclos. a) Vol. 1. b) Vol. 2.

5.4 Parámetros obtenidos a partir de modelos reológicos

Las Tablas 19 a la 24 presentan los parámetros numéricos caracterizados para los diferentes especímenes de diferentes volúmenes, el procedimiento para la obtención de estos parámetros se explicó en el capítulo 4 de este documento.

Tabla 19. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 1. Vol. 1.

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	25	MPa	25,000,000	Pa
ηM	0.25	MPa/s	250,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s

Tabla 20. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 1. Vol. 2

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	29	MPa	29,000,000	Pa
ηM	0.20	MPa/s	200,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.35	MPa	350,000	Pa
$\eta K-V$	0.00048	MPa/s	480	Pa/s

Tabla 21. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 2. Vol. 1

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	28	MPa	28,000,000	Pa
ηM	0.20	MPa/s	200,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s

Tabla 22. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 2. Vol. 2

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	32	MPa	32,000,000	Pa
ηM	0.15	MPa/s	150,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.35	MPa	350,000	Pa
$\eta K-V$	0.00048	MPa/s	480	Pa/s

Tabla 23. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 3. Vol. 1

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	84	MPa	84,000,000	Pa
ηM	0.15	MPa/s	150,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.30	MPa	300,000	Pa
$\eta K-V$	0.00050	MPa/s	500	Pa/s

Tabla 24. Parámetros numéricos con modelos reológicos Burger para el espécimen N° 3. Vol. 2

PARÁMETROS	VALORES NUMÉRICOS			
ξM	88	MPa	88,000,000	Pa
ηM	0.10	MPa/s	100,000	Pa/s
$\xi K-V$	0.35	MPa	350,000	Pa
$\eta K-V$	0.70	MPa/s	700,000	Pa/s

5.5 Gráficos obtenidos numéricamente (Runge- Kutta)

La Figura 53, muestra los gráficos de los desplazamientos (mm) descritos por el espécimen número uno de hule hasta un instante de 30 segundos a partir de la fuerza aplicada, la cual está sobre la masa efectiva, **a)** para el volumen uno de material y **b)** para el volumen dos de material. Se observa, que el amortiguamiento ($\eta 1$) en este material no es suficiente para suavizar la fuerza (**F1**) aplicada en la masa efectiva (**M3**), por lo que la deformación (y_3) en color rojo, oscila en un lapso de tiempo, su oscilación es mucho menor que las dos señales. Amortiguándose totalmente en un periodo de tiempo mucho menor a los dos restantes.

El desplazamiento (y_1) en este material, está dado de tal forma que en un principio, las oscilaciones son muy grandes (color verde), de hecho mayor a todas en un

periodo de tiempo. Estas oscilaciones se comienzan a suavizar en un lapso de 20 segundos, se nota que no se ha amortiguado por completo aplicando la misma fuerza (**F1**); en la masa efectiva (**M1**), solo se tiene el amortiguamiento ($\xi 1$) de por medio. Para el desplazamiento (y_2), se presenta una oscilación mucho menor que la anterior en un principio (color azul), se tienen los parámetros de amortiguamiento ($\eta 1$) y de rigidez conectados en paralelo, aplicando la misma fuerza (**F1**) a la masa efectiva (**M3**), de tal forma que estas oscilaciones se suavizan por completo en un tiempo de 22 segundos.

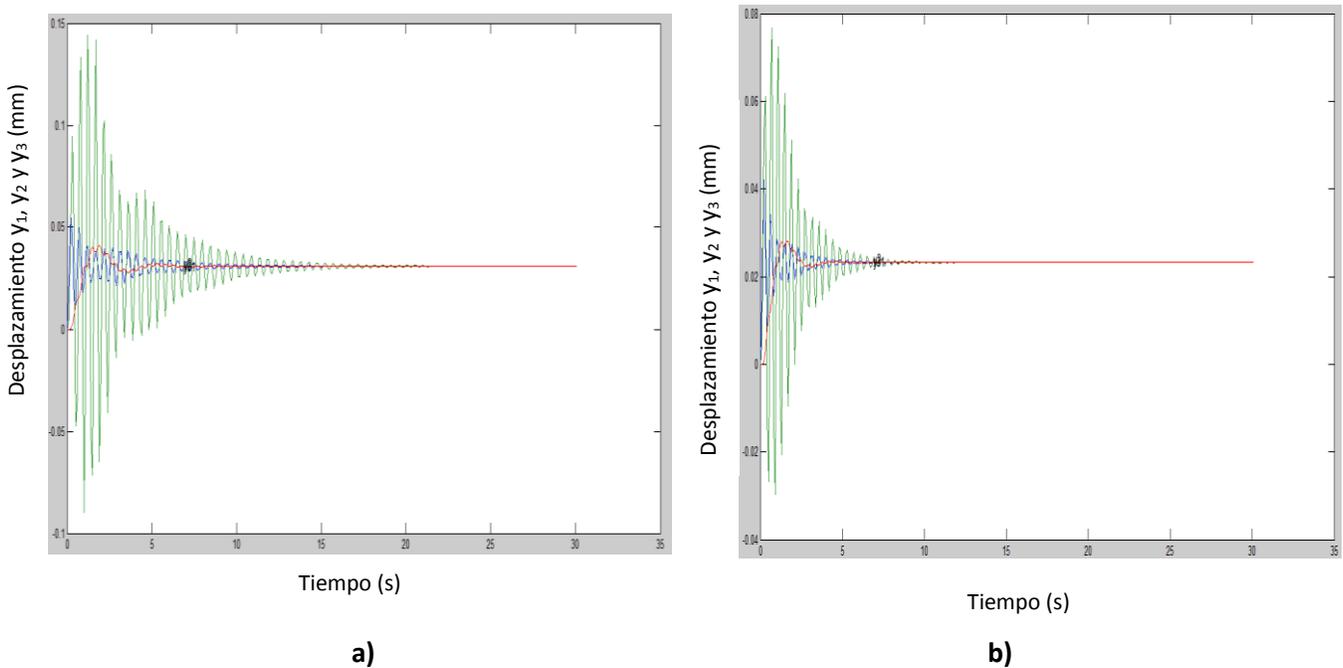


Figura 53. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número uno, a) volumen uno. b) volumen dos.

La Figura 54., muestra los gráficos de los desplazamientos (**mm**) descritos por el espécimen número uno de hule hasta un instante de 30 segundos a partir de la fuerza aplicada, la cual está sobre la masa efectiva, **a)** para el volumen uno de material y **b)** para el volumen dos de material. Se observa, que el amortiguamiento ($\eta 1$) en este material no es suficiente para suavizar la fuerza (**F1**) aplicada en la masa efectiva (**M3**), por lo que la deformación (y_3) en color rojo, oscila en un lapso de tiempo, su oscilación es mucho menor que las dos señales, amortiguándose totalmente en un periodo de tiempo mucho menor a los dos restantes.

El desplazamiento (y_1) en este material, está dado de tal forma que en un principio, las oscilaciones son muy grandes (color verde), de hecho mayor a todas en un

periodo de tiempo; estas oscilaciones se comienzan a suavizar en un lapso de 20 segundos. Se nota que no se ha amortiguado por completo aplicando la misma fuerza (**F1**), en la masa efectiva (**M1**), solo se tiene el amortiguamiento ($\xi 1$) de por medio. Para el desplazamiento (y_2), se presenta una oscilación mucho menor que la anterior en un principio (color azul), se tienen los parámetros de amortiguamiento ($\eta 1$) y de rigidez conectados en paralelo, aplicando la misma fuerza (**F1**) a la masa efectiva (**M3**), de tal forma que estas oscilaciones se suavizan por completo en un tiempo de 22 segundos.

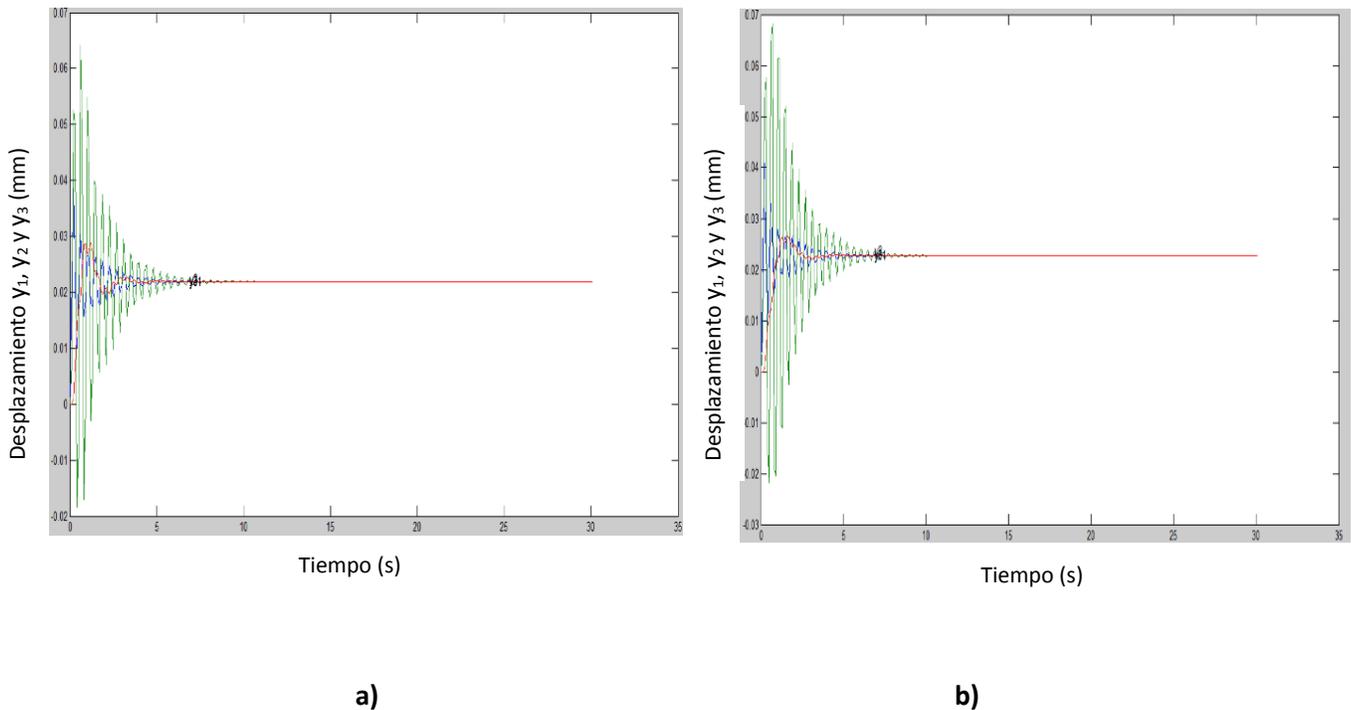


Figura 54. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número dos, a) volumen uno. b) volumen dos.

La Figura 55, muestra los gráficos de los desplazamientos (**mm**) descritos por el espécimen número uno de hule hasta un instante de 30 segundos a partir de la fuerza aplicada, la cual está sobre la masa efectiva, **a)** para el volumen uno de material y **b)** para el volumen dos de material. Se observa, que el amortiguamiento ($\eta 1$) en este material no es suficiente para suavizar la fuerza (**F1**) aplicada en la masa efectiva (**M3**), por lo que la deformación (y_3) en color rojo, oscila en un lapso de tiempo, su oscilación es mucho menor que las dos señales. Amortiguándose totalmente en un periodo de tiempo mucho menor a los dos restantes.

El desplazamiento (y_1) en este material, está dado de tal forma que en un principio, las oscilaciones son muy grandes (color verde), de hecho mayor a todas en un periodo de tiempo. Estas oscilaciones se comienzan a suavizar en un lapso de 20 segundos: se nota que no se ha amortiguado por completo aplicando la misma

fuerza (**F1**), en la masa efectiva (**M1**), solo se tiene el amortiguamiento ($\xi 1$) de por medio. Para el desplazamiento (y_2), se presenta una oscilación mucho menor que la anterior en un principio (color azul), se tienen los parámetros de amortiguamiento ($\eta 1$) y de rigidez conectados en paralelo, aplicando la misma fuerza (**F1**) a la masa efectiva (**M3**), de tal forma que estas oscilaciones se suavizan por completo en un tiempo de 22 segundos.

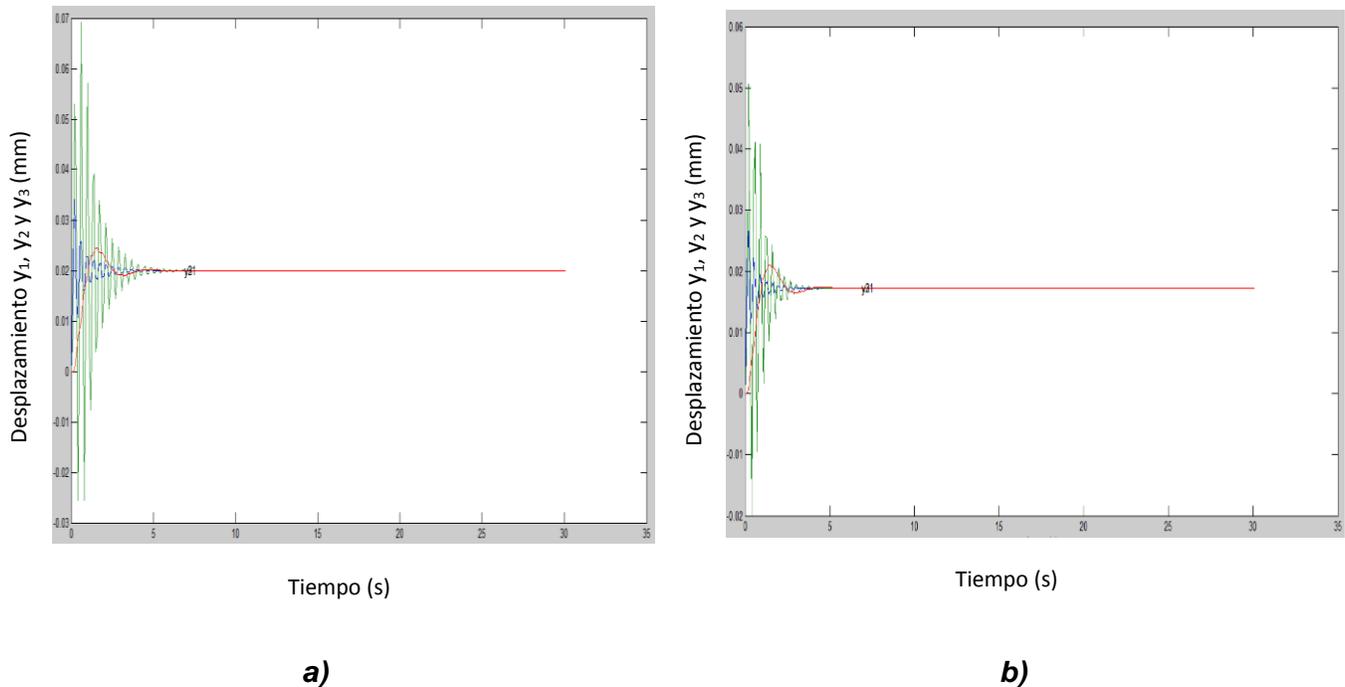


Figura 55. Gráficos de desplazamientos en función del tiempo del espécimen número tres, a) volumen uno. b) volumen dos

5.6 Determinación del coeficiente de correlación R^2

El coeficiente de correlación para verificar el grado de asociación entre las variables de tiempo y desplazamiento se determinó, obteniéndose los siguientes resultados:

Para los datos del gráfico en la Figura 56 que pertenecen a los valores obtenidos numéricamente de Matlab, el coeficiente de correlación denominado como R^2 pertenece a 0.9868%. Este valor está muy cerca a la unidad; según las propiedades, esto significa que hay una relación muy grande o fuerte entre las dos variables

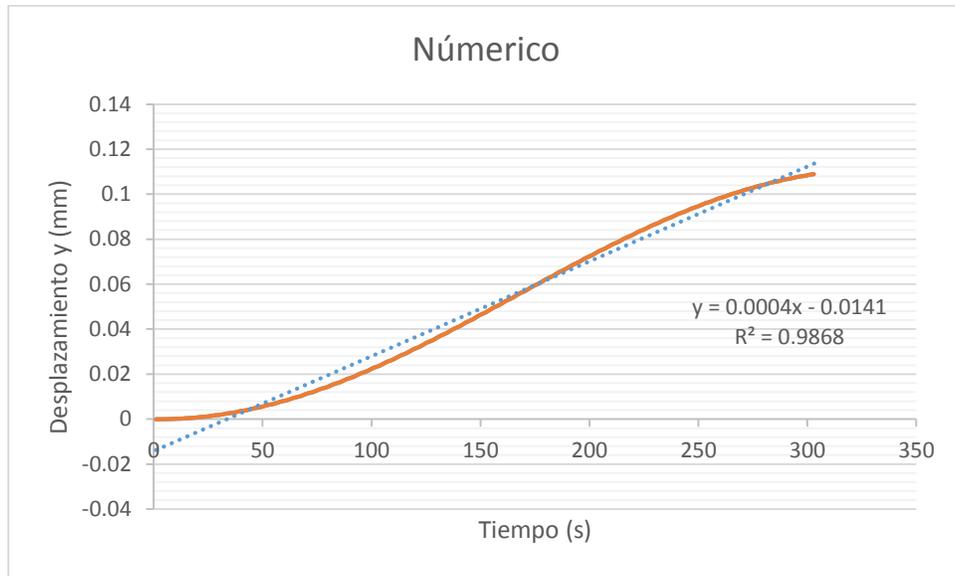


Figura 56. Gráfico que representa el coeficiente de correlación en pruebas numéricas.

Esto mismo sucede con los valores obtenidos experimentalmente, cuyo valor es de 0.8758%, (gráfico de la Figura 57), sólo que las relaciones entre ambas variables son más débiles que en el caso anterior. Con observaciones, se puede concluir que hay una diferencia mínima de error de 0.11% entre los datos arrojados en el modo experimental y los obtenidos numéricamente con modelos matemáticos al llevarlos a un programa numérico, para comprobar que este sea factible y poder utilizarlo en futuras pruebas similares de materiales elastómeros.

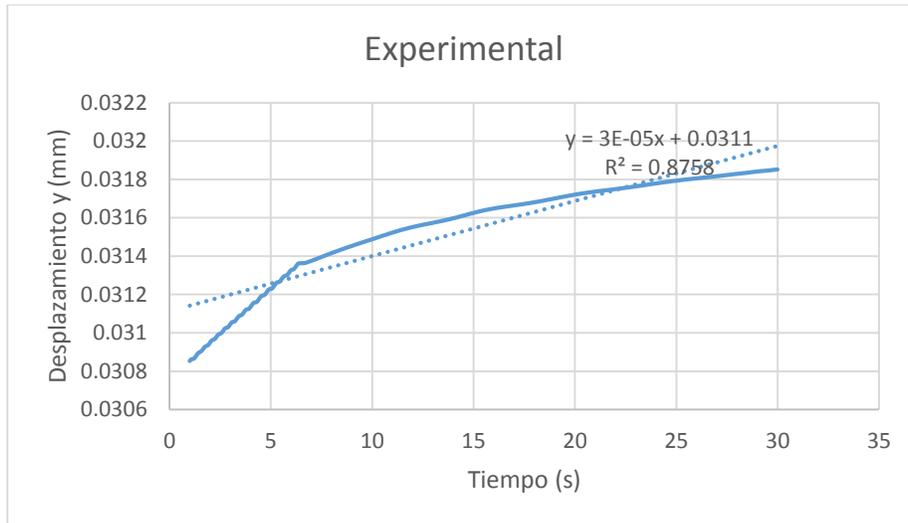


Figura 57. Gráfico que representa el coeficiente de correlación en pruebas experimentales.

Capítulo 6

Discusion de resultados

El presente contiene la discusión de los resultados del trabajo aquí plasmado, el cual describe la diferencia entre energías disipada por histéresis de los materiales a cargas cuasi-estáticas, la similitud y diferencia de los parámetros obtenidos con modelos reológicos, y la comparación de los mismos de forma numérica con la resolución de *Runge-Kutta* para ecuaciones diferenciales en Matlab, así como la comparación de estos mismos resultados con diferentes volúmenes de material ensayados.

6.1 Energía cuasi-estática a histéresis

Al observar los resultados que se obtuvieron en el Capítulo 5, e inspeccionando un breve resumen en el gráfico de la figura 58, es observable el área dentro de la curva llamada histéresis. Cabe mencionar que se tomó como referencia el ciclo inicial medio y el ciclo final medio. También se puede notar por mucho la diferencia que existe en cuanto a la fuerza aplicada en cada uno de los materiales. El material con una mayor área encerrada es el de silicon-Neopreno, el de menor área bajo la curva es el Hule. Con la fuerza aplicada sucede lo contrario, pues el material que tiene una rigidez y con ello una fuerza mayor, es el Poliuretano, alcanzando un porcentaje del 200%, cuando el Hule alcanza apenas una fuerza de 1400 N y el Silicon-Neopreno alcanza la mitad de la fuerza de la fuerza maxima alcanzada por estos materiales.

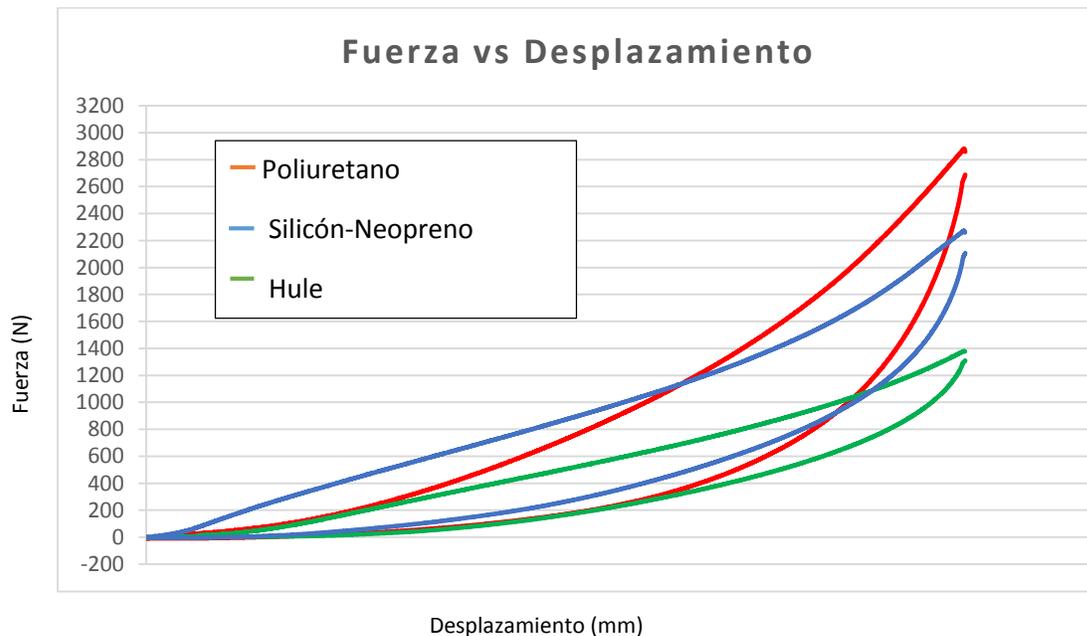


Figura 58. Comparación de los ciclos de histéresis.

En cada uno de los datos obtenidos, en las Tablas 1A a 6A del Apéndice A, se puede verificar la energía en (J) disipada por cada uno de los especímenes, lo que significa que el Silicón-Neopreno disipó la mayor cantidad de energía visible. No tan alejado de este valor, está el valor del Poliuretano, los resultados son coincidentes para los dos casos en volumen. Cabe mencionar que los materiales aquí estudiados, se ensayaron a temperatura ambiente, es decir, no se tomó en consideración las propiedades a diferentes temperaturas; esto se puede tomar como una recomendación para trabajos futuros en el análisis de los mismos materiales. La comparación de energía es observable en la gráfica 59.

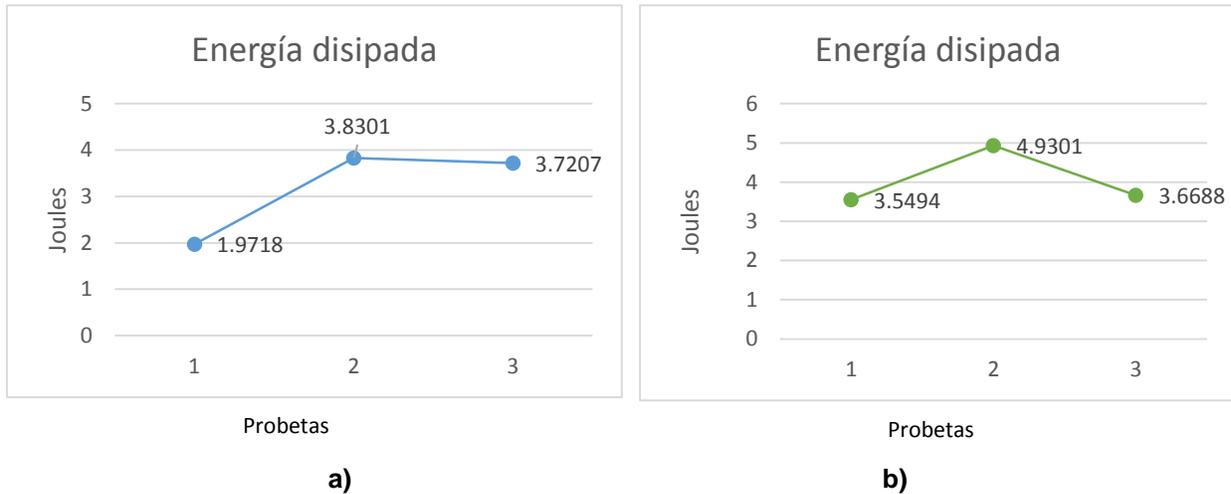


Figura 59. Energía disipada en cada material. a) volumen uno. b) volumen dos.

6.2 Parámetros con valores reologicos

La resolución del sistema de ecuaciones para el modelo matemático propuesto, introdujo los valores paramétricos; estos son obtenidos con la metodología mencionada en el Capítulo 4. Una inspección a detalle de los parámetros indican que:

1. Los valores de los parámetros de amortiguamiento y rigidez de Kelvin-Voig $\xi K-V$ y $\eta K-V$, se mantienen constantes en los tres materiales analizados, esto sucede con los dos volúmenes diferentes para cada uno de los materiales analizados.
2. El valor paramétrico de amortiguamiento de Maxwell ηM , se incrementa un porcentaje de 5% para cada material, este incremento sucede en cada uno de los seis materiales analizados, por lo que los materiales con mayor amortiguamiento

son el Silicón-Neopreno, y con un valor del 5% y 10%, por encima de los dos antes mencionados está el Poliuretano.

3. El incremento de la rigidez de Maxwell ξM , es del 9% entre el Hule y el Silicón-Neopreno para los dos casos de volumen. Para el Poliuretano, el incremento en la rigidez de Maxwell ξM es un 200% mayor a la obtenida en el Silicón-Neopreno, lo significa que el poliuretano incrementa de forma exponencial su rigidez con respecto a sus homólogos, analizados en este trabajo de investigación, como se muestra en los gráficos de la Figura 60.

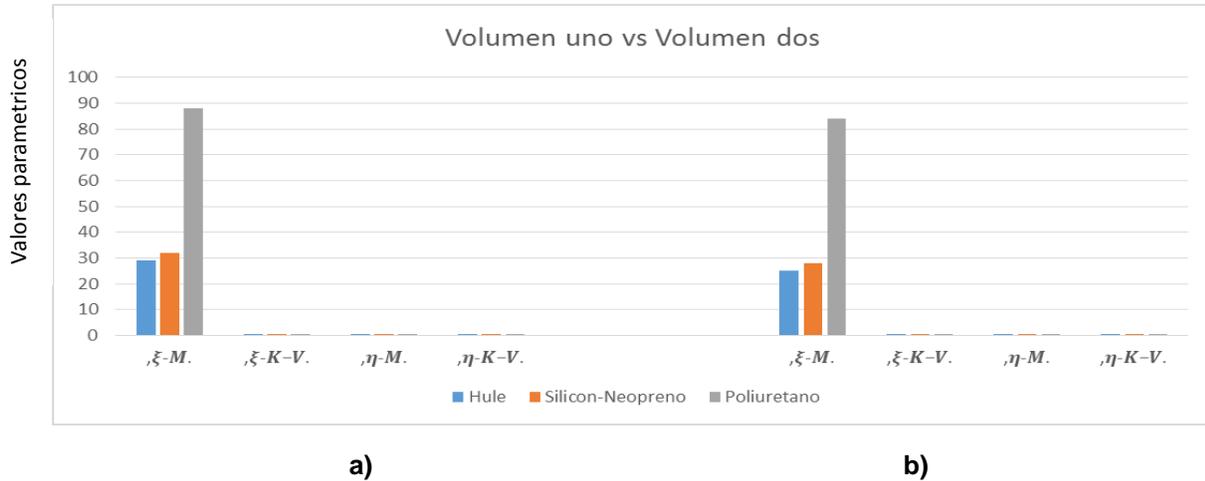


Figura 60. Valores paramétricos. a) volumen uno. b) volumen dos.

Existe una congruencia en cuanto a los valores paramétricos resultantes, los mismos son coincidentes en los volúmenes analizados.

6.3 Comportamiento del material en *Runge-Kutta*

Los especímenes analizados en este trabajo, como habría de esperarse, tienen diferente comportamiento, hablando propiamente de sus propiedades plásticas. En las diferentes curvas de esfuerzo-deformación se puede apreciar esta diferencia, gracias a sus parámetros de rigidez y amortiguamiento, mismos que se hacen notar al inspeccionar gráficamente los datos numéricos obtenidos en Matlab.

Para apreciar la diferencia tanto de datos experimentales como los obtenidos con la metodología aquí propuesta (ver apartado 5.5), se realiza una comparación en cuanto a la curva de desplazamiento (y') vs Tiempo (t), con su homóloga obtenida en pruebas experimentales. Con esta diferencia es posible encontrar su RMS o media cuadrática en cada uno (Figura 61).

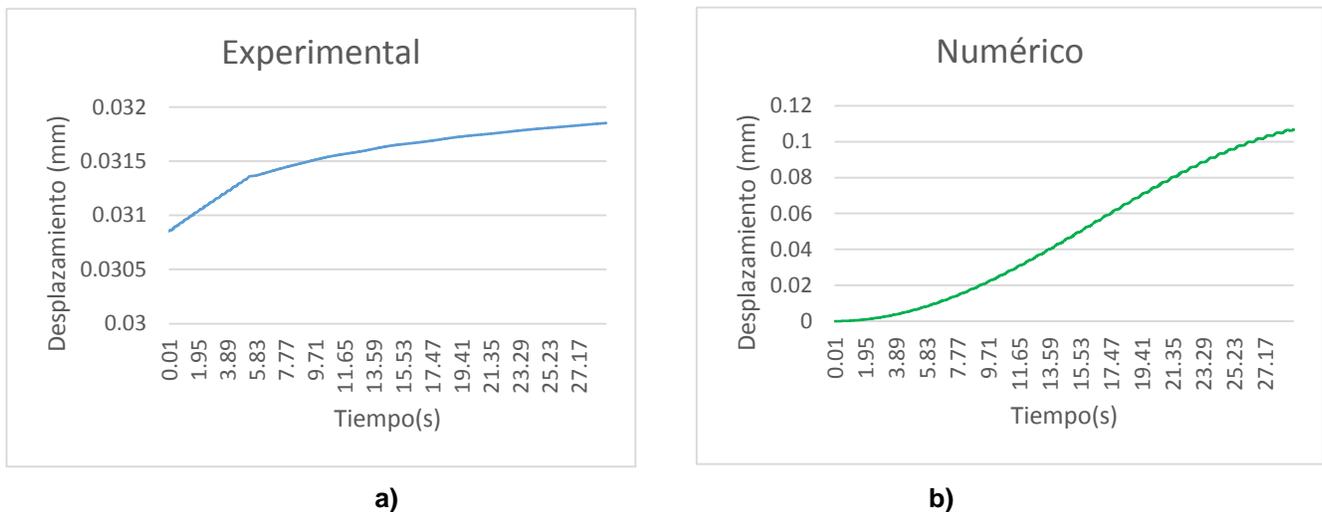


Figura 61. Diferencia entre datos experimentales y numéricos, a) Datos experimentales, b) Datos numéricos.

En el modelo de la metodología vista en el Capítulo 4 de este trabajo, se consideran tres desplazamientos, los cuales son explicados en el Capítulo 5, el desplazamiento tres (y'_3), es el que no tiene oscilaciones tan notables como los desplazamientos (y'_1) y (y'_2) tiene una similitud en cuanto a la forma de la función obtenida experimentalmente, misma que se toma como referencia para el análisis (Figura 62).

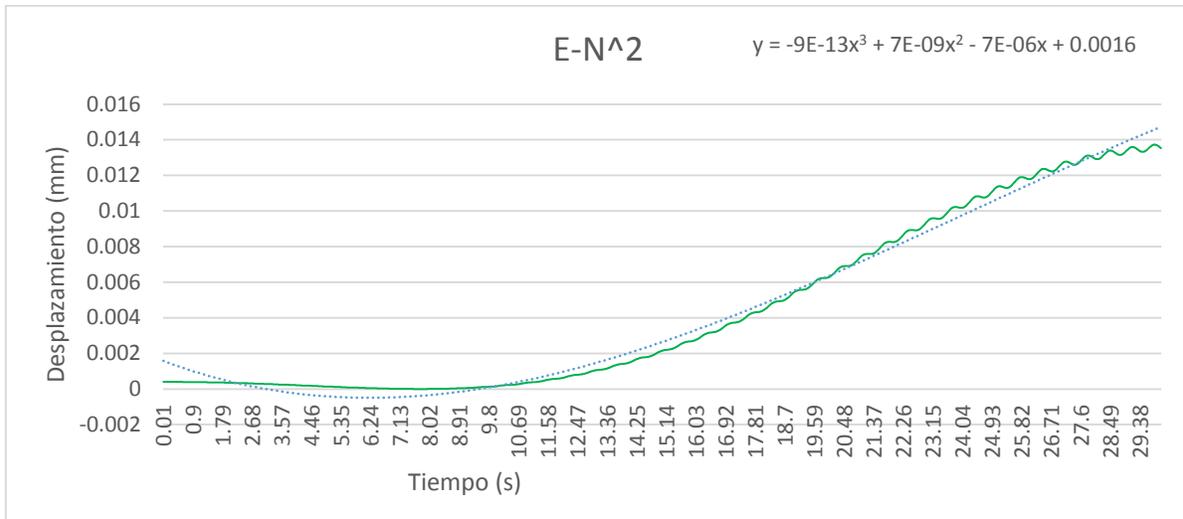


Figura 62. Diferencia y obtención de RMS entre datos experimentales y numéricos.

El valor del RMS para los materiales es similar, con un porcentaje de 4% de error comprendido entre los tres. Los mismos valores son cercanos a cero, por lo que la señal es óptima y manejable para el sistema.

6.4 Comportamiento dinámico a impacto

En la metodología de este trabajo, se puede apreciar lo siguiente:

- 1.- La energía que entra el sistema es igual en todos los materiales, la energía disipada varía un 15% entre cada uno.
- 2.- la fuerza en el primer impacto varía 86% del Hule al Silicón-Neopreno y un 63% del silicón-Neopreno al Poliuretano.
- 3.- Mientras que con el coeficiente de restitución sucede lo contrario, la energía que disipa el Hule del 27%, la del silicón-Neopreno es del 30%, con 38% está el Poliuretano. Este comportamiento se puede apreciar en el gráfico de la Figura 63.

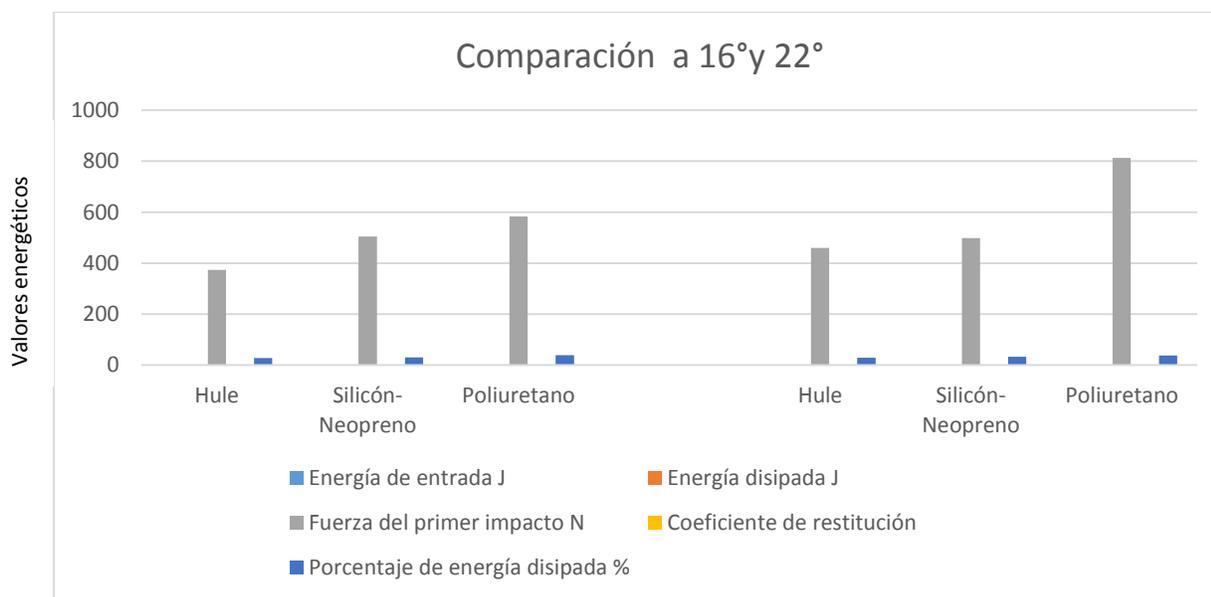


Figura 63. Diferencia entre diferentes ángulos de impacto.

6.5 Amortiguamiento en los materiales

El decremento logarítmico es una herramienta que ayuda a contabilizar el amortiguamiento presente en los sistemas. El decremento logarítmico (δ) decae de forma inesperada en el hule, resultando una diferencia de un 43% y un 40% con respecto al Poliuretano y al Silicón-Neopreno. Esto se puede verificar en la Tabla 25, este porcentaje es repetible para volúmenes variables aquí analizados.

Tabla 25. Decremento logarítmico.

Material	Decremento logarítmico (δ)
Hule	0.00026
Silicón-Neopreno	0.0076
Poliuretano	0.0033
Material	Amplitud de ciclos $\ln \frac{x_1}{x_2}$
Hule	1.00026
Silicón-Neopreno	1.0076
Poliuretano	1.0033

La razón de amplitud de ciclos consecutivos $\ln \frac{x_1}{x_2}$, es también del mismo margen de error en decimales que el decremento logarítmico en el gráfico de la Figura 64 se muestra esta diferencia.

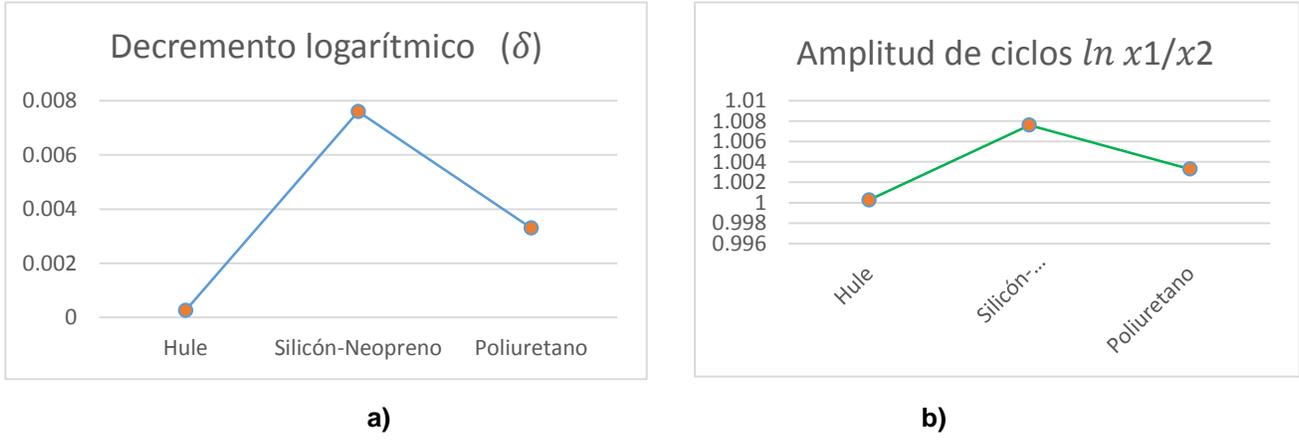
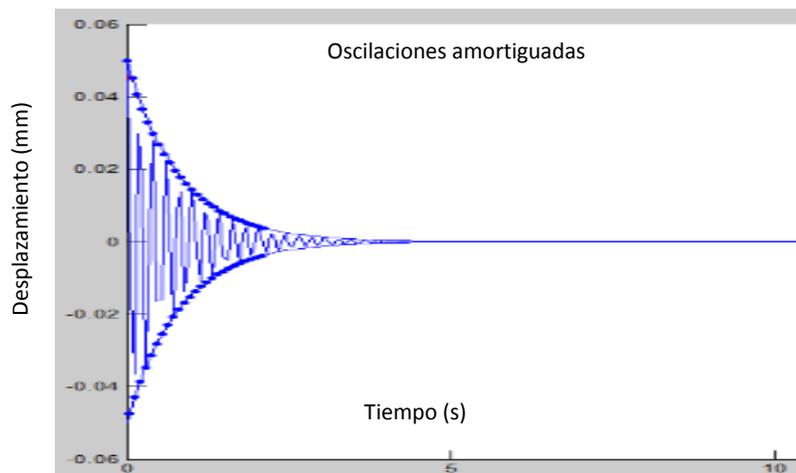
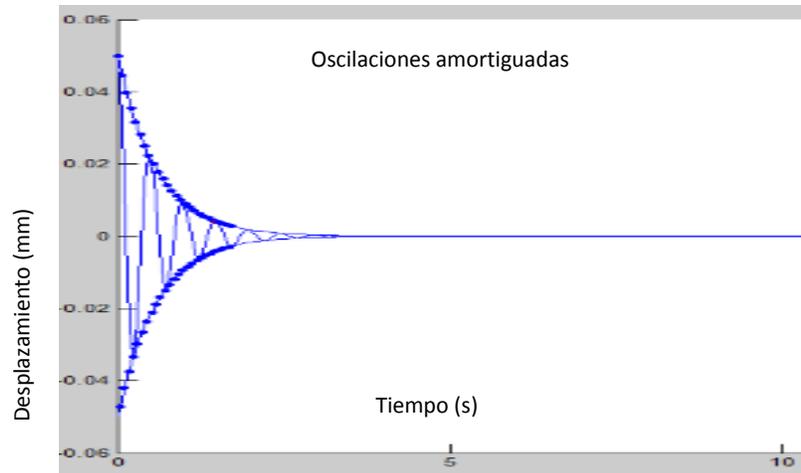


Figura 64. Diferencia entre: a) Decremento logarítmico, b) Amplitud de ciclos

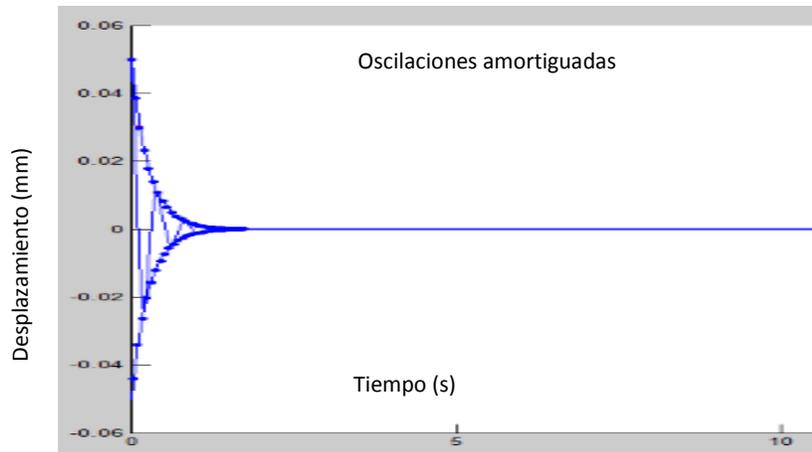
Las curvas de caída de los ciclos, difieren un poco en cada material, pues estas dependen del valor de amplitud de ciclos $\ln \frac{x_1}{x_2}$, obtenidos en la tabla 25, mismos que una vez obtenidos, se muestran en las gráfica de la Figura 66. Se observa que, efectivamente, en la caída de las vibraciones en el hule, hay una diferencia de un 43% y un 40% con respecto al Poliuretano y al Silicón-Neopreno.



a) Caída de decremento logarítmico en el espécimen número uno.



b). Caída de decremento logarítmico en el espécimen número dos.



c) Decremento de caída en el espécimen número tres.

Figura 65. Representación de la caída del amortiguamiento.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

El presente capítulo está dedicado a plasmar las conclusiones obtenidas y a dar recomendaciones para trabajos futuros relacionados a metodologías similares. Las conclusiones se dividen de acuerdo a los datos en los tipos de prueba, es decir, para un mejor entendimiento, en pruebas cuasi-estática y dinámica de impacto.

7.1 Conclusiones de análisis cuasi-estáticos

En cuanto a las pruebas cuasi-estáticas las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. De acuerdo a las normas ASTM D-575, las velocidades mayores a 10 mm/min no corresponden a cargas cuasi-estáticas. Comparando las energías y lo observado en las pruebas, el espécimen de número uno (Tablas 1 y 2), disipó una energía del 4% mucho menor en relación al espécimen de Silicón-Neopreno que fue de 97 %, mientras que el espécimen de Poliuretano disipó un 51 %.
2. En cuanto a las curvas de histéresis el resultado obtenido es similar al expuesto en el punto número uno. En fuerzas y tensiones soportadas, el espécimen tres de Poliuretano fue el de mayor rango.
3. Los valores obtenidos con el modelo reológico de Burger sirven como un delimitante para verificar el comportamiento en las propiedades plásticas de los materiales analizados.QQQA1Q|
4. El modelo reológico modificado y adecuado a la necesidad, trajo consigo resultados positivos para la metodología desarrollada en este trabajo.
5. De acuerdo a los resultados en los gráficos y datos adquiridos con MATLAB, los especímenes número dos y tres, son los que presentaron un mejor desempeño en cuanto a suavizar o amortiguar la fuerza constante cuasi-estática aplicada.
7. La metodología desarrollada en este trabajo es viable, es decir, con la misma se pueden someter materiales de tipo poliméricos a esta, para así obtener el comportamiento de sus propiedades plásticas.
8. La metodología tiene cierta concordancia con los datos obtenidos en los materiales sometidos a cargas dinámicas y a cargas cuasi-estáticas. Esto último da la certeza de que la metodología es rentable para usarse en ciertos materiales.

7.2 Conclusiones de análisis dinámicos

En cuanto a las pruebas dinámicas de impacto las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. De acuerdo a resultados con las diferentes posiciones angulares, 16°, 18°, 20° y 22°, se concluye que el espécimen de Poliuretano (Tablas 1 y 2) tiene la capacidad de soportar una fuerza mayor, lo que es proporcional a su rigidez.

2. La rigidez en cada material está ligada al coeficiente de restitución, ambos son inversamente proporcionales en los resultados adquiridos en este trabajo de investigación.

3. Los coeficientes de restitución son mayores en el espécimen de Hule (Tablas 1 y 2), el silicón-Neopreno con respecto al primero es de 93.5% y el Poliuretano es de 77%, al contrario de lo que suceden con la fuerza soportada.

4. El porcentaje de energía disipada es menor en el espécimen de Hule con 29%, esto aumenta proporcionalmente con la fuerza soportada en cada material, hasta 40% que disipa el poliuretano en energía.

5. Las propiedades del material siguen siendo constantes al momento de variar el volumen, lo que es una buena indicativa del método elaborado en este trabajo de investigación.

6. La metodología implementada es asertiva, en cuanto a la caracterización de materiales elastómeros, pues tanto los datos y gráficos de pruebas, y análisis numérico coinciden, es útil para futuros análisis de estos materiales.

7. Por otro lado, los especímenes de Silicón-Neopreno y Poliuretano, son los más óptimos para utilizarse cuando se desea amortiguar cargas, ya sean de tipo cuasi-estáticas o de tipo dinámicos a impacto como las estudiadas.

7.3 Recomendaciones

- 1.- Se realizó la metodología y la caracterización de los materiales sometidos a cargas cuasi-estáticas y dinámicas, con la finalidad de hacer comparaciones plásticas del comportamiento del material, dependiendo el efecto de la carga.
- 2.- Analizar materiales polímeros elastómeros con la misma metodología implementada; esto se puede hacer variando un poco la temperatura al momento de ejecutar el método.
- 3.- Para posibles cambios en la metodología, variar la geometría y volumen de los materiales y verificar el comportamiento en cuanto a las propiedades plásticas del material.
- 4- Ejecutar el método propuesto en este trabajo de investigación, con diferentes materiales elastómeros y cuyo margen de error sea aceptable en la metodología, los cuales deben tener características similares a los aquí descritos.

Referencias

Aguilar, R. (2009). High impact-testing machine for elastomers investigation under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*. (10)17, 3-7.

Aguilar, R. (2016). Simplified method for seismic analysis of structures with third generation FPS isolators. *Journal of Molecular Structure*. (20)17, 4-10.

Érica, S. L. (2017). Caucho sintético. Recuperado de: <http://www.ERICA.es/web/caucho-sintetico/>

Alojamientos.uva.es., (2015). Cinco propiedades mecánicas de los polímeros. Recuperado de: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/469/45757/1/Documento26.pdf

Askeland, R. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. (3ª edición).USA. Thomson.

Cortés, O. (2015). Propiedades que definen los materiales resilientes en arquitectura. *Revista de tecnología*. 1-10.

Di Benedetto, G. (2017). Simplified method for the seismic analysis of structure Impact behavior and ballistic efficiency of perforating projectiles with steel tool cores with third generation FPS insulators. *International Journal of Impact Engineering*. (10)8, 1-9.

Düring, D. Weiß, L. Stefaniak, D. Jordan, N. Hühne, C. (2015). Low speed impact response of composite laminates with steel and elastomer protective layer, *International Journal of Impact Engineering*. 18-26.

Espino, P. (2004). Modelado numérico con verificación experimental de un amortiguador de impacto tipo elastómero (tesis de maestría), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.

Gonzales, M. (2018). El fenómeno de resonancia. Recuperado, de: <https://mgmdenia.wordpress.com/2010/11/10/resonancia/>

Ledezma, R.D. (2015). Avances en aislamiento de vibración por impacto usando rigidez no lineal. *Ing., investigación y Tecnología*. (16)2, 1-10.

Mark, S. Sonnenschein, E. Nicoli, Liangkai, Ma, B. L. Wendt. (2017). Mitigation of impacts in polymeric layers. (18)26.1-9.

- Navarro, J. R. F. (2017). Análisis experimental de topes de impacto regulable y con dispositivo de fricción sobre el elemento móvil central (tesis de maestría), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.
- Ortega, Y. (2005). Prueba de impacto: ensayo Charpy, *Revista mexicana de física* 51–57. (18)26.1-7.
- Rahmé, P. Bouvet, C. Rivallant, S. Fascio, V. Valembois, G. (2011). Experimental impact analysis, adding mechanical protection to material to reduce damage. *Mechanics of Materials*. (183)189.1-8.
- Ramírez, R. Pöschel, T. Brilliantov, N. Schwager, T. (2008). Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres, *Moscow State University, Physics Department, Moscow 119899, Russia*, 10-17.
- Reincke, K. (2011). The fracture behaviour of elastomers at higher loading speed in dependence on test temperature, *International Journal of Impact Engineering*. 10-17.
- Rodríguez, E. A. (2013). Análisis Numérico de la Respuesta de un Material Elastomérico Sujeto a Cargas de Impacto, con Validación Experimental (tesis de maestría), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.
- Serge, A. (2011). Impact Engineering of Composite Structures. *Springer*. 1-10.
- Simón, E. Y. Wing, G. (2013). Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axisimétrica: estudio complementario. *Ing., investigación y Tecnología*. (16)2. 1-10.
- Stanisic, R. Z. (2009). Reajuste de los parámetros de la impedancia mecánica para la mejora de la disipación de la energía durante el impacto, *CEA*. (6) 4.1-9.
- Szwedowicz, D. Espino, P. Martínez, E. Bedolla, J. Cortés, C. (2006). Banco experimental para pruebas de impacto de un amortiguador tipo elastómero. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. (95)206.1-6.
- Website by Blue Fish. (2018). Introducción a los Sistemas Lineales y No Lineales y su Relación con las Fallas en Maquinaria. Recuperado de: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/introduccion-a-los-sistemas-lineales-y-no-lineales-y-su-relacion-con-las-fa>
- Mohagheghian, G. J. McShane, W. Stronge, J. (2017). Quasi-static and impact perforation of polymer-metal bi-layer plates by a blunt indenter, *International Journal of Impact Engineering*. 1-14.

Pavioni, O. D. Ortega, F.M. (2015). Obteniendo los coeficientes de restitución y arrastre en un solo experimento, *REVISTA MEXICANA DE FISICA*, (1)10.1-6.

Osterlof, R. Wentzel, H. Kari, L. (2014). An efficient method for obtaining the hyperelastic properties of filled elastomers in finite strain applications. *Finite Elements in Analysis and Design*. 1-10.

Juárez, D. Gimeno, B. Bou, F. Sanoguera, D. (2012). estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos. *Revista de investigación Área de Innovación y Desarrollo*. 1-22.

Wange, T.J. (2017). A Constitutive Model for Soft Materials Incorporating Viscoelasticity and Mullins Effect, *JOURNAL OF APPLIED MECHANICS.*, (18).1-7.

Ramirez, A. (2012). Dynamic Characterization of an Elastomeric Component under Intermediate Strain Rates, *SAE INTERNATIONAL*. 1-4.

Christensen, R. M. (1980). A Nonlinear Theory of Viscoelasticity for Application to Elastomers. . 1-8.

Luis, E.M. (2012). Comparación de modelos dinámicos del comportamiento de un material elastomérico bajo tasas de deformación media, *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* 1-6.

V. Fombuena, T. Boronat, L. Sánchez - Nacher, D. García -Sanoguera, R. Balart. (2017). Utilidad de los modelos de Viscoelásticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. *Modelling in Science Education and Learning*. 10 (1).1-9.

J.E. Escalante, J.R. Laguna, J.F. Gómez, C. Calderón, M.I. Cruz, R. Verguez, J.C. Anzelmetti. (2016). Análisis del coeficiente amortiguamiento viscoso en un sistema masa- resorte- amortiguar utilizando PPLANE y GEOGEBRA, revista mexicana de Física E 62, 66-72.

Chagoyén, C. A., (2016). Design of impact test machine type Charpy of 50. *J. ITEGAM-JETIA*. (02)08. 106-113.

P. Espino, N. Chavarría, Y. Davizón, E. Martínez, E. Olaguez, A. Said and A. Lizárraga. (2016). Development of an instrumented didactic prototype designed for the learning of the free fall impact dynamics, *IEEE Latin America Transactions*, *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*. (14) 9. 1-9.

M. J. Zarza, R. Vargas, M. Acevedo, E. Torres, B. Herazo. Ensayo de impacto charpy (informe, 2018). 2-6.

Muñoz, I. (2009). Sistema de adquisición de datos para la visualización de señales eléctricas de motores AC y CD (Tesis de ingeniería), Universidad Pontificia Bolivariana. 30-40.

Burns, S. (2015). Theoretical and Numerical Analysis of Rigid-body Impacts with Friction, (Tesis de ingeniería), National University of Ireland, Galway.

Ruiz, A. Jaramillo, H. (2003). Análisis y simulación de la prueba de impacto tipo Charpy mediante elementos finitos. *scientia et technica* n° 21

Raó, S. (1990). Vibraciones mecánicas. (5ta edición). USA. Pearson. 1-43.

Chapra, C. (2007). Métodos numéricos para ingenieros. (5ta edición) Mc Graw Hill.

Nakamura, S. (1997). Análisis numérico visualización grafica con MATLAB. (Primera edición). Prentice Hall.

Thomson, W. T. (1982). Teoría de vibraciones: Aplicaciones. (Primera edición). Prentice Hall,

Balart. R.A., (2013). Modelos matemáticos avanzados de viscoelásticidad, Universidad Politécnica de Madrid. Video file. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=uqkO48PD2t8>

Anexos

Tabla 1A. Datos experimentales espécimen número uno, volumen uno.

Especimen número uno, volumen uno (Hule)

Fecha	22/08/18	Fecha de ensayo	22/08/18
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo 1
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	1
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
1373.75	1.85233	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	60.1200	-2.6594
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0040	0.0000	-0.0002	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0002	120.300	1331.52	1.79538
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00002	27.2729	3.00002	27.2729
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.490	-2.8451	-0.0038	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.0004	0.0000	-0.00004	240.670
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
1319.06	1.77858	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	300.870	-2.7657
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0037	0.00002	0.00019	0.00002
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
0.00019	361.050	1.97188	1.97188

Tabla 2A. Datos experimentales espécimen número dos, volumen uno.

Especimen número dos, volumen uno (Silicón- Neopreno)

Fecha	22/08/18	Fecha de ensayo	22/08/18
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	2
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2556.98	3.04325	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	60.1200	-4.6730
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0063	0.0000	-0.0002	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0002	120.300	2172.07	2.92876
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00002	27.2729	3.00002	27.2729
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.510	-4.7207	-0.0064	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.0002	0.0000	-0.00002	240.700
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2127.84	2.86911	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	300.890	-4.4346
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0060	0.00000	-0.00002	0.00002
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
-0.00002	361.080	3.83018	3.83018

Tabla 3A. Datos experimentales espécimen número tres, volumen uno.

Especimen número tres, volumen uno (Poliuretano)

Fecha	22/08/18	Fecha de ensayo	22/08/18
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	3
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2864.76	3.86271	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	60.1200	-10.951
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0148	0.0000	-0.0004	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0004	120.330	2757.85	3.71860
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00002	27.2729	3.00002	27.2729
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.520	-10.268	-0.0138	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.0002	0.0000	-0.00002	240.700
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2693.69	3.63208	3.00002	27.2729
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	27.2729	300.890	-10.316
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0139	0.00000	0.00000	0.00000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
-0.00002	361.070	3.72074	3.72074

Tabla 4A. Datos experimentales espécimen número uno, volumen dos.

Especimen número uno, volumen dos (Hule)

Fecha	19/06/19	Fecha de ensayo	19/06/19
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo 1
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	1
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
1855.18	1.53996	3.00000	22.0588
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00000	22.0588	60.1200	-12.954
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0108	0.0000	-0.0002	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0002	120.340	1809.57	1.50209
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00002	22.0590	3.00002	22.0590
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.590	-12.8451	-0.0105	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.00000	0.00000	-0.00000	240.820
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
1781.88	1.47911	3.00002	22.0590
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	22.0590	301.050	-12.637
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0105	0.0000	0.00002	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
-0.0002	361.290	3.54946	3.54946

Tabla 5A. Datos experimentales espécimen número dos, volumen dos.

Especimen número dos, volumen dos (Silicón- Neopreno)

Fecha	19/06/19	Fecha de ensayo	19/06/19
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	2
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2343.39	1.95554	3.00000	22.0588
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00000	22.0588	60.1200	-7.4704
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0062	0.0000	-0.0002	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0002	120.410	2262.42	1.88798
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00002	22.0590	3.00002	22.0590
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.680	-7.0731	-0.0059	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.0002	0.0000	-0.00002	240.930
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
2220.22	1.85276	3.00002	22.0588
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00000	22.0588	301.150	-6.0558
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.0051	0.00000	-0.00002	0.00000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
-0.00002	361.400	3.66880	4.93013

Tabla 6A. Datos experimentales espécimen número tres.

Especimen número tres, volumen uno (Poliuretano)

Fecha	19/06/19	Fecha de ensayo	19/06/19
Modo de ensayo	Control	Tipo de ensayo	Compresión
Velocidad	3 mm/min	Forma	Tubo
Núm. de partidas	1	Núm. de muestras	3
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3447.26	2.95467	3.00000	22.0588
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00000	22.0588	60.1200	0.61989
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
-0.00053	0.0000	-0.0000	0.0000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
-0.0000	120.330	3361.91	2.88151
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3.00000	22.0588	3.00000	22.88151
Tiempo (s)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)
180.520	1.09673	-0.00094	0.0000
Deformación (%)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)
-0.0002	0.0000	-0.00002	240.720
Fuerza (N)	Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)
3317.61	2.84354	3.00002	22.0590
Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Tiempo (s)	Fuerza (N)
3.00002	22.0590	300.910	1.30336
Tensión (MPa)	Desplazamiento (mm)	Deformación (%)	Desplazamiento (mm)
0.00112	0.00000	0.00000	0.00000
Deformación (%)	Tiempo (s)	Energía (J)	Energía (J)
-0.00000	361.110	4.93013	3.66880

Anexos B

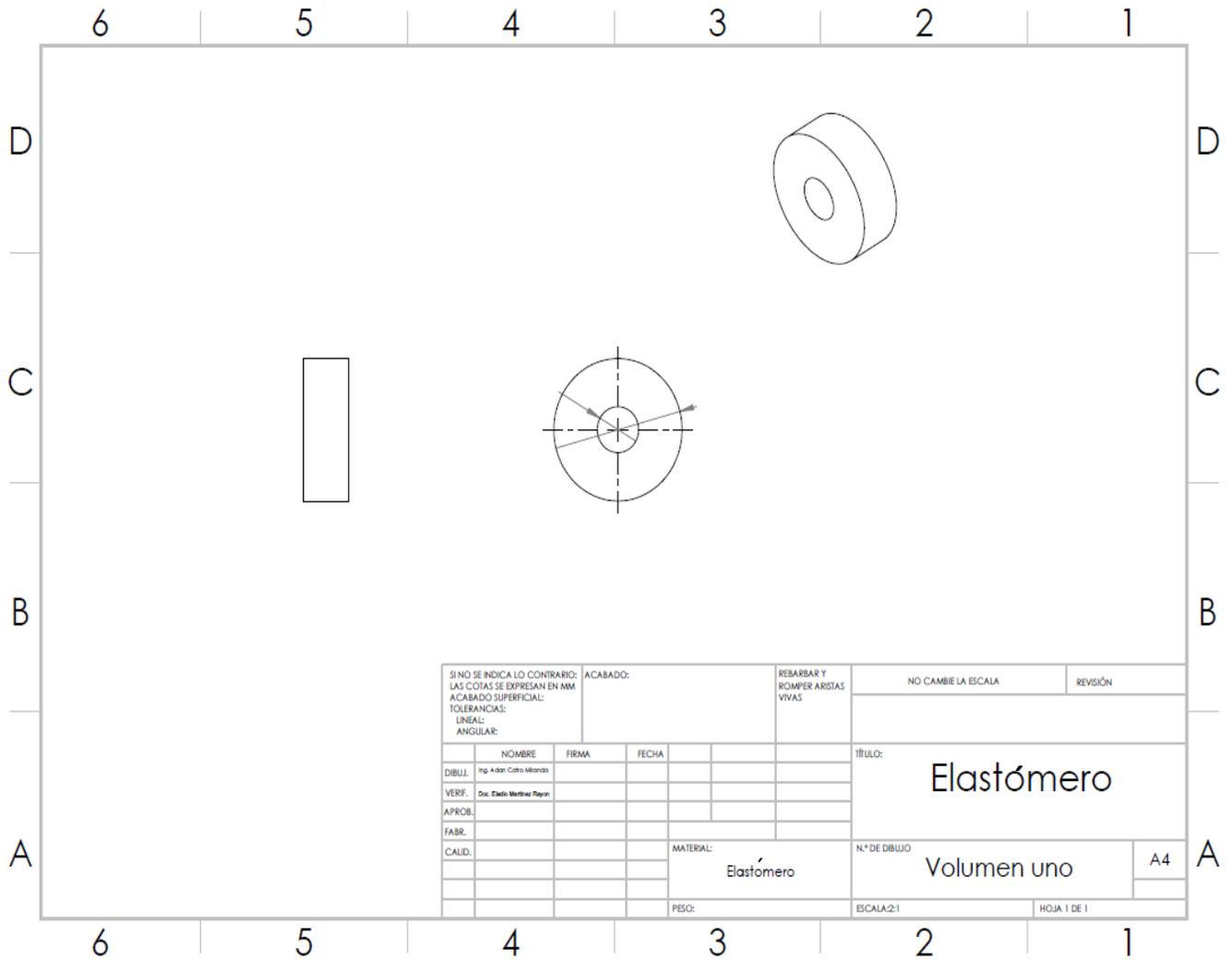


Figura B1. Elastomero con volumen uno.

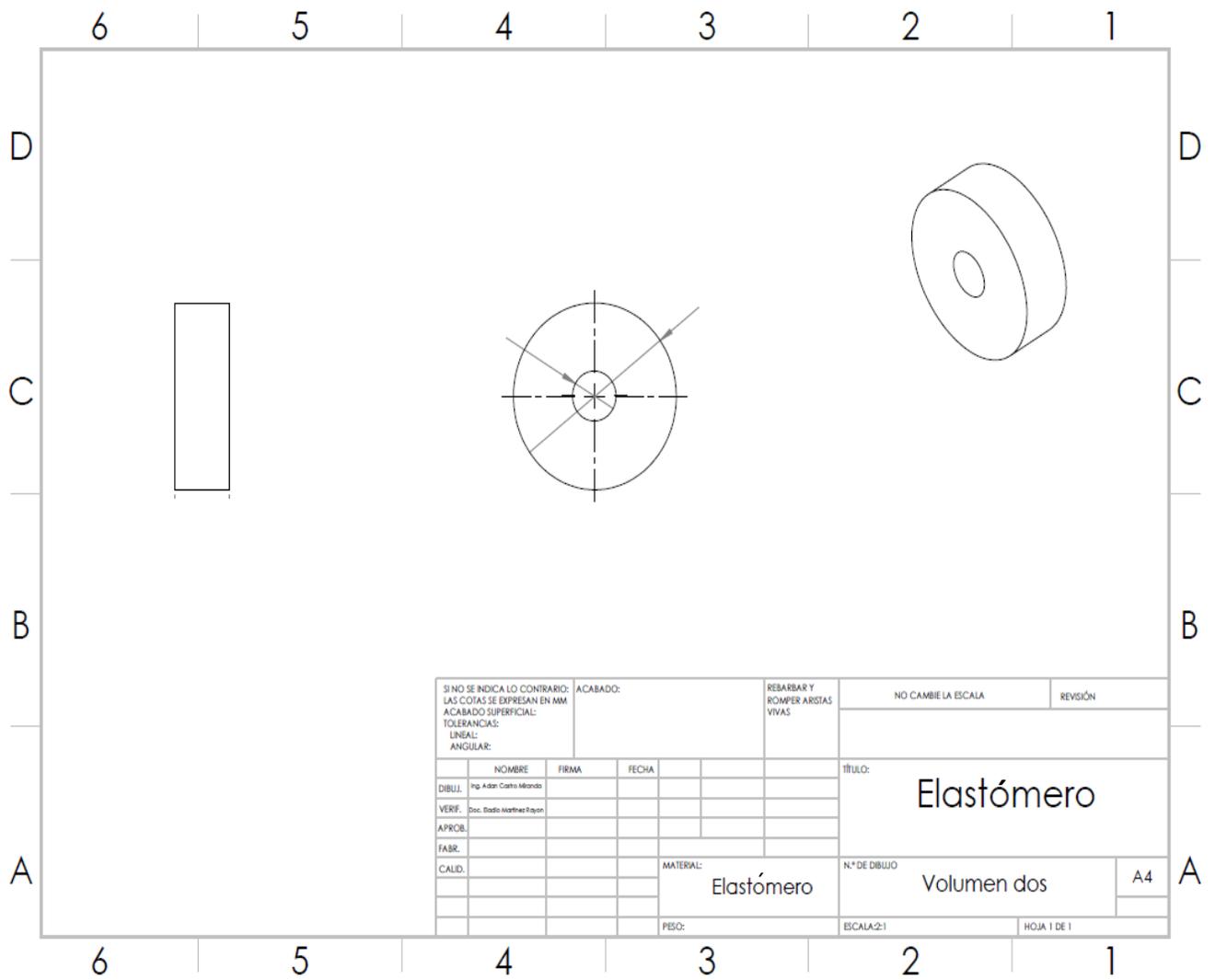


Figura B2. Elastomero con volumen dos.

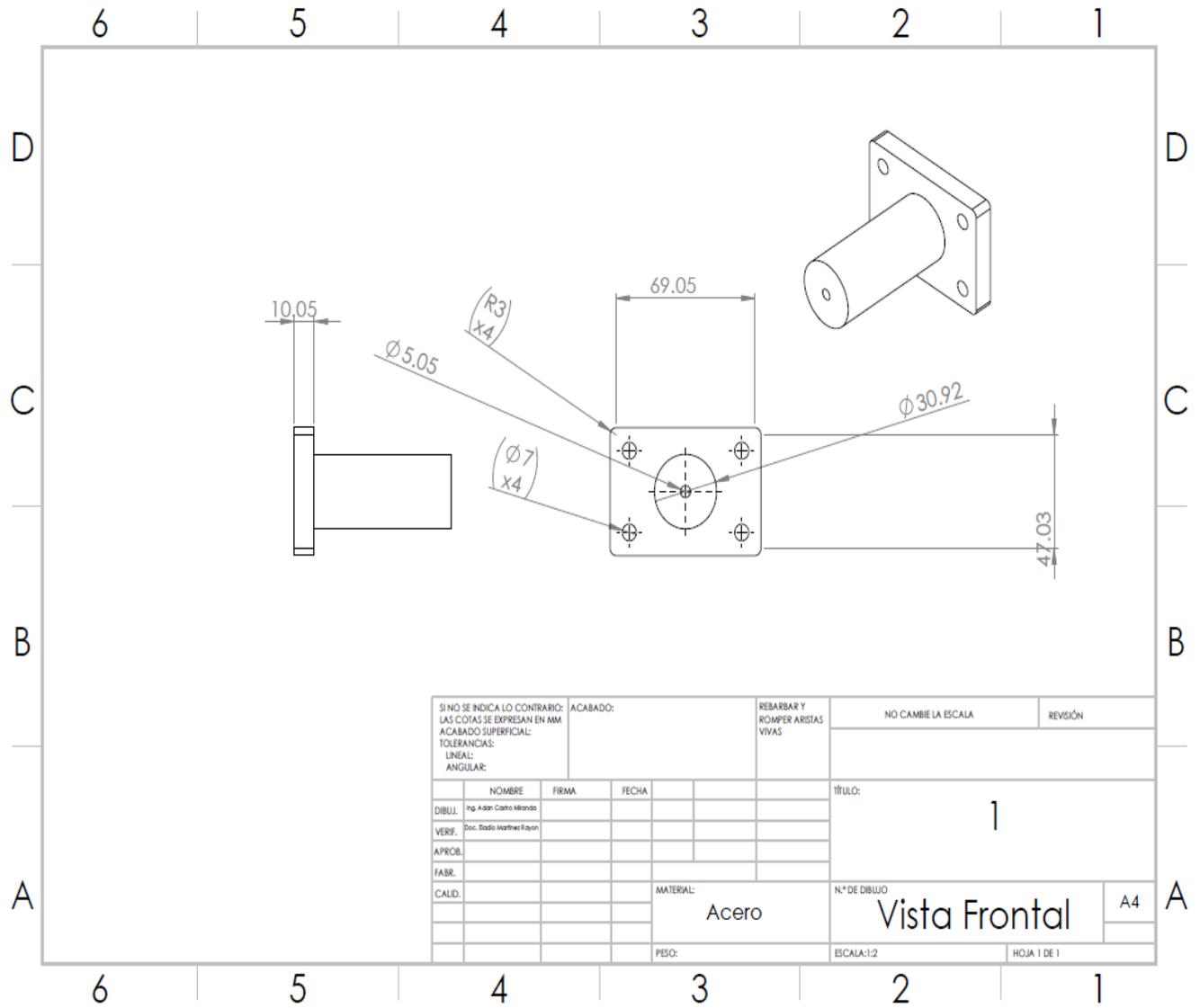


Figura B3. Vista frontal del banco.

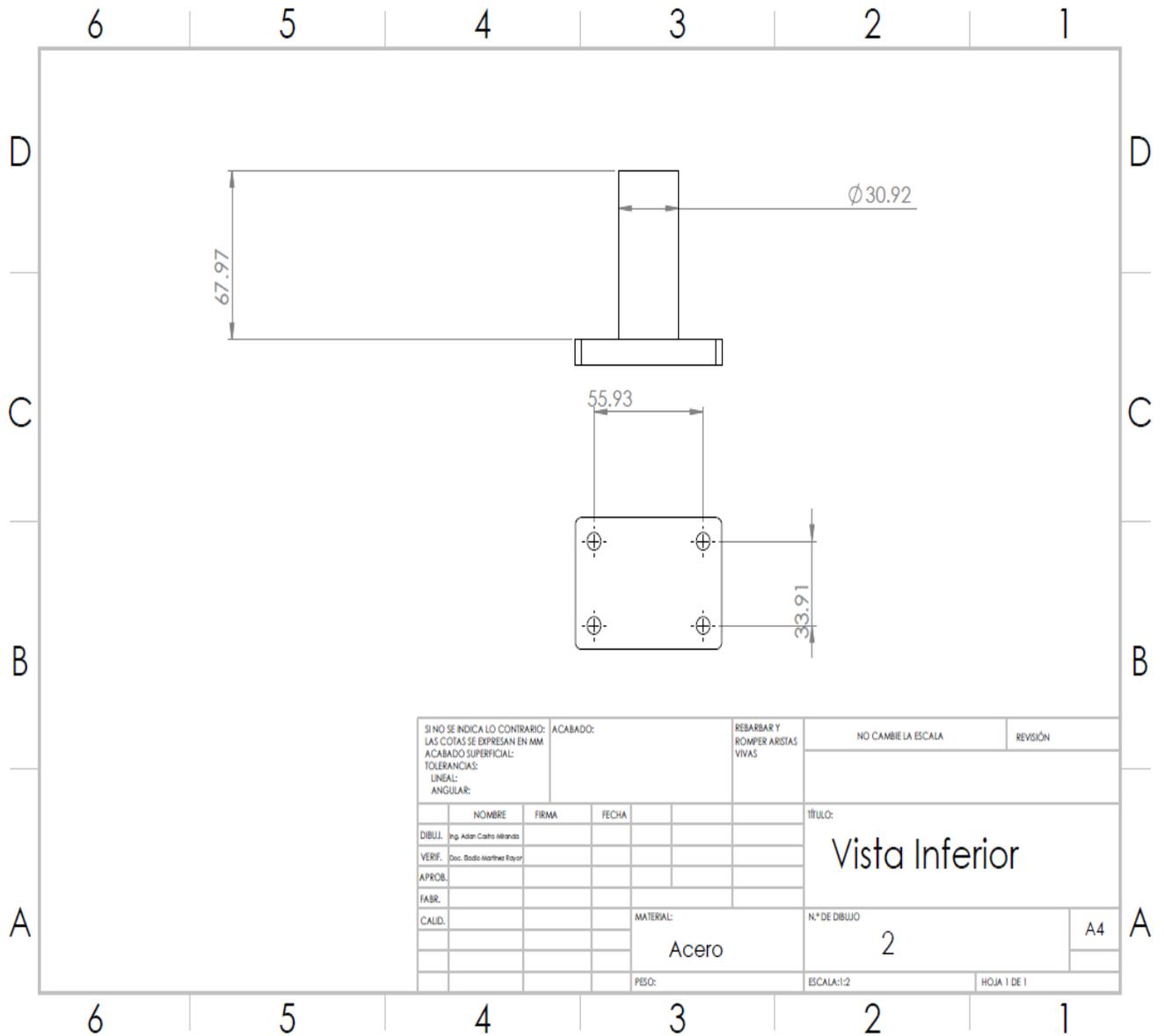


Figura B4.Vista Inferior del banco.

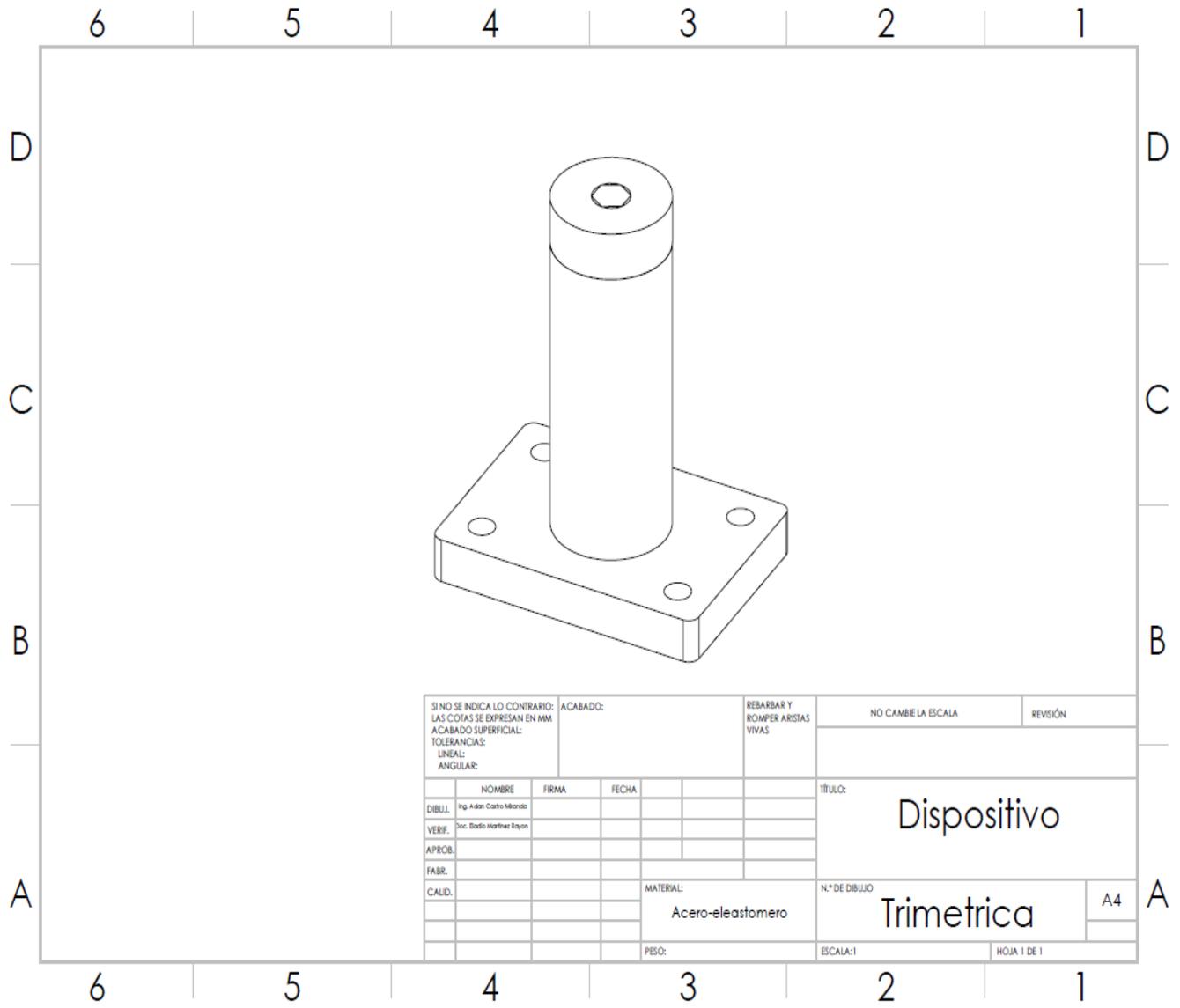


Figura B5. Vista Trimetrica del dispositivo terminado.