



“CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESPUMA DE
POLIETILENO SUJETA A CARGAS DE IMPACTO”

BAJO LA OPCIÓN:
TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:
JESÚS MAURICIO BRISEÑO RODRÍGUEZ

ASESOR:
DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA

SINODALES:
DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO
DR. IGNACIO RAMÍREZ VARGAS

Pachuca de Soto, Hgo. ENERO 2024
63 páginas



Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399



EDUCACIÓN



Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica
Departamento de Metalmecánica

Pachuca de Soto, Hgo., a **28/Agosto/2023**
Dependencia: **Depto. de Metalmecánica**
No. de Oficio: **DMM/009/2023**
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

**C. JESÚS MAURICIO BRISEÑO RODRÍGUEZ
P R E S E N T E**

Con el presente me permito informarle que el tema: "CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESPUMA DE POLIETILENO SUJETA A CARGAS DE IMPACTO" comprendido dentro de la opción: TITULACIÓN INTEGRAL; TESIS el cual fue solicitado por usted para obtener el Título Profesional, con esta fecha ha sido ACEPTADO por este departamento.

Para tal efecto le informo que a propuesta de la Academia de Ingeniería Mecánica se le ha designado como asesor al Dr. Luis Manuel Palacios Pineda y como comisión Revisora a: Dr. Ignacio Ramírez Vargas y al Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo, sugiriéndole se coordine con ellos a la brevedad posible para la optimización de tiempo en su proceso de Titulación.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"*

**ING. ALBERTO HERNÁNDEZ MORALES
JEFE DE DEPARTAMENTO**

C.p. Archivo.
AHM/maae



*Recibe Original
Jesús Mauricio Briseño Rodríguez*

[Handwritten signature]

6/Sep/2023





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica

Pachuca de Soto, Hidalgo, **04/Enero/2024**

No. de oficio: DMM/001/2024

Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional

**C. JESÚS MAURICIO BRISEÑO RODRÍGUEZ
PRESENTE**

De acuerdo al instructivo para Exámenes Profesionales del Tecnológico Nacional de México, se le autoriza la impresión de su trabajo Profesional cuyo título es:

"CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UNA ESPUMA DE POLIETILENO SUJETA A CARGAS DE IMPACTO"

OPCIÓN: TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

Una vez que han sido efectuados las correcciones indicadas por el jurado correspondiente.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"*


**ING. ALBERTO HERNÁNDEZ MORALES
JEFE DE DEPARTAMENTO**

C.p. Archivo.
AHM/maae



Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto,
Hidalgo Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: metalmecanica@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme llegar a este punto de la vida donde estoy terminando mi carrera profesional, por dejarme llegar sano y con el apoyo sincero e incondicional de mi familia.

Agradezco a mi familia porque cada día me han apoyado, me han llenado de buenos consejos, y han inculcado buenos valores en mi persona haciendo de mí un hombre de bien, honesto, leal, responsable y comprometido. Muchas gracias por siempre estar para mí en los momentos complicados y por orientarme a lo largo de mi vida.

Muchas gracias al Dr. Luis Manuel Palacios Pineda por siempre ser un excelente profesor y asesor, quien siempre estuvo al pendiente del progreso del trabajo, y me orientó con sus consejos, muchas gracias por su ayuda, su apoyo y su confianza.

Le agradezco al Dr. Ignacio Ramírez Vargas por su tutoría a lo largo de la carrera, por haberse tomado el tiempo de escucharme en algunas ocasiones y darme su consejo; muchas gracias por su excelente disposición y su guía durante toda la carrera.

Gracias a la Ing. Mariela Carolina Bravo Sánchez por ser una excelente compañera, por la paciencia, por orientarme todos los días y por su apoyo durante la realización de este trabajo.

El presente trabajo es para mí la unión de todo lo aprendido durante la carrera y le agradezco a mis profesores por siempre exigirme más y cultivar en mi un deseo continuo de aprender y de seguir adelante.

RESUMEN

El enfoque principal del presente proyecto de investigación se centra en el desarrollo, construcción y finalización de un sistema experimental de banco de pruebas de impacto, diseñado para llevar a cabo la caracterización dinámica de una variedad de materiales, especialmente aquellos destinados a aplicaciones en sistemas de amortiguación.

Las etapas de construcción están detalladamente documentadas en este informe, que presenta el trabajo llevado a cabo en el laboratorio de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Pachuca.

Las actividades realizadas para completar el sistema experimental se resumen en la medición, corte y rectificación de tolerancias de perfiles Bosch de dimensiones 5 x 5 cm. Además, se tomaron decisiones clave en la selección de elementos mecánicos y se procedió al rediseño de las partes estructurales necesarias para el sistema, incluyendo la ubicación del bastidor, la implementación de un sistema de liberación rápida y la configuración de una estructura para el polipasto, además, se fabricó un percutor adicional para complementar el que ya estaba en uso.

Dentro de los resultados obtenidos, se incluye la ejecución de ensayos cíclicos de compresión con el propósito de llevar a cabo la caracterización mecánica del polímero de polietileno de celda cerrada, así como la evaluación del efecto de Mullins con el fin de anticipar su respuesta y comportamiento.

CONTENIDO

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Contenido.....	iii
Índice de figuras.....	iv
Índice de Tablas	vii
Capítulo 1 Generalidades del proyecto	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Objetivo General	5
1.3.1 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación.....	5
Capítulo 2 Fundamentos teóricos.....	7
2.1 Softwares tipo CAE	7
2.1.1 Tracker.....	7
2.2 Softwares de Ingeniería para Programación	10
2.2.1 Python.....	10
2.2.2 Matlab	14
2.2.3 Wolfram Mathematica	18
2.3 Softwares de ingeniería de tipo CAM sobre manufactura aditiva.....	19
2.3.1 Cura.....	20
2.3.2 Z – Suite.....	24
2.4 Software de análisis de video.....	27
2.4.1 GOM Correlate.....	27
Capítulo 3 Finalización del dispositivo para pruebas experimentales en cargas de impacto	32
Capítulo 4 Caracterización del efecto de Mullins en polímero de polietileno de celda cerrada.	48
Conclusión.....	59
Referencias	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: a) Ejercicio resuelto. b) Ruta de vectores de velocidad de las diferentes masas de estudio.	8
Figura 2: a) Relación de posición en los ejes Y, X de la masa de estudio. b) Componentes y magnitud de velocidad del objeto de estudio en relación con el tiempo.	8
Figura 3: a) Aceleración del objeto. b) Gráfica de velocidad angular.	9
Figura 4: a) Aceleración angular. b) Ángulo de rotación.	9
Figura 5: a) Tabla de valores parte 1. b) Tabla de valores parte 2.	10
Figura 6: a) Código del ejercicio 1 de temperaturas. b) Resultados del ejercicio 1.	11
Figura 7: Código del ejercicio 2; importar librerías.	11
Figura 8: a) Gráfica de resultados del ejercicio 2. b) Obtención de diferentes gráficas en una misma hoja en el ejercicio 2; importar librerías.	12
Figura 9: a) Código para editar las gráficas del ejercicio 3. b) Gráfica de resultados del ejercicio 3; gráficas.	12
Figura 10: a) Llamado de librerías. b) Características de los gráficos.	13
Figura 11: a) Gráfico 1. b) Gráfico 2 del ejercicio 4.	13
Figura 12: Unión de los gráficos 1 y 2 del ejercicio 4.	13
Figura 13: a) Conjunto de datos en las probetas del eje X. b) Datos de las probetas en el eje Z.	14
Figura 14: a) Gráfica de la totalidad de los datos. b) Gráfica con la carga de 0 a 24 mm y descarga desde 12 a 0 mm.	14
Figura 15: Gráfica con carga de 0 a 24 mm y descarga desde 24 a 0 mm. B) Gráfica esfuerzo deformación, junto con la obtención de la pendiente.	15
Figura 16: a) Muestreo del 1% de la totalidad de los datos. b) Gráfica del comportamiento general del ciclo de carga y los ciclos de descarga.	15
Figura 17: a) Datos promedio del eje X. b) Gráfica promedio de las probetas en el eje X.	16
Figura 18: Recopilación de datos de cada probeta en Matlab.	16
Figura 19: a) Constantes del modelo para la probeta promedio en el eje Z. b) Gráfica de resultados para la probeta del eje Z.	17
Figura 20: Serie de ecuaciones para obtener las graficas de resultados.	19
Figura 21: a) Gráfica de aceleración. b) Gráfica de desplazamiento.	19
Figura 22: a) Pieza de trabajo. b) Acomodo, rotación y ubicación de la pieza en la zona de trabajo.	20
Figura 23: Panel de edición de la impresión.	21
Figura 24: a) Densidad y soporte de la pieza a imprimir. b) Vista previa final de la pieza a imprimir.	22
Figura 25: a) Hélice en software cura. b) Inicio del proceso de impresión 3D.	22
Figura 26: a) Panel de control de la impresora 3D. b) Hélice terminada aún en la zona de trabajo de la impresora 3D.	23
Figura 27: Hélice impresa en 3D.	23

Figura 28: a) Pieza a imprimir, aún en SolidWorks. b) Pieza a imprimir en Z - Suite.	25
Figura 29: a) Ubicación de la pieza en la zona de trabajo. b) Se escala la pieza de trabajo.	25
Figura 30: a) Forma de rotar la pieza de trabajo dentro del programa. b) Verificación de medidas, utilizando Z - Suite.	26
Figura 31: Panel de edición de los parámetros de impresión.	26
Figura 32: a) Vista previa final de la pieza a imprimir en Z – Suite. b) Pieza impresa en 3D.	27
Figura 33: a) Pantalla de inicio del software GOM Correlate. b) Proceso para iniciar un nuevo proyecto en GOM Correlate.	28
Figura 34: a) División del video en fotogramas. b) Definición de escala por puntos.	28
Figura 35: a) Selección del área de análisis. b) Proceso para eliminar cierta área de la zona de análisis.	29
Figura 36: a) Vista de medición 3D. b) Área de análisis para cada fotograma.	29
Figura 37: a) Área de análisis definida. b) Visibilidad del rango de valores del porcentaje de Épsilon en Y.	30
Figura 38: a) Selección del rango de colores. b) Zonas con diferente valor de Épsilon.	30
Figura 39: a) Selección de inspección por puntos. b) Colocación de los puntos en el área de análisis.	31
Figura 40: a) Valores de Épsilon en cada punto. b) Diagrama de resultados.	31
Figura 41: Etapa inicial del banco de pruebas experimentales.	33
Figura 42: Cabina superior del banco de pruebas.	34
Figura 43: a) Corte de uno de los perfiles de 500 mm. b) Corte de uno de los perfiles de 200 mm.	34
Figura 44: a) Proceso de limado del borde del perfil. b) Desbaste del filo del perfil de aluminio.	35
Figura 45: a) Proceso de armado de cabina. b) Armado de cabina del banco de pruebas.	35
Figura 46: a) Preparación de la superficie donde sería montada la cabina. b) Reforzamiento de las uniones en la parte superior del banco de pruebas.	36
Figura 47: a) Colocación de la cabina del polipasto en el banco de pruebas. b) Proceso de montaje de la cabina.	36
Figura 48: Cabina del polipasto sobre el banco de pruebas.	37
Figura 49: a) Vista lateral de la cabina del polipasto. b) Vista frontal de la cabina.	37
Figura 50: a) Corte de perfil de aluminio de 500 mm. b) Montaje del polipasto en la cabina.	38
Figura 51: a) Banco de pruebas con el polipasto montado b) Cabina con el polipasto.	38
Figura 52: a) Área de la probeta es mayor a la del percutor. b) Proceso para desmontar el percutor.	39
Figura 53: a) Colocación parte superior del percutor en el taladro de banco. b) Barrenado del percutor.	39

Figura 54: a) Colocación del anillo de unión en el percutor. b) Fijación del anillo con el percutor.	40
Figura 55: a) Colocación de la parte inferior del percutor en el taladro de banco. b) Barrenado de la parte inferior del percutor.	40
Figura 56: a) Marcaje de los puntos a barrenar en la placa de acero. b) Proceso de barrenado de la placa de acero.	41
Figura 57: a) Barrenado de la placa de acero. b) Proceso de lubricación.	41
Figura 58: a) Colocación del taladro para realizar los orificios de 3/8 de pulgadas. b) Segundo proceso de barrenado.	42
Figura 59: a) Maquinado de la parte inferior del percutor. b) Maquinado de la placa de acero.	42
Figura 60: a) Proceso de esmerilado de la pieza. b) Parte inferior del percutor lista para ser montada.	43
Figura 61: a) Colocación de la parte inferior del percutor en el banco de pruebas. b) Ajuste del percutor con los deslizadores.	43
Figura 62: a) Montaje de la parte superior del percutor en el banco de pruebas. b) Unión de ambas partes del percutor.	44
Figura 63: a) Vista frontal del percutor. b) Vista del banco de pruebas funcional y con el percutor montado.	44
Figura 64: a) Se toman las dimensiones de las placas de acrílico. b) Proceso de corte de las placas.	45
Figura 65: a) Deslizadores. b) Manijas.	45
Figura 66: a) Colocación de las placas alrededor del banco. b) Ajuste de los deslizadores.	46
Figura 67: a) Placas de acrílico montadas en el banco de pruebas. b) Instalación de manijas.	46
Figura 68: a) Sujetadores de pasador. b) Montaje de los sujetadores en las puertas de acrílico.	47
Figura 69: Probeta de polietileno durante la prueba de compresión.	50
Figura 70: Dimensiones y direcciones de las probetas utilizadas en las pruebas de compresión.	51
Figura 71: Microscopia óptica de polímero de polietileno.	52
Figura 72: Valores de tamaño de largo de la porosidad de las muestras de polietileno.	53
Figura 73: Curva de esfuerzo [MPa] - deformación unitaria [-] de la prueba promedio sobre los ejes X, Y, Z.	53
Figura 74: Curva compresiva cíclica dividida por una línea constante de carga y 2 líneas de descarga.	55
Figura 75: Ajuste de la curva sobre el eje Y.	56
Figura 76: Ajuste de la curva sobre el eje X.	56
Figura 77: Ajuste de la curva sobre el eje Z.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Constantes usadas en el material para el ajuste de los datos experimentales.....	18
Tabla 2: Módulo de rigidez (μ) según el eje de aplicación de las cargas de compresión a las probetas.....	54
Tabla 3: Constantes usadas en el material para el ajuste de los datos experimentales.....	55

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL PROYECTO

A continuación se detallan las bases sobre las cuales se desarrolla el proyecto, presentando una introducción del mismo, que habla sobre los temas que aborda el proyecto; se incluye una descripción de la empresa donde el proyecto fue elaborado; además de la problemática a la que nos enfrentamos; junto con los objetivos que se han planteado para considerar el éxito del proyecto y la justificación que detalla los diferentes motivos por los cuales se desea llevar a cabo el presente trabajo.

1.1 Introducción

El interés por conocer la respuesta dinámica de una espuma de polietileno que se encuentra sujeta a cargas de impacto, inicia por la necesidad de asegurar que al momento de empacar elementos o dispositivos, que son bastante delicados como los utilizados en la industria aeroespacial, estos llegaban a sufrir importantes daños durante su traslado, por lo cual, se tuvieron que perfeccionar las técnicas tanto de empaquetado como de traslado, de dichos elementos buscando obtener la mejor protección posible contra impactos en su entorno de distribución, al menor costo; desarrollando procesos de ingeniería donde la protección del producto, fuera capaz evitar que dispositivos sensibles se dañen por interferencias electromagnéticas, radiofrecuencia y absorber las vibraciones e impactos, que se producen durante el trayecto del envío, además de mejorar las técnicas y procesos de empaquetado, mediante la utilización de diferentes espumas, protectoras [7], [8]. Para lograr un diseño efectivo de protección de cualquier producto, es necesario tener en cuenta a las aceleraciones que se pueden presentar, durante el traslado de diferentes

componentes que pueden producir daños mecánicos, por lo cual, es necesario tener en cuenta la geometría, material y propiedades del elemento amortiguador, debido a que la disipación de la energía del impacto es proporcional a la deformación del amortiguador, por ello, primeramente se determina la fragilidad del elemento que se va a transportar, su peso, dimensiones y características a las que se expone en su traslado, para que, en relación a ello, se proponga un sistema de amortiguación de empaquetamiento; por lo cual, a partir del método utilizado en la teoría de los límites de daño y fragilidad del producto, donde utilizando datos sobre la transmisión de impactos en cojinetes comerciales, de la norma ASTM D 3332-77, se genera una curva de límite de daño usando una máquina de choque vertical, cuyo objetivo era descubrir las combinaciones de desaceleración, que provocarían daños al dispositivo con una orientación determinada durante un choque; este modelo es posible de transportar para sistemas plásticos semirrígidos, que toman en cuenta la fragilidad del material que amortiguarán [8], [11].

Las curvas de amortiguamiento relacionan la desaceleración máxima de un objeto que se libera en caída libre, a partir, de una altura determinada sobre un elemento amortiguador, como lo puede ser una espuma de polietileno; es posible consolidar todas las curvas de amortiguamiento en una relación única y válida para todas las alturas de caída y espesores de la espuma de amortiguamiento, utilizando el método de la curva dinámica de esfuerzo – deformación, la cual es de óptima aplicación para espumas de celda cerrada; pero requiere de la información completa de una de las curvas de amortiguamiento para transpolar los resultados a los diferentes valores de altura o de espesor; dichas curvas de amortiguamiento son desarrolladas utilizando los procedimientos experimentales descritos en las normas ASTM D 1596 y ASTM D 4168, donde se deja caer una masa determinada desde una altura fija en caída libre, relacionando la desaceleración máxima de la masa junto con la deformación que sufre la espuma amortiguadora, cuyos resultados otorgan las determinadas curvas de amortiguación (esfuerzo – deformación), de una espuma determinada, pero, estas normas requieren de un aproximado de 10 500 caídas, establecen parámetros para la altura de la caída libre y un aproximado de 175 horas en la realización de pruebas; para lograr crear un conjunto de curvas que permitan predecir el comportamiento de un solo material, por lo cual se usan diferentes métodos numéricos propuestos de sistemas que determinan las características de absorción de impacto del elemento amortiguador, mediante simulación basada en el uso del método de elemento finito, prediciendo la respuesta al impacto compresivo de estructuras truncadas, tridimensionales, espumas de poliestireno expandido y espumas de polietileno bajo pruebas cíclicas de carga y descarga, considerando el sistema como un masa/resorte no lineal, el cual proporciona una

curva de amortiguamiento que detalla el comportamiento y permite predecir el comportamiento de las espumas de polietileno a través de las curvas de esfuerzo – deformación [9], [10], [11], [12].

El modelo del efecto de Mullins apoyado del uso de las curvas de amortiguamiento, permite predecir el comportamiento, la deformación, los daños microestructurales y el tipo de rendimiento de materiales poliméricos como una espuma de polietileno de celda cerrada. El efecto de Mullins es un fenómeno fácil de observar en polímeros elastoméricos donde la relación esfuerzo – deformación se vuelve más flexible con el historial de deformación; este efecto se caracteriza por presentar una respuesta mucho más flexible a deformaciones de valor inferior que la deformación máxima previa, por lo cual, al aplicar cargas de forma cíclica sobre el elemento amortiguador la respuesta esfuerzo – deformación, permite que sea más sencillo lograr una deformación superior a la deformación máxima anterior, por lo tanto, entre más grande sea la deformación máxima antes de la descarga, la respuesta del elemento amortiguador es más suave. A lo largo de las últimas décadas se han propuesto modelos matemáticos que describen el efecto de Mullins, permitiendo predecir el comportamiento de materiales poliméricos sujetos a pruebas cíclicas de carga y descarga. Elías Zúñiga y sus coautores lograron desarrollar un modelo fenomenológico que describe el efecto de Mullins para el caucho, partiendo de datos experimentales y utilizando 3 constantes como el módulo de cortante, el número de cadenas moleculares específico del modelo de eslabones y el parámetro de velocidad de estiramiento; definiendo de esta manera la primer fase del material (dura) y conforme la evolución de los daños microestructurales descritos en el fenómeno esfuerzo – deformación, que sufre el material durante las pruebas cíclicas, se llega a la fase 2 (suave); este modelo ha sido utilizado para caracterizar el efecto de Mullins, en el comportamiento del inflado y desinflado de globos de goma para tensiones no monótonas. Se han realizado pruebas cíclicas en materiales biológicos con el objetivo de predecir el estiramiento por tensión residual utilizando el efecto de Mullins, el esfuerzo de Cauchy y la regla de mezclas equivalente [2], [3], [6], [13].

Del mismo modo se describen las diferentes acciones realizadas para lograr terminar con la construcción del banco de pruebas, lo cual nos permite realizar las pruebas experimentales que necesitamos para poder caracterizar la respuesta dinámica de los materiales poliméricos sujetos a cargas de impacto; este proyecto detalla desde la parte de la construcción de una cabina hecha con perfil Bosch cuyo propósito es de resguardar al polipasto en la parte superior del banco, de igual forma se muestra el montaje de dicha cabina, el proceso realizado para armar y montar

en el banco de pruebas al percutor y el procedimiento realizado para instalar las puertas de acrílico de protección que hacen al banco más seguro, junto con sus sujetadores y agarraderas.

Se cuenta con un apartado que describe información basada en el artículo “Caracterización del efecto de Mullins en polímero de polietileno de celda cerrada”, que será presentado en el congreso de SOMIM del año en curso, y cuyos autores son Mariela Carolina Bravo Sánchez, Luis Manuel Palacios Pineda, Alex Elías Zúñiga y Jesús Mauricio Briseño Rodríguez, donde se muestra la caracterización del material polimérico de polietileno con celda cerrada sometido a cargas compresivas cíclicas, teniendo en cuenta que se utilizó la Norma ASTM D1621-00, la cual se encarga de establecer los diferentes parámetros y requisitos necesarios para realizar las pruebas compresivas en materiales poliméricos. Utilizando la regla de mezclas equivalente; se determinó el modelo del efecto de Mullins, permitiendo un ajuste más preciso de las curvas analíticas, que describen la densidad de deformación de energía y se determinaron constantes que permitirán predecir el comportamiento del reblandecimiento en el material de estudio.

1.2 Planteamiento del problema

- a) Capacitarse en diferentes softwares ingenieriles que permitan desarrollar modelos matemáticos que proporcionen ciertos resultados que sirvan para determinar las condiciones o parámetros necesarios que nuestro modelo de pruebas deberá cumplir para realizar pruebas experimentales de forma exitosa; además de analizar mediante el uso de los softwares la respuesta dinámica de los materiales poliméricos sujetos a cargas de impacto.
- b) Finalizar la construcción del banco de pruebas para poder realizar pruebas experimentales y poder caracterizar la respuesta dinámica de los materiales poliméricos sujetos a cargas de impacto; además de añadir accesorios de seguridad que permitan la realización de las pruebas de forma segura y confiable.
- c) Realización de las pruebas experimentales bajo las condiciones de la norma ASTM D1621-00, que establece los parámetros necesarios para pruebas compresivas cíclicas experimentales en materiales poliméricos.

- d) Caracterización y análisis de la respuesta dinámica de los materiales poliméricos sujetos a cargas de impacto, usando la regla de mezclas equivalente y determinar el modelo del efecto de Mullins, para realizar un ajuste de curvas analíticas, que sean capaces de describir la densidad de deformación de energía y determinar las constantes que predigan el comportamiento del reblandecimiento en el material de estudio.

1.3 Objetivo General

El objetivo de este trabajo es brindarle al estudiante una capacitación extensa sobre las herramientas necesarias para desarrollar una buena caracterización de la respuesta al impacto en materiales poliméricos.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Capacitación en CAE (TRACKER), capacitación en programación (Python, MatLab, Mathematica), capacitación en manufactura aditiva (Ultimaker Cura, Z – Suite), análisis de video (GOM Correlate)
- Diseñar y fabricar la estructura protectora del polipasto.
- Culminar con la fabricación del sistema experimental banco de pruebas.
- Obtener la curva esfuerzo – deformación unitaria del polímero de polietileno para compresión.
- Analizar y post procesar los datos obtenidos de las pruebas cíclicas compresivas en materiales poliméricos.
- Participar en la elaboración del artículo científico para el SOMIM.

1.4 Justificación

La aportación de conocimientos científicos hacia el diseño de sistemas ingenieriles de absorción de energía genera un gran impacto en el área aeroespacial, ya que disminuye costos al salvaguardar la vida de las partes durante su manipulación y transportación hasta el consumidor final. Iniciando el siglo XX, se ha intensificado el desarrollo de modelos matemáticos fractales, ya que, se ha concluido que las leyes

tienen limitaciones para el estudio de accidentes geográficos alpinos fluctuantes, la morfología vegetal compleja y la superficie de la fractura rugosa.

Por lo cual es de gran utilidad el desarrollar un modelo matemático que permita modelar el comportamiento fractal de los materiales poliméricos; esta investigación presentará el conocimiento tecnológico que ayuda al diseño de dispositivos aisladores de vibración, actuadores y sensores sometidos a cargas multiaxiales. Los resultados podrán generar sistemas de amortiguamiento más eficientes, sin la incertidumbre que da el desprecio de aspectos como la porosidad. La teoría fractal y el índice fraccionario permiten modelar los fenómenos físicos que presentan problemas de discontinuidad.

El realizar una caracterización de la respuesta dinámica de estos materiales poliméricos sujetos a cargas de impacto es de vital importancia para generar una cubierta para partes costosas del área aeroespacial, como hardware y misiles. Los primeros materiales para embalaje fueron contenedores de metal, que protegían el producto, sin embargo, su peso era excesivo cuando se trataba de transportación aérea.

Posteriormente se llegaron a ocupar cajas de madera, pero producían grandes daños ambientales. Por lo cual finalmente, se optó por usar de espuma de plástico, lo cual revolucionó la manera de empaquetado, ya que se pueden modelar diversas figuras en este material, es versátil, puede ser transparente y sus propiedades cumplen con el resguardo del producto; además de adoptar la forma exacta del producto y protegerlo de al 100%.

El estudio de estas probetas las cuales se encuentran sujetas a cargas dinámicas son fenómenos no lineales; además de que los materiales polímeros tienen algunos intersticios en su cuerpo, es decir, porosidad. Por lo cual al estudiarlas obtendremos un fenómeno complejo difícil de modelar con las leyes y herramientas convencionales, por ello es de gran impacto la obtención de este modelo matemático con ayuda del cálculo fractal.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Dentro del presente capítulo se detallan softwares de ingeniería tipo CAE (Tracker); softwares de ingeniería para programación (Python, MatLab y Mathematica); softwares de ingeniería tipo CAM de manufactura aditiva (Cura y Z – Suite); y un software de análisis de video (GOM Correlate); de los cuales recibí una capacitación para poder desarrollar el proyecto; con estos programas se es capaz de construir diferentes modelos matemáticos, analizarlos, estudiarlos, obtener resultados y de igual forma determinar las características que debe de cumplir nuestro modelo para poder realizar pruebas experimentales; y posteriormente analizar los resultados para realizar un reporte de los mismos.

2.1 Softwares tipo CAE

2.1.1 Tracker

Tracker es un programa gratuito para la construcción de modelos matemáticos mediante el análisis de videos; su código es abierto y permite un seguimiento manual o automático de la posición, velocidad y aceleración de un objeto en específico en el video, además ofrece el seguimiento de centros de masa, los gráficos de los vectores y una de sus principales características es que las superposiciones de los modelos pueden sincronizarse y escalarse al video comparándolo directamente con el mundo real, tanto en medidas como en velocidades.

El programa permite seguir objetos, determinando su posición en función del tiempo, la velocidad – tiempo, aceleración – tiempo, y muchas representaciones de

magnitudes cinemáticas, dinámicas y energéticas, para posteriormente graficar dichos valores y realizar un análisis de los resultados, determinando de esta forma y con un alto grado de fiabilidad si nuestro modelo propuesto en realidad es viable. La capacitación de este programa permite ubicar y colocar los ejes de coordenadas necesarios para analizar videos (figura 1 – a), además de trazar la ruta de vectores de velocidad que sigue una masa determinada (figura 1 – b), para calcular sus variaciones en función del tiempo.

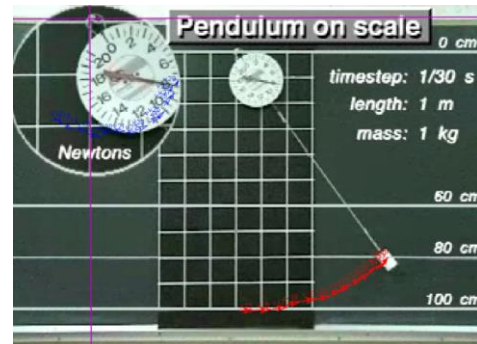
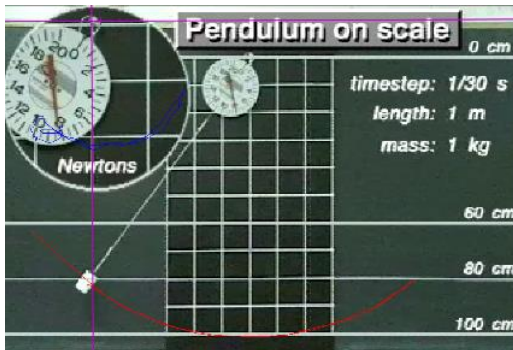


Figura 1: a) Ejercicio resuelto. b) Ruta de vectores de velocidad de las diferentes masas de estudio.

De esta manera se puede correr el programa y obtener las gráficas de relación de posición en los diferentes ejes (figura 2 – a); además de las componentes y magnitud de velocidad del objeto que se esté analizando en función del tiempo (figura 2 – b).

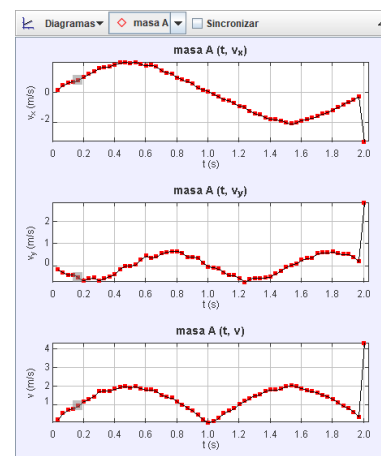
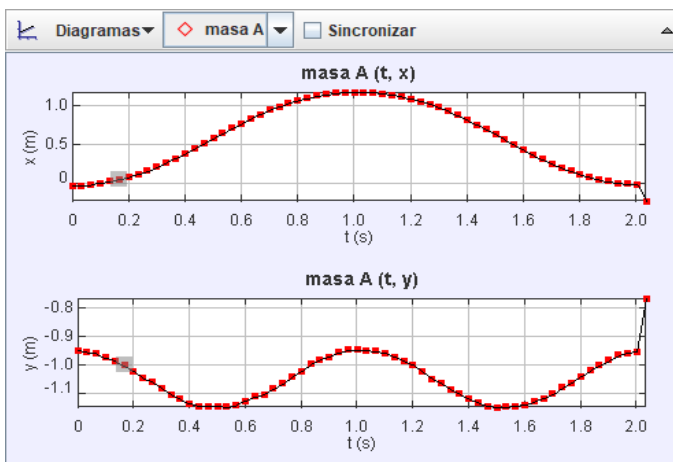


Figura 2: a) Relación de posición en los ejes Y, X de la masa de estudio. b) Componentes y magnitud de velocidad del objeto de estudio en relación con el tiempo.

Dentro del mismo programa se pueden seguir obteniendo gráficas como lo es la aceleración del cuerpo de estudio (figura 3 – a), o la velocidad angular del mismo cuerpo (figura 3 – b).

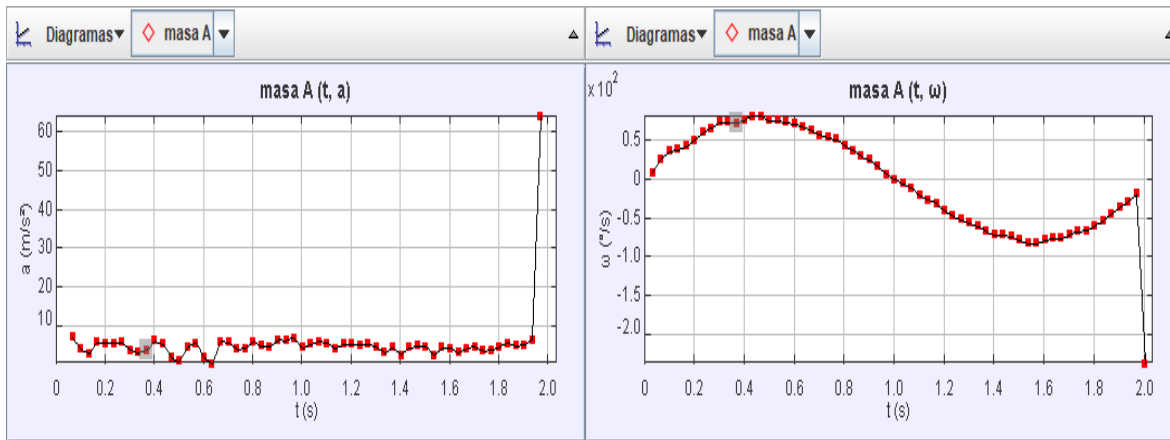


Figura 3: a) Aceleración del objeto. b) Gráfica de velocidad angular.

Durante la resolución del ejercicio propuesto también se obtuvieron las curvas de la aceleración angular del objeto de estudio, la cual es visible en la figura 4 – a, y la curva del ángulo de rotación que experimenta el cuerpo que se está analizando; esta la podemos ver en la figura 4 – b. Sin embargo, cabe resaltar que se pueden obtener en el programa muchas otras variables, esto dependiendo del análisis realizado y del objetivo del mismo.

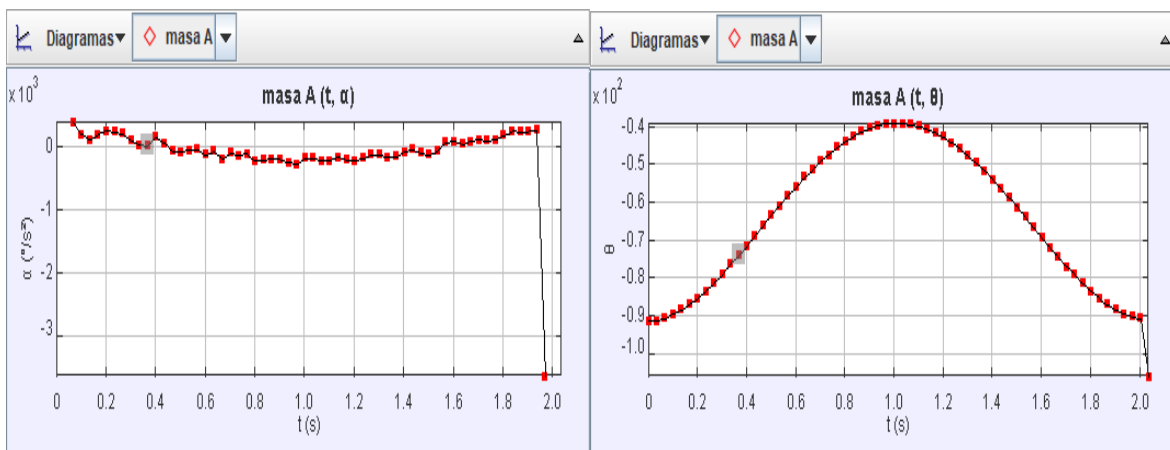


Figura 4: a) Aceleración angular. b) Ángulo de rotación.

De igual forma este programa de análisis de video otorga una tabla con resultados de la variación de la masa de estudio en función del tiempo; algunos de estos resultados son la posición de dicha masa en los diferentes ejes, también se pueden

obtener las componentes y la magnitud de la velocidad de la masa en un momento del tiempo, la aceleración de dicha masa, su ángulo de rotación, la velocidad angular, la aceleración angular y la magnitud del momento del objeto; esta la tabla de valores la podemos observar en la figuras 5 – a y la figura 5 – b.

t (s)	x (m)	y (m)	v (m/s)	a (m/s ²)	θ	ω (°/s)	α (°/s ²)	p (kg m/s)
0.000	-2.189E-2	-0.947			-91.3			
0.033	-2.192E-2	-0.953	0.234		-91.3	10.1		0.234
0.067	-1.088E-2	-0.958	0.552	7.276	-90.7	27.6	391.7	0.552
0.100	8.967E-3	-0.973	0.745	4.333	-89.5	36.8	190.6	0.745
0.133	3.104E-2	-0.985	0.802	3.071	-88.2	39.5	103.4	0.802
0.167	5.531E-2	-1.000	0.956	6.035	-86.8	43.5	189.8	0.956
0.200	8.398E-2	-1.020	1.195	5.678	-85.3	52.0	252.1	1.195
0.234	0.121	-1.045	1.320	5.741	-83.4	61.1	228.7	1.320
0.267	0.163	-1.058	1.459	5.988	-81.2	67.0	201.8	1.459
0.300	0.212	-1.081	1.724	4.015	-78.9	74.1	91.6	1.724
0.334	0.269	-1.103	1.751	3.418	-76.3	74.6	19.9	1.751
0.367	0.322	-1.119	1.753	3.944	-73.9	73.2	17.9	1.753
0.400	0.382	-1.134	1.859	6.436	-71.4	77.0	154.2	1.859
0.434	0.444	-1.144	1.960	5.483	-68.8	82.8	60.2	1.960
0.467	0.513	-1.144	1.989	2.271	-65.9	82.9	-86.6	1.989
0.501	0.577	-1.144	1.923	1.136	-63.2	76.6	-86.3	1.923
0.534	0.641	-1.144	1.990	4.851	-60.7	77.0	-57.1	1.990
0.567	0.710	-1.140	1.880	5.852	-58.1	74.3	-46.2	1.880
0.601	0.765	-1.125	1.817	2.289	-55.8	71.9	-123.3	1.817
0.634	0.827	-1.110	1.827	0.635	-53.3	68.3	-76.6	1.827
0.667	0.885	-1.101	1.745	6.284	-51.2	64.5	-195.0	1.745
0.701	0.940	-1.082	1.533	6.075	-49.0	58.0	-98.1	1.533
0.734	0.980	-1.064	1.438	4.343	-47.4	54.4	-135.8	1.438
0.767	1.026	-1.040	1.394	4.407	-45.4	52.6	-109.4	1.394
0.801	1.062	-1.020	1.168	6.200	-43.9	44.6	-228.5	1.168
0.834	1.091	-0.998	1.021	5.022	-42.4	38.7	-207.7	1.021
0.868	1.117	-0.981	0.831	4.884	-41.3	30.0	-191.3	0.831
0.901	1.140	-0.970	0.690	6.627	-40.4	25.6	-200.2	0.690
0.934	1.155	-0.954	0.471	6.535	-39.6	18.0	-243.5	0.471
0.968	1.160	-0.945	0.212	7.097	-39.2	7.9	-271.8	0.212
1.001	1.166	-0.945	7.413E-2	4.621	-39.0	0.6	-174.7	7.413E-2
1.034	1.164	-0.948	0.120	5.656	-39.2	-4.4	-180.9	0.120
1.068	1.160	-0.950	0.297	6.141	-39.3	-10.4	-226.6	0.297
1.101	1.146	-0.956	0.552	5.825	-39.8	-20.2	-226.0	0.552
1.134	1.128	-0.970	0.683	4.443	-40.7	-25.9	-165.1	0.683
1.168	1.111	-0.985	0.819	5.461	-41.6	-30.3	-206.6	0.819

t (s)	x (m)	y (m)	v (m/s)	a (m/s ²)	θ	ω (°/s)	α (°/s ²)	p (kg m/s)
0.868	1.117	-0.981	0.831	4.884	-41.3	30.0	-191.3	0.831
0.901	1.140	-0.970	0.690	6.627	-40.4	25.6	-200.2	0.690
0.934	1.155	-0.954	0.471	6.535	-39.6	18.0	-243.5	0.471
0.968	1.160	-0.945	0.212	7.097	-39.2	7.9	-271.8	0.212
1.001	1.166	-0.945	7.413E-2	4.621	-39.0	0.6	-174.7	7.413E-2
1.034	1.164	-0.948	0.120	5.656	-39.2	-4.4	-180.9	0.120
1.068	1.160	-0.950	0.297	6.141	-39.3	-10.4	-226.6	0.297
1.101	1.146	-0.956	0.552	5.825	-39.8	-20.2	-226.0	0.552
1.134	1.128	-0.970	0.683	4.443	-40.7	-25.9	-165.1	0.683
1.168	1.111	-0.985	0.819	5.461	-41.6	-30.3	-206.6	0.819
1.201	1.082	-0.998	1.058	5.635	-42.7	-39.7	-228.4	1.058
1.235	1.051	-1.022	1.207	5.423	-44.2	-46.6	-186.6	1.207
1.268	1.017	-1.047	1.364	5.656	-45.8	-51.1	-130.0	1.364
1.301	0.969	-1.062	1.502	4.759	-47.6	-55.9	-131.6	1.502
1.335	0.924	-1.084	1.564	3.418	-49.5	-59.6	-162.0	1.564
1.368	0.871	-1.099	1.740	4.851	-51.6	-66.4	-155.9	1.740
1.401	0.814	-1.119	1.826	2.810	-54.0	-71.0	-83.3	1.826
1.435	0.754	-1.132	1.827	4.586	-56.3	-71.2	-34.7	1.827
1.468	0.694	-1.142	1.871	5.118	-58.7	-73.2	-99.0	1.871
1.502	0.630	-1.147	1.990	4.884	-61.2	-77.8	-126.1	1.990
1.535	0.561	-1.146	2.056	2.555	-63.9	-82.1	-60.2	2.056
1.568	0.493	-1.144	1.992	4.656	-66.7	-82.0	69.2	1.992
1.602	0.429	-1.139	1.875	4.434	-69.4	-77.3	84.7	1.875
1.635	0.369	-1.126	1.788	3.418	-71.9	-75.4	40.5	1.788
1.668	0.311	-1.116	1.730	4.416	-74.4	-75.6	78.4	1.730
1.702	0.256	-1.101	1.657	4.834	-76.9	-70.3	115.0	1.657
1.735	0.208	-1.078	1.545	3.861	-79.1	-66.8	95.0	1.545
1.768	0.161	-1.060	1.454	3.974	-81.4	-65.1	114.6	1.454
1.802	0.119	-1.038	1.320	4.834	-83.4	-58.9	179.7	1.320
1.835	8.398E-2	-1.018	1.143	5.852	-85.3	-52.7	241.8	1.143
1.869	5.310E-2	-1.000	0.956	5.141	-87.0	-43.5	236.1	0.956
1.902	3.105E-2	-0.982	0.823	5.334	-88.2	-35.5	239.3	0.823
1.935	1.122E-2	-0.965	0.637	6.627	-89.3	-28.9	258.6	0.637
1.969	-2.017E-3	-0.956	0.359	64.15	-90.1	-17.8	-3607.2	0.359
2.002	-8.634E-3	-0.951	4.323		-90.5	-236.7		4.323
2.036	-0.218	-0.765			-105.9			

Figura 5: a) Tabla de valores parte 1. b) Tabla de valores parte 2.

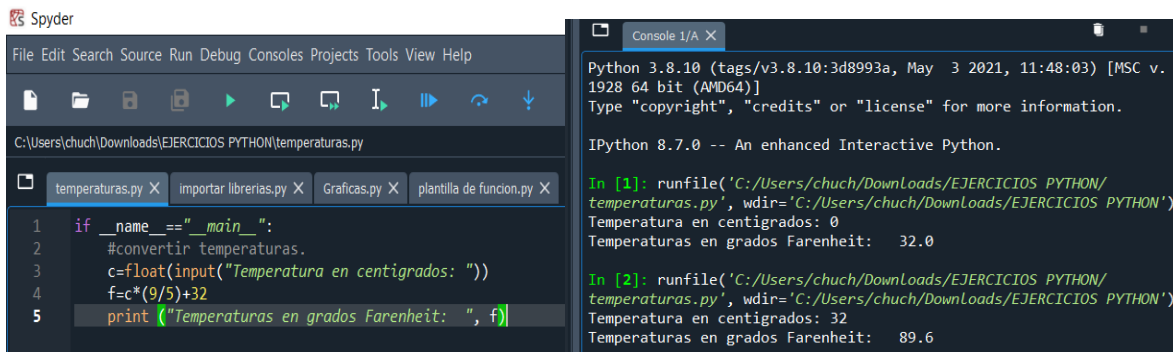
2.2 Softwares de Ingeniería para Programación

2.2.1 Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, utilizado para desarrollar aplicaciones de todo tipo; es un lenguaje sencillo de leer y de escribir, su código es abierto, gratuito y se puede ejecutar en diferentes plataformas; este lenguaje permite que los programadores sean más productivos pues requieren de menos líneas de código para realizar un programa; además de contar con una gran biblioteca que tiene códigos que se pueden reutilizar para evitar escribir el código desde cero; este lenguaje es compatible con la programación en Java, C y C++.

La capacitación dentro de los softwares de ingeniería para programación, como el software de Spyder que utiliza lenguaje de programación Python, mediante la realización de diferentes ejercicios, a través de los cuales aprendimos a introducir

formulas al programa para que este solicite datos y otorgue ciertos resultados. Un ejemplo de esto es el ejercicio 1 de temperaturas donde el programa solicita una temperatura en grados centígrados y otorga el valor de la misma temperatura en grados Fahrenheit, como lo podemos ver en el código expresado en la figura 6 – a, y la funcionalidad del programa en la figura 6 – b.



The image shows the Spyder IDE interface. On the left, the code editor displays the following Python code for exercise 1:

```

1 if __name__ == "__main__":
2     #convertir temperaturas.
3     c=float(input("Temperatura en centigrados: "))
4     f=c*(9/5)+32
5     print ("Temperaturas en grados Farenheit: ", f)

```

On the right, the console window shows the execution results:

```

Python 3.8.10 (tags/v3.8.10:3d8993a, May  3 2021, 11:48:03) [MSC v.
1928 64 bit (AMD64)]
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.

IPython 8.7.0 -- An enhanced Interactive Python.

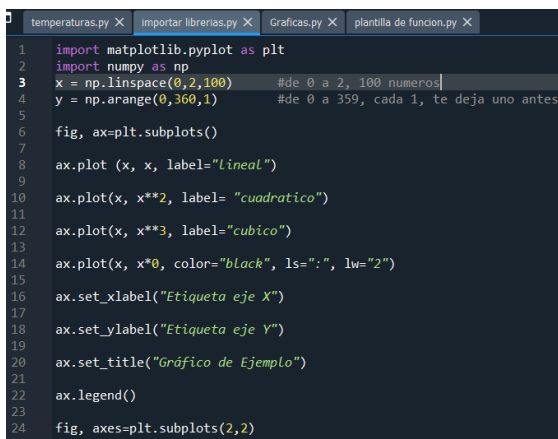
In [1]: runfile('C:/Users/chuch/Downloads/EJERCICIOS PYTHON/
temperaturas.py', wdir='C:/Users/chuch/Downloads/EJERCICIOS PYTHON')
Temperatura en centigrados: 0
Temperaturas en grados Farenheit:  32.0

In [2]: runfile('C:/Users/chuch/Downloads/EJERCICIOS PYTHON/
temperaturas.py', wdir='C:/Users/chuch/Downloads/EJERCICIOS PYTHON')
Temperatura en centigrados: 32
Temperaturas en grados Farenheit:  89.6

```

Figura 6: a) Código del ejercicio 1 de temperaturas. b) Resultados del ejercicio 1.

Al realizar el ejercicio 2 se observa la forma correcta en que se deben introducir diferentes librerías para que las funciones y las gráficas se puedan ejecutar dentro del programa como se observa en la figura 7.



The image shows the Spyder IDE code editor with the following Python code for exercise 2:

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 x = np.linspace(0,2,100) #de 0 a 2, 100 numeros
4 y = np.arange(0,360,1) #de 0 a 359, cada 1, te deja uno antes
5
6 fig, ax=plt.subplots()
7
8 ax.plot(x, x, label="Lineal")
9
10 ax.plot(x, x**2, label="cuadratico")
11
12 ax.plot(x, x**3, label="cubico")
13
14 ax.plot(x, x*0, color="black", ls=":", lw="2")
15
16 ax.set_xlabel("Etiqueta eje X")
17
18 ax.set_ylabel("Etiqueta eje Y")
19
20 ax.set_title("Gráfico de Ejemplo")
21
22 ax.legend()
23
24 fig, axes=plt.subplots(2,2)

```

Figura 7: Código del ejercicio 2; importar librerías.

Dentro del mismo ejercicio se expresa la manera en la cual nosotros podemos graficar funciones y establecer el rango de valores que queremos que nos muestre dicha función en la gráfica; y del mismo modo a poner etiquetas en las gráficas, cambiar los colores de las líneas, y a solicitar una cantidad determinada de graficas dentro de la misma hoja; como se muestra en la figuras 8 – a y la figura 8 – b.

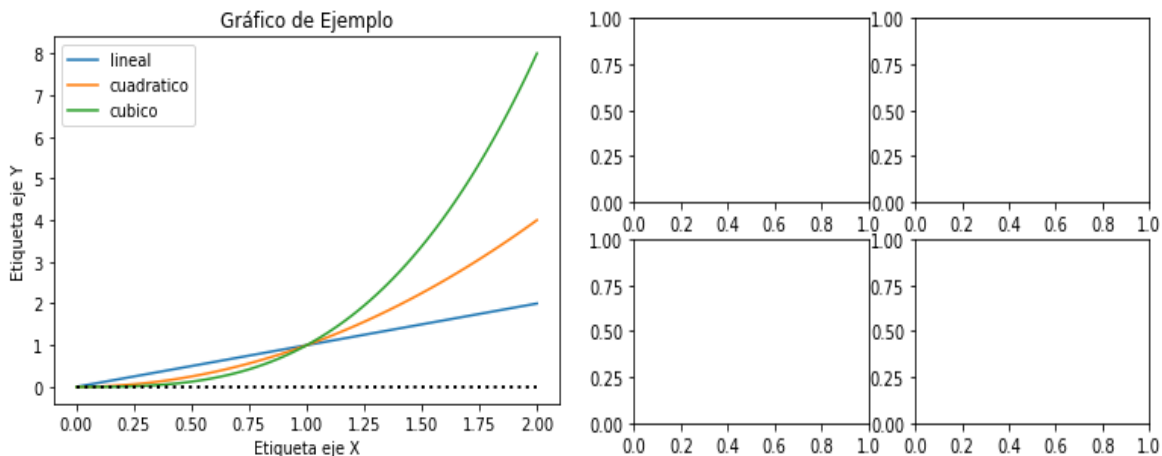


Figura 8: a) Gráfica de resultados del ejercicio 2. b) Obtención de diferentes gráficas en una misma hoja en el ejercicio 2; importar librerías.

El ejercicio 3 consiste en aprender la forma de editar las gráficas, su color de líneas, sus rangos de valores, los comentarios, las marcas punteadas que guían la línea y el trazo a través de dichas marcas; esto es visible en el código de la figura 9 – a y sus resultados se encuentran en la figura 9 – b.

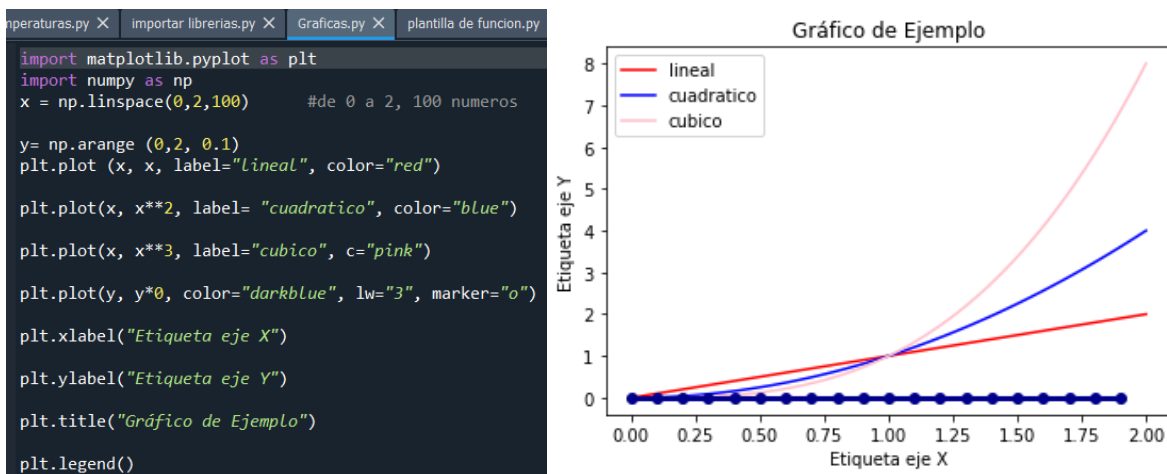


Figura 9: a) Código para editar las gráficas del ejercicio 3. b) Gráfica de resultados del ejercicio 3; gráficas.

En el ejercicio 4 se detalla la forma de llamar a las librerías que permitirán colocar funciones y graficarlas (figura 10 – a), además de establecer las características del primer gráfico, sus marcas, colores, y sus rangos en los ejes X, y Y, como se muestra en la figura 10 – b.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def plot_function(ax, data1, data2, param_dict):
    """
    Una función de ayuda para hacer un gráfico con matplotlib.pyplot
    """
    # Parámetros
    # ax: Axes
    # Las ejes sobre los cuales dibujar
    # data1: array
    # El primer vector de datos (x)
    # data2: array
    # El segundo vector de datos (x)
    # param_dict: dict
    # Diccionario de parámetros para pasarle a ax.plot
    # Devuelve
    # out: list
    # Lista de objetos de tipo "Artist" actualizados
    """
    out = ax.plot(data1, data2, **param_dict)
    return out

#Figura 1
fig, ax = plt.subplots(1,1)
data_a = [1,2,3,4]
data_b = [2,3,4,5]
par_dict = {"marker": "o", "color": "blue", "markersize": 12}
plot_function(ax = ax, data1 = data_a, data2 = data_b, param_dict = par_dict)

#Figura 2
fig, ax = plt.subplots(1,1)
par_dict = {"marker": "x", "color": "orange", "markersize": 12}
data_c = [10,20,30,40]
data_d = [100,200,300,400]
plot_function(ax = ax, data1 = data_c, data2 = data_d, param_dict = par_dict)

fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1,2)
plot_function(ax = ax1, data1 = data_a, data2 = data_b, param_dict = {"marker": "x", "color": "red", "markersize": 6})
plot_function(ax = ax2, data1 = data_c, data2 = data_d, param_dict = {"marker": "o", "color": "green", "markersize": 12})
    
```

Figura 10: a) Llamado de librerías. b) Características de los gráficos.

Posterior a ello se colocan las marcas y colores; para obtener el gráfico 1, que se muestra en la figura 11 – a, luego se realiza el mismo procedimiento con características diferentes para obtener un gráfico 2, mostrado en la figura 11 – b.

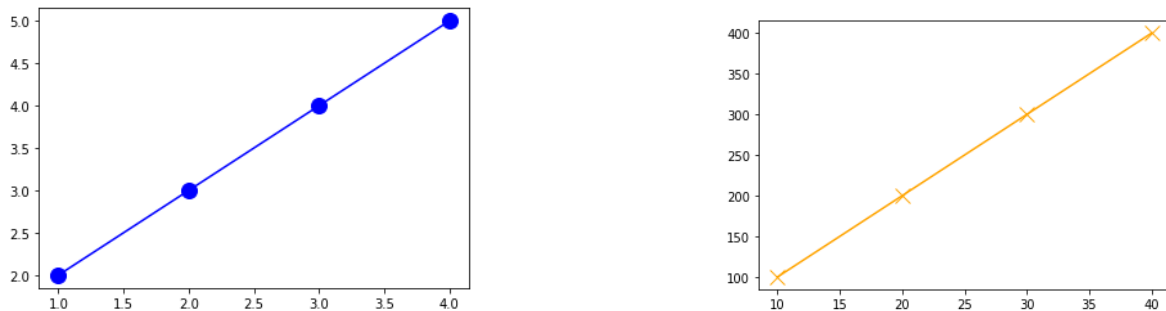


Figura 11: a) Gráfico 1. b) Gráfico 2 del ejercicio 4.

Posteriormente; se juntaron ambas gráficas para poder observar las diferencias; tanto en marcas, colores, rangos y posiciones; como se muestra en la figura 12.

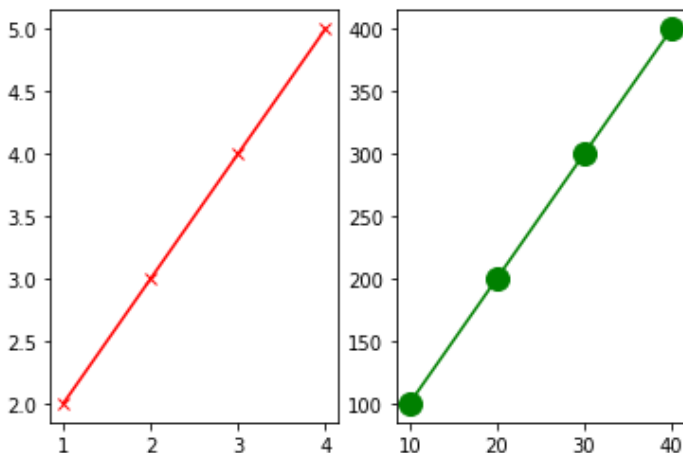


Figura 12: Unión de los gráficos 1 y 2 del ejercicio 4.

2.2.2 Matlab

A partir de pruebas experimentales compresivas realizadas en una máquina universal, se obtuvieron datos de carga deformación, que posteriormente al ser procesados se generaron los valores de esfuerzo de esfuerzo deformación unitaria respectivamente. Con lo que se recopilaron datos de 11 pruebas, consideradas a lo largo de cada eje de aplicación de la carga (x, y, z). En las figuras 13 – a y 13 – b, se puede observar la subdivisión de los datos en data, data 1 y data 2, donde respectivamente se tiene la carga total y las 2 descargas. Los ciclos considerados en este proceso fueron de 12 mm y 24 mm.

Figura 13: a) Conjunto de datos en las probetas del eje X. b) Datos de las probetas en el eje Z.

Al graficar la fuerza y la deformación se obtienen gráficas como la presentada en la figura 14 – a. Posteriormente, del total de datos fueron segmentados los valores de deformación de la probeta desde 0 hasta 24 mm, con su respectivo valor de fuerza, formando las columnas Xdata y Ydata; estos valores fueron graficados junto con las columnas Xdata 1 y Ydata 1, en las cuales se colocaron los valores de descarga desde 12 mm hasta 0 mm, creando la figura 14 – b.

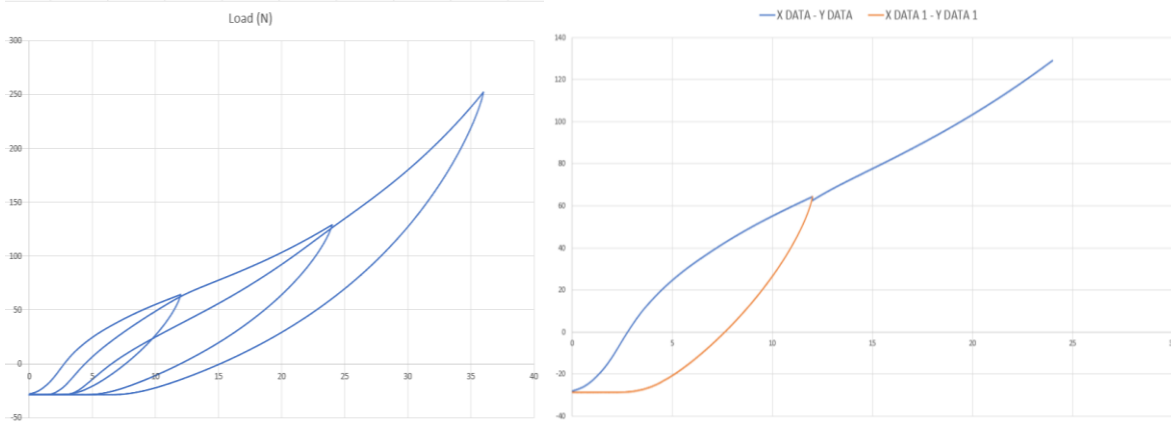


Figura 14: a) Gráfica de la totalidad de los datos. b) Gráfica con la carga de 0 a 24 mm y descarga desde 12 a 0 mm.

Como siguiente se graficaron para cada probeta el segmento de valores que constituyen la carga desde 0 hasta 24 mm (Xdata, Ydata), junto con las columnas Xdata 2 y Ydata 2 que contienen los valores de descarga desde 24 hasta 0 mm; lo cual se puede ver en la figura 15 – a, una vez obtenidas dichas gráficas, se calcularon, tanto el esfuerzo como la deformación de la probeta obteniendo la pendiente de cada curva y para cada una de las probetas, como se muestra en la figura 15 – b.

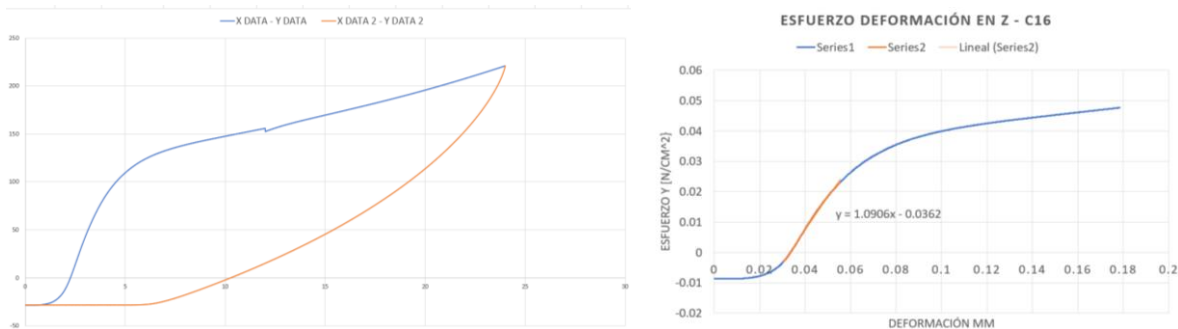


Figura 15: Gráfica con carga de 0 a 24 mm y descarga desde 24 a 0 mm. B) Gráfica esfuerzo deformación, junto con la obtención de la pendiente.

En cada una de las probetas se realizaron pruebas cíclicas de compresión y en cada probeta se obtuvieron cantidades enormes de datos, por lo cual se decidió tomar el 1% de los datos para conocer el comportamiento general de las gráficas en el ciclo de carga de 0 a 24 mm y en los ciclos de descarga de 12 a 0 mm y de 24 a 0 mm; como se muestra en las figuras 16 – a y 16 – b.

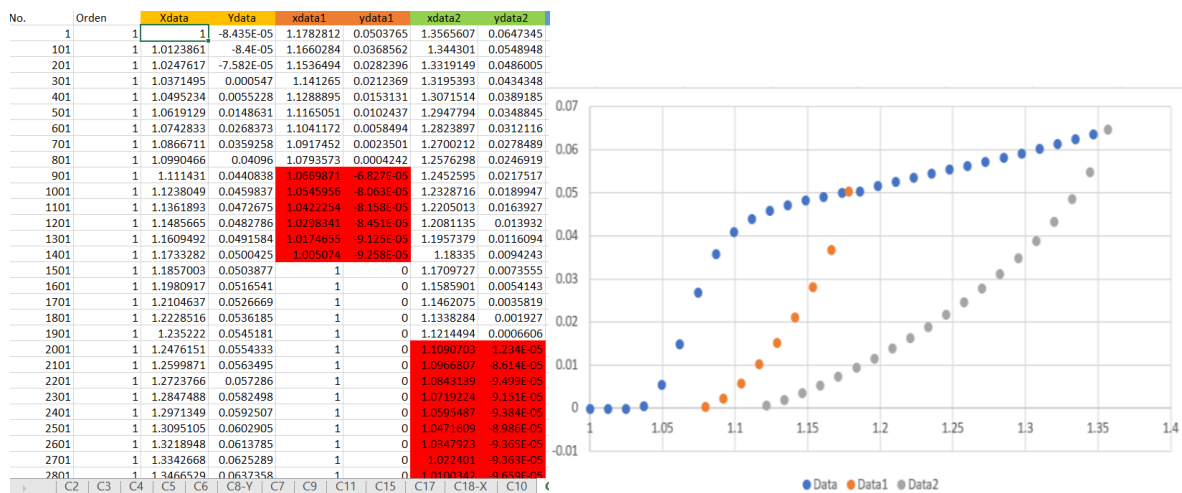


Figura 16: a) Muestreo del 1% de la totalidad de los datos. b) Gráfica del comportamiento general del ciclo de carga y los ciclos de descarga.

Una vez que realizadas todas las gráficas que indicaran el comportamiento de las probetas, se seleccionan 3; una en el eje X, en el eje Y y en el eje Z, que contienen un comportamiento promedio de las probetas en sus respectivos ejes de prueba, como se muestra en las figuras 17 – a y 17 – b.

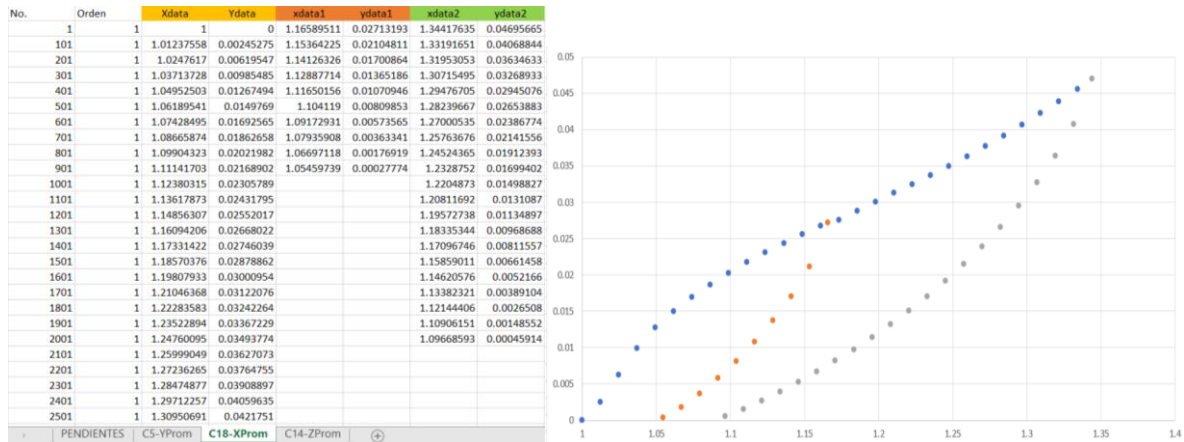


Figura 17: a) Datos promedio del eje X. b) Gráfica promedio de las probetas en el eje X.

Es con estas probetas que se realizará un estudio global para predecir el comportamiento de todas las pruebas; en Matlab, pasando todos los datos obtenidos en cada una de las probetas tanto de las generales como de las probetas promedio utilizadas para comprender el comportamiento general de las probetas en cada eje; como se muestra en la figura 18.

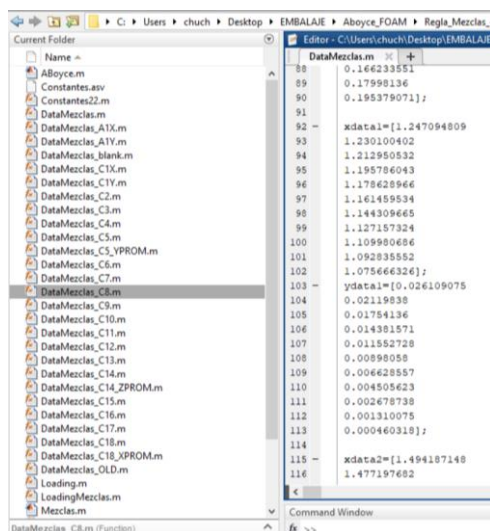


Figura 18: Recopilación de datos de cada probeta en Matlab.

Colocando los datos de las probetas promedio de cada uno de los ejes, en el software de Matlab, como se muestra en la figura 19 – a; donde se pueden ver las constantes que se calcularon para la probeta que tiene la aplicación de la carga compresiva sobre el eje Z. Las constantes y variables calculadas se nombran como: módulo de rigidez (MIU), número de celdas moleculares (N), factor de velocidad (f) y se muestran los valores de las variables para el ajuste de la curva de la gráfica. En la figura 19 – b se presenta la gráfica al esfuerzo ingenieril (MPa) contra el stretch o reblandecimiento.

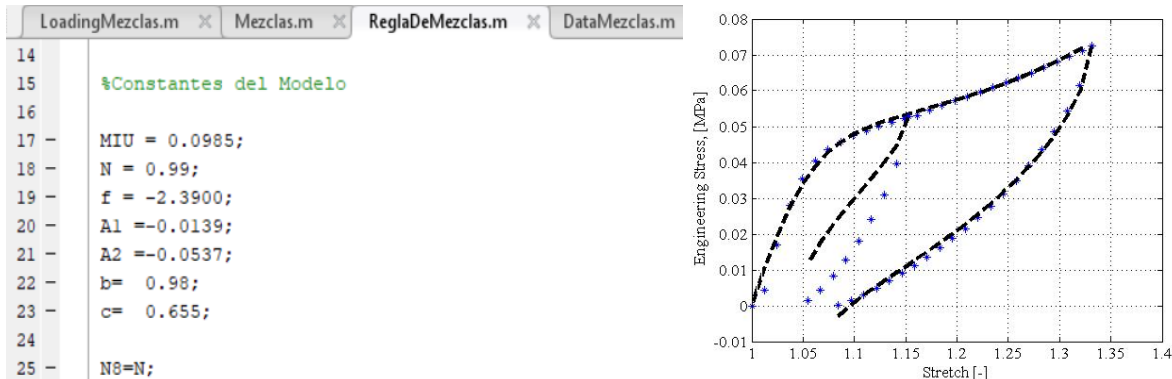


Figura 19: a) Constantes del modelo para la probeta promedio en el eje Z. b) Gráfica de resultados para la probeta del eje Z.

En la gráfica anterior (Figura 19 – b), se puede distinguir a los datos obtenidos de forma experimental con los puntos en tono azul y la línea de rayas negras señala a los datos que se obtuvieron de manera analítica utilizando el software Matlab.

Por otra parte, todas las constantes obtenidas del material que permitieron los mejores ajustes de los datos experimentales se encuentran en la Tabla 1, donde se observa a μ que representa al modelo de rigidez del material, N se usa para señalar al número de eslabones de cadena, esta variable es la que más influye en la precisión del comportamiento tanto cuantitativo como cualitativo de las predicciones teóricas realizadas.

De igual forma la variable f es el porcentaje de la contribución anisotrópica del material, el cual está sometido a una carga uniaxial, las variables A_1 y A_2 son variables que señalan los parámetros del ajuste de densidad de energía, por su parte las variables b y C ayudan a obtener un mejor ajuste de los datos experimentales.

Tabla 1: Constantes usadas en el material para el ajuste de los datos experimentales.

	Eje X	Eje Y	Eje Z
μ (kPa)	42.59	11.02	98.58
N	0.99	5	0.99
f (%)	-1.03	6.09	-2.39
A_1 (kPa)	-49.7	20.8	-13.9
A_2 (kPa)	-75.5	21.5	-53.7
b	0.8	0.4	0.98
C (kPa)	700	450	655

2.2.3 Wolfram Mathematica

Wolfram Mathematica es un software ingenieril altamente utilizado, el cual es generalmente considerado como un programa de álgebra computacional, este programa contiene bibliotecas con funciones matemáticas que permiten leer y resolver matrices, números complejos, datos en 2D y 3D, además de solucionar ecuaciones diferenciales ordinarias, parciales, diferenciales algebraicas, relaciones de recurrencia, cálculos de variables continuas o discretas, análisis de elemento finito tanto en 2D como en 3D y permite realizar cálculos geométricos.

Este programa es capaz de comunicarse con sistemas basados en lenguajes de programación como DLL, SQL, Java, .NET, C++, y Fortran. El software funciona dividido en 2 partes, el núcleo es la parte que desempeña los cálculos y la interfaz es la parte que despliega los resultados y permite al usuario interactuar con el núcleo como si fuera un documento.

Utilizando Wolfram Mathematica se creó un archivo con una serie de ecuaciones las cuales permitieron obtener los parámetros de valores necesarios para encontrar el rango de valores de la curva que permitan realizar pruebas experimentales de forma satisfactoria.

Dentro de las constantes que utilizadas se encuentra la letra “m” que indica la masa, “h” indica la altura de aplicación de la masa sobre la probeta, “g” es el valor de la

aceleración de la gravedad y “tend” el cual indica el rango de tiempo en que ocurre el fenómeno.

Es importante tener en cuenta que los datos de “m, h, y tend” fueron variándose cada vez que se corría el programa. Mientras que la letra “s” representa el ajuste del arreglo de la curva obtenida de los datos experimentales; todos estos valores y ajustes son visibles en la figura 20.

```

Aceleración_Desplazamiento.nb - Wolfram Mathematica 11.3
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

In[ ]:=
m = 8; h = 1; g = 9.81; v0 = Sqrt[2 g h]; tend = 0.05;
s = NDSolve[{m x''[t] + 15 362.9423 x[t] + 903 904.05 x[t]^3 + 653 725 714 x[t]^5 + 1 x[t]^7 == 0, x[0] == 0, x'[0] == v0}, x, {t, 0, tend}];
Plot[Evaluate[-x''[t] /. s], {t, 0, tend}, PlotRange -> All, PlotStyle -> {Blue}, AxesLabel -> {"Time (t)", "Acceleration (m/s^2)"}, LabelStyle -> Directive[Black]]
Plot[Evaluate[x[t] /. s], {t, 0, tend}, PlotRange -> All, PlotStyle -> {Blue}, AxesLabel -> {"Time (t)", "Displacement (m)"}, LabelStyle -> Directive[Black]]
mm = Max[Table[{t, Evaluate[-x''[t] /. s][[1]]}, {t, 0, tend, .0001}]]
mn = Max[Table[{t, Evaluate[x[t] /. s][[1]]}, {t, 0, tend, .0001}]]
    
```

Figura 20: Serie de ecuaciones para obtener las graficas de resultados.

Una vez resuelto, este programa se puede obtener tanto la aceleración como el desplazamiento que presenta la probeta que se desea estudiar con valores precisos, y en forma de curvas, las cuales otorgan el valor máximo de la aceleración $433.055 \frac{m}{s^2}$ y el valor máximo del desplazamiento que presenta la probeta 0.0776689 m, como lo podemos ver en las figura 21 – a y la figura 21 – b .

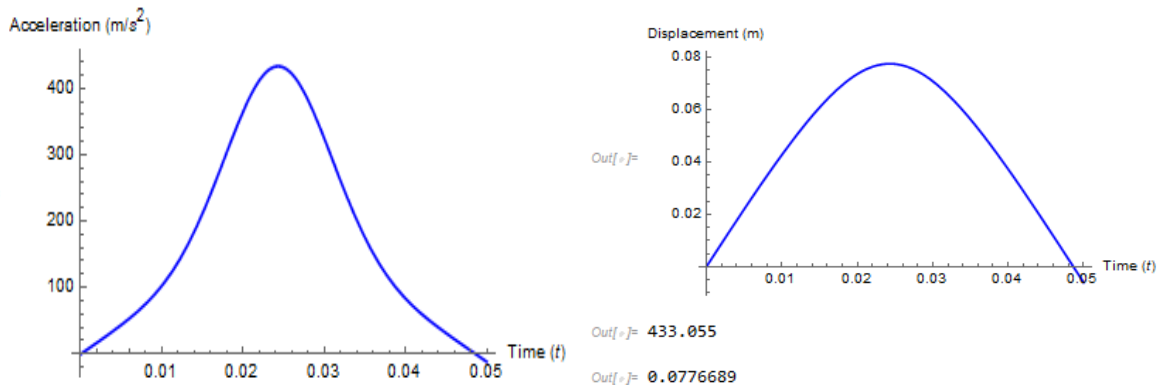


Figura 21: a) Gráfica de aceleración. b) Gráfica de desplazamiento.

2.3 Softwares de ingeniería de tipo CAM sobre manufactura aditiva

2.3.1 Cura

Se trata acerca de un software que acepta las piezas provenientes de diferentes softwares de diseño en un formato .STL, y formatos tipo .OBJ, .X3D y .3MF, este es un software de código abierto, y es uno de los más utilizados en el mundo, debido a su facilidad de uso, y compatibilidad con la gran mayoría de impresoras 3D en el mundo; este software es completamente gratuito y compatible con los sistemas operativos de Windows, Mac y Linux.

Cura permite elegir entre dos modos desde el principio; el modo recomendado y el modo personalizado. El modo recomendado es adecuado para obtener el resultado de la impresión en un mínimo de clics sin tener que hacer cambios manuales en los parámetros; de esta forma, el usuario puede definir parámetros básicos como la altura de las diferentes capas, la adhesión y las estructuras de soporte.

El modo personalizado permite al usuario elegir entre más de 400 opciones de configuración además de los parámetros básicos, como agregar estructuras de soporte o la cantidad de relleno requerida, cura ofrece una vista previa de cómo es que será impreso el modelo, y el soporte que la pieza ocupará.

Este software primeramente te permite colocar tu pieza en la zona de trabajo como se muestra en la figura 22 – a; para posteriormente rotar la pieza, escalarla al tamaño deseado y ubicarla de la mejor forma posible en la zona de impresión como se puede ver en la figura 22 – b.

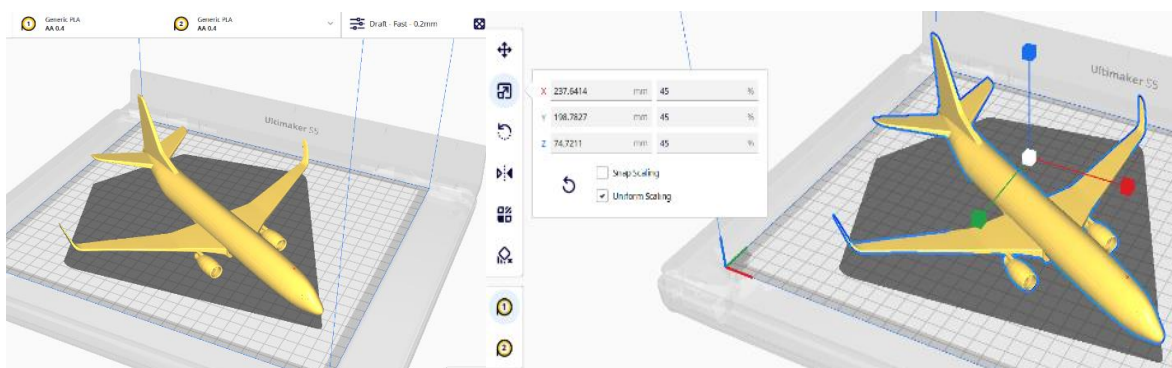


Figura 22: a) Pieza de trabajo. b) Acomodo, rotación y ubicación de la pieza en la zona de trabajo.

Al a editar los diferentes parámetros de impresión se puede escoger la calidad de la impresión, la densidad del filamento, el tipo de material a utilizar, la velocidad de la impresión y se pueden modificar los distintos soportes que lleva la pieza para que la impresión sea lo más correcta posible; este panel de edición esta visible en la figura 23.

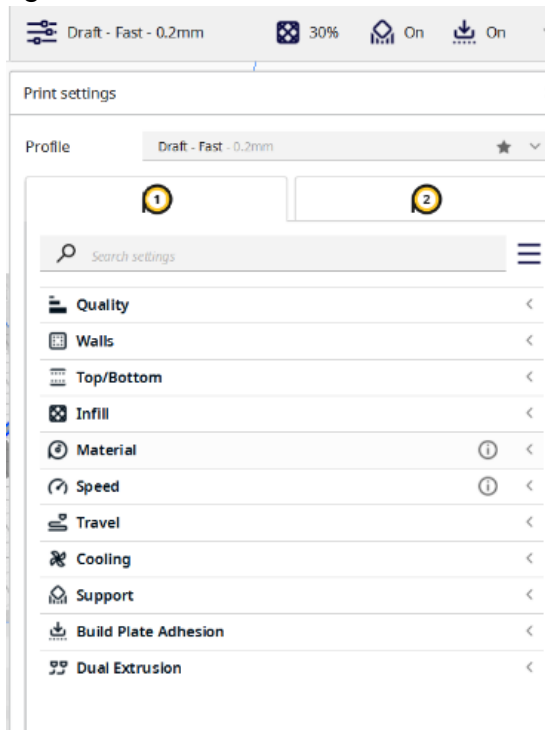


Figura 23: Panel de edición de la impresión.

Esto es observable en las vistas previas que nos otorga el programa donde se visualiza el soporte, el tiempo de impresión y la densidad del material, logrando ver de forma muy cercana la versión final de la pieza a imprimir; en la figura 24 – a, se observa la densidad de la pieza y el soporte que ocupará; en la figura 24 – b, podemos ver la versión final de la pieza junto con el tiempo que se tomará para poder ser impresa.

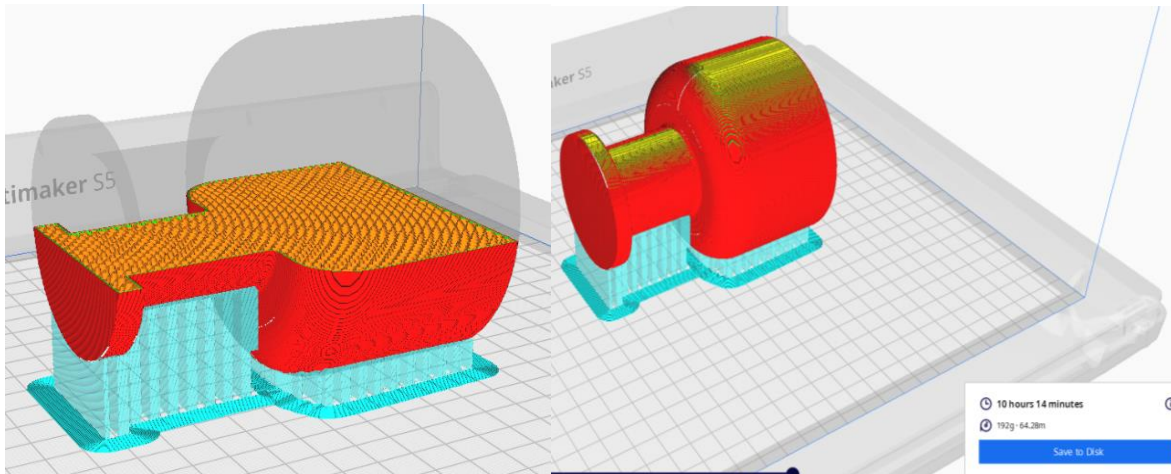


Figura 24: a) Densidad y soporte de la pieza a imprimir. b) Vista previa final de la pieza a imprimir.

De igual manera se realizó el diseño de una hélice para un avión a escala; en SolidWorks, y se pasó al software Cura (figura 25 – a), donde se visualiza como es que será impresa la pieza, y los soportes que llevará, además del inicio del proceso de impresión (figura 25 – b).

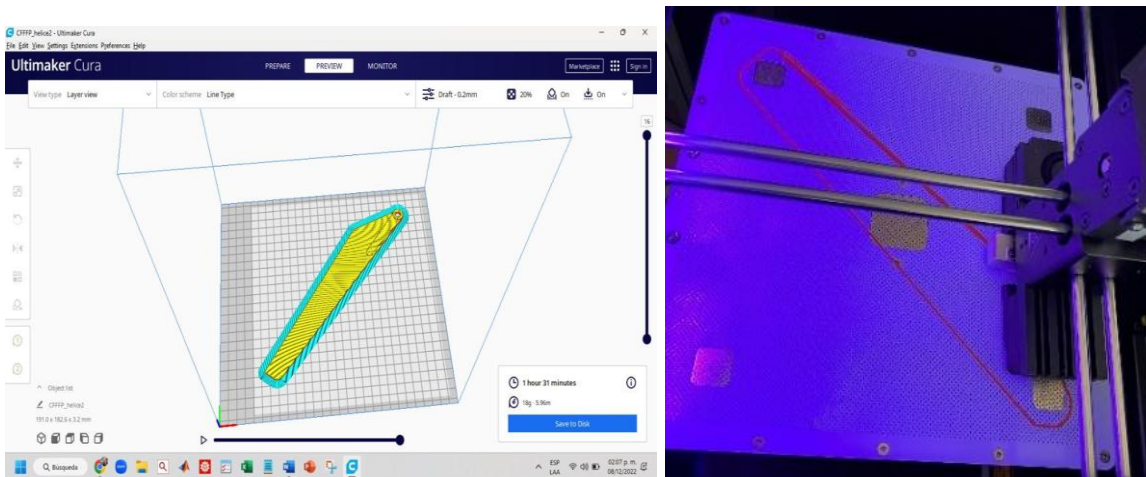


Figura 25: a) Hélice en software cura. b) Inicio del proceso de impresión 3D.

En la figura 26 – a, se puede observar el panel de trabajo de la impresora 3D, donde se observa el avance de impresión que se tiene y el tiempo necesario para realizar la pieza; y en la figura 26 – b, se puede notar a la pieza terminada aún en la zona de trabajo de la impresora.

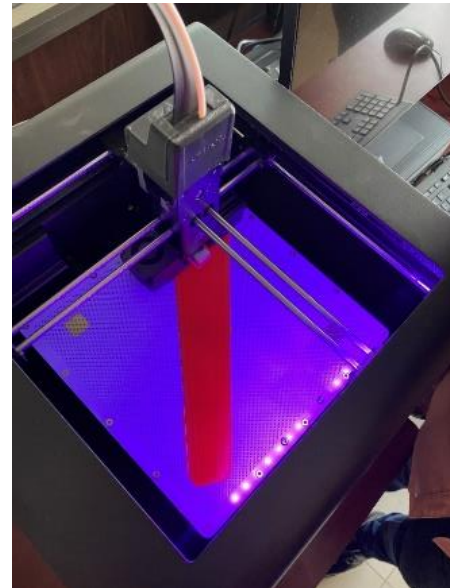


Figura 26: a) Panel de control de la impresora 3D. b) Hélice terminada aún en la zona de trabajo de la impresora 3D.

Después en la figura 27, podemos observar el resultado de este procedimiento al quitar la base y los soportes de la pieza, obteniendo una hélice funcional.



Figura 27: Hélice impresa en 3D.

2.3.2 Z – Suite

Z- Suite, es un software derivado de la compañía Zortrax con el propósito de aceptar piezas provenientes de softwares tipo CAD como SolidWorks en formato de .STL, .OBJ, .DXF, y .3MF, como la pieza a imprimir proveniente de SolidWorks en formato .STL mostrada en la figura 28 – a, para poder realizar una preparación intuitiva y directa de dicha pieza para que esta pueda ser impresa en 3D.

Algunas de las ventajas que se tienen al utilizar este software son, la reparación automática de pequeños errores que pueda tener la pieza que puedan crear imperfecciones al imprimirlas; además el programa detecta las paredes con espesor menor a 0.4 mm, donde la impresora 3D no es capaz de depositar material por lo que es recomendable saberlo con antelación.

Este software permite personalizar los diferentes soportes que requiere la pieza, estos se pueden añadir o retirar para mejorar las superficies de apoyo o bien reducir tiempos de construcción del modelo, para esto es útil conocer que se puede cambiar la forma y la densidad del soporte lo que también afecta la calidad de la pieza.

De igual forma este programa otorga la opción de rotar la posición de las piezas en la zona de trabajo, y escalar las mismas para modificar el tamaño y la posición del modelo según se requiera, incluyendo la calidad de la densidad de la pieza.

Por ello es de gran importancia el aprender a diseñar diferentes piezas desde cero y transportarlas al software para aprender a utilizarlo y sus diferentes funciones; como se nota en la figura 28 – a. Primero se realiza el diseño de la pieza en SolidWorks, y posteriormente, se coloca la pieza en el programa y este muestra como se ve la pieza en la zona de trabajo (figura 28 – b).

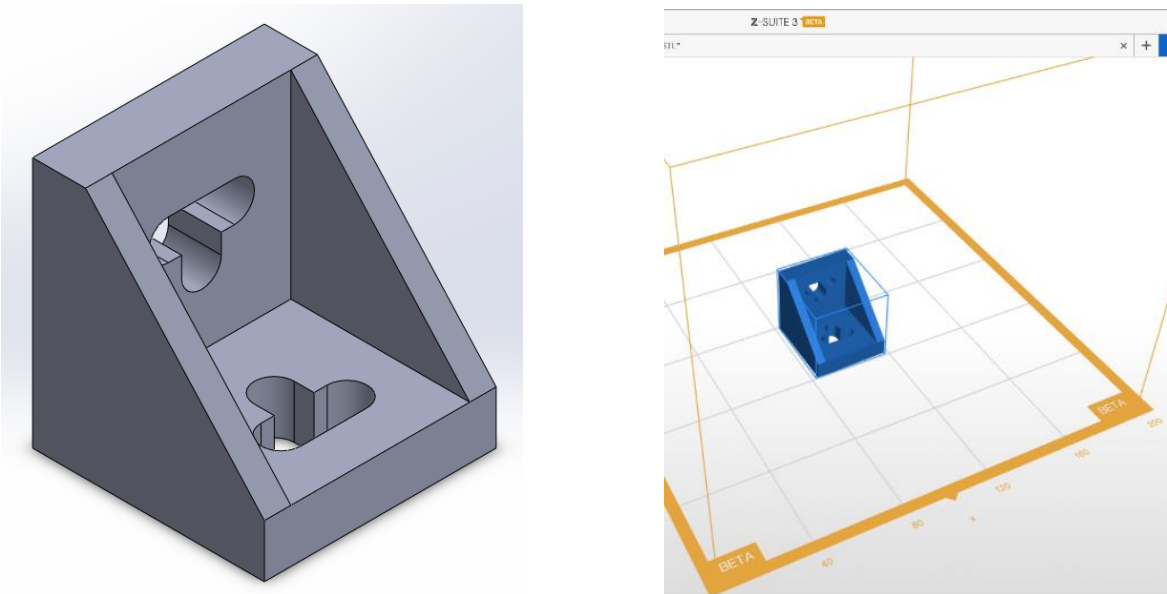


Figura 28: a) Pieza a imprimir, aún en SolidWorks. b) Pieza a imprimir en Z - Suite.

Para modificar la posición de la pieza en el programa y que esta estuviera lo mejor situada dentro de la zona de trabajo, cuya función se muestra en la figura 29 – a. Cabe destacar que Z – Suite permite escalar la pieza hasta el tamaño deseado como se muestra en la figura 29 – b.

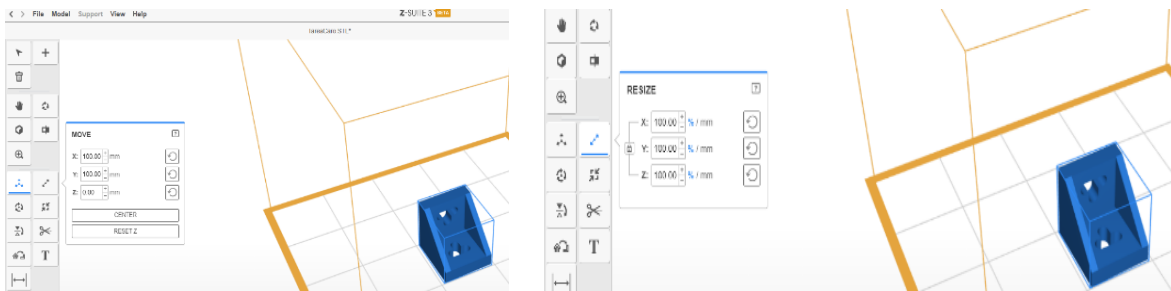


Figura 29: a) Ubicación de la pieza en la zona de trabajo. b) Se escala la pieza de trabajo.

Z – Suite permite rotar la pieza que se quiere imprimir para obtener la mejor posición dentro de la zona de trabajo, visible en la figura 30 – a y antes de la impresión el programa permite verificar algunas medidas del modelo para comprobar que la escala de la pieza realizada anteriormente esté dentro de los parámetros deseados y de esta manera obtener el mejor resultado posible, como se observa en la figura 30 – b.

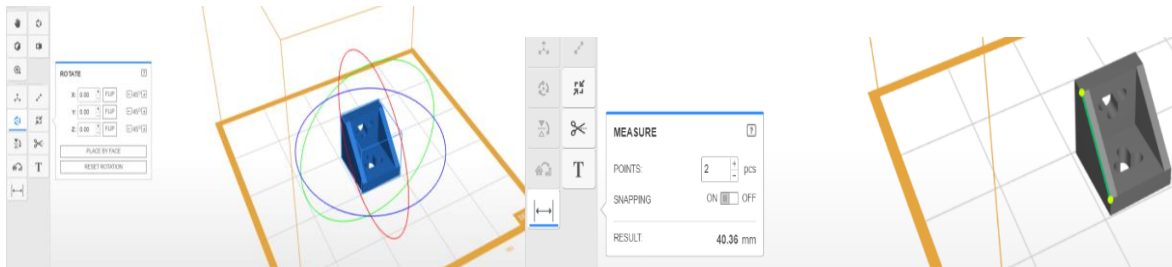


Figura 30: a) Forma de rotar la pieza de trabajo dentro del programa. b) Verificación de medidas, utilizando Z - Suite.

Al momento de realizar la impresión el programa permite configurar al tipo de material que vamos a utilizar, si queremos un soporte automático o nosotros mismos editamos el tipo de soporte que queremos y el lugar donde lo queremos ubicar, además se puede elegir la calidad de impresión que necesitamos, el patrón de impresión y la densidad del material deseada, dependiendo del esfuerzo al que será sometida dicha pieza; estos parámetros son editables en el panel mostrado en la figura 31.

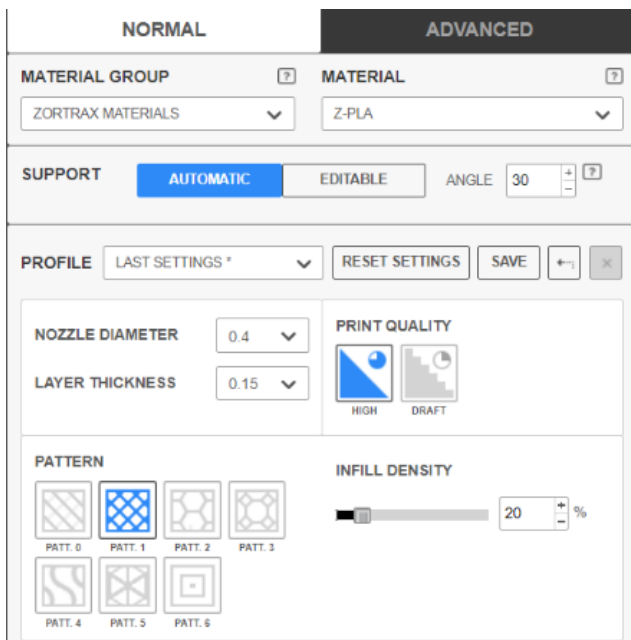


Figura 31: Panel de edición de los parámetros de impresión.

En la figura 32 – a, Z - Suite entrega una vista previa de la pieza impresa donde se visualiza la base de impresión, la pieza como tal impresa, los soportes que ayudan a la realización de la misma, el tiempo de impresión y la configuración con la cual se ha de imprimir la pieza. De igual manera el resultado de dicho proceso es visible

en la figura 32 – b, donde se nota la pieza impresa en 3D, ya sin los soportes y las bases.

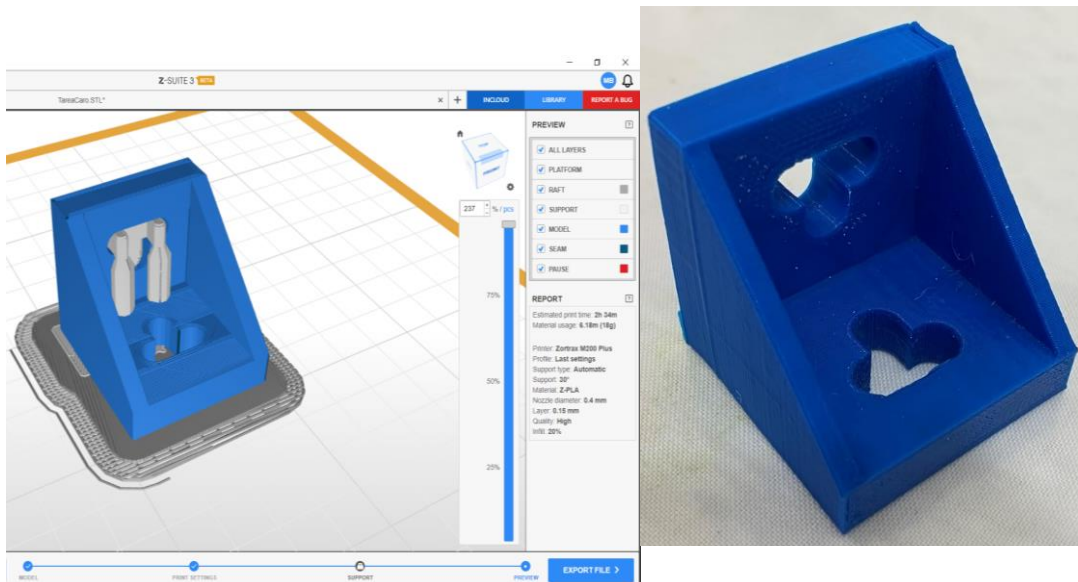


Figura 32: a) Vista previa final de la pieza a imprimir en Z – Suite. b) Pieza impresa en 3D.

2.4 Software de análisis de video

2.4.1 GOM Correlate

Sobre la capacitación referente a softwares de análisis de video se aprendió a utilizar el software GOM Correlate, este se encarga de correlacionar imágenes, analizar el desplazamiento 3D en materiales y determinar las propiedades del material tanto para la validación como para la optimización de simulaciones numéricas.

Este software puede importar datos independientes del sistema como imágenes 2D y 3D, además de usar el principio de medición DIC, el cual realiza mediciones basadas en puntos y de campo completo, GOM Correlate nos sirve para análisis de deformación de algún material, analizar sus desplazamientos o deformaciones 2D y 3D, así como la velocidad y la aceleración, es importante resaltar que los videos

que se analizan en este programa deben estar en un formato de .MP4, para que se puedan utilizar.

Una vez iniciado el software de GOM Correlate, aparece una pantalla de inicio con diferentes opciones (figura 33 – a), mediante la cual se pueden crear nuevos proyectos o abrir algunos ya existentes. Durante la capacitación se muestra el proceso para crear nuevos archivos de trabajo, iniciando con la selección del video que queremos analizar y arrastrándolo hacia la parte de nuevo proyecto en la página principal (figura 33 – b).

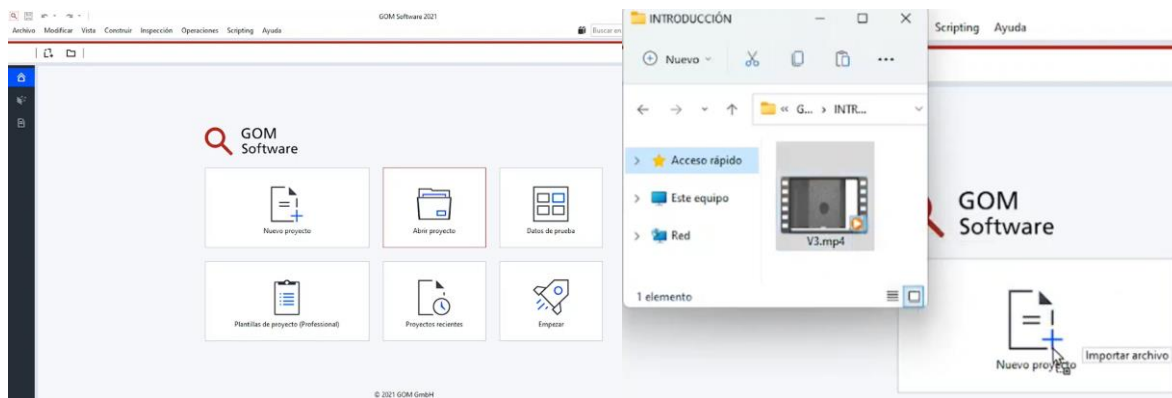


Figura 33: a) Pantalla de inicio del software GOM Correlate. b) Proceso para iniciar un nuevo proyecto en GOM Correlate.

Una vez cargado el archivo de video, este se divide en fotogramas para su análisis donde se ve el progreso del video detenidamente (figura 34 – a), posterior a ello se define manualmente la escala con la cual se va a trabajar mediante 2 puntos y designado la distancia existente entre ellos como se muestra en la figura 34 – b.

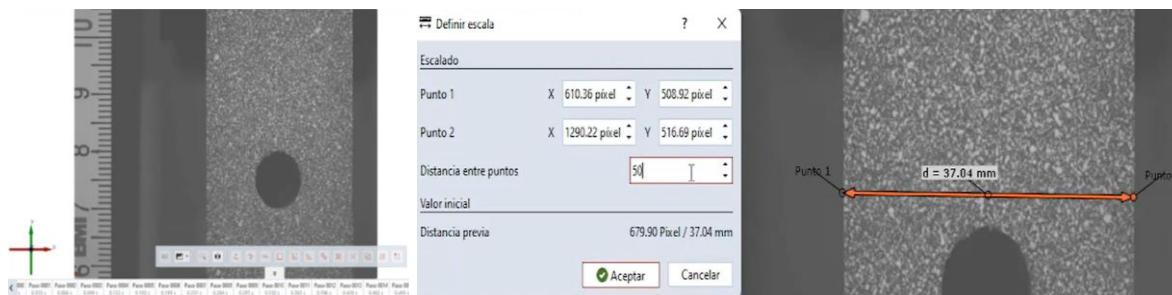


Figura 34: a) División del video en fotogramas. b) Definición de escala por puntos.

Una vez definida la escala se escoge la opción de crear componente de superficie para seleccionar el área que se quiere analizar (figura 35 – a), posterior a ello, se quita de la superficie de análisis al círculo medio, seleccionando su área y eligiendo

la opción de quitar área (figura 35 – b). Cabe destacar que los cuadros verdes en el interior del área de selección sirven para conocer el tamaño de la faceta y la distancia entre puntos; donde lo más recomendable es tener alrededor de 3 puntos en cada cuadro para un análisis lo más eficiente posible.

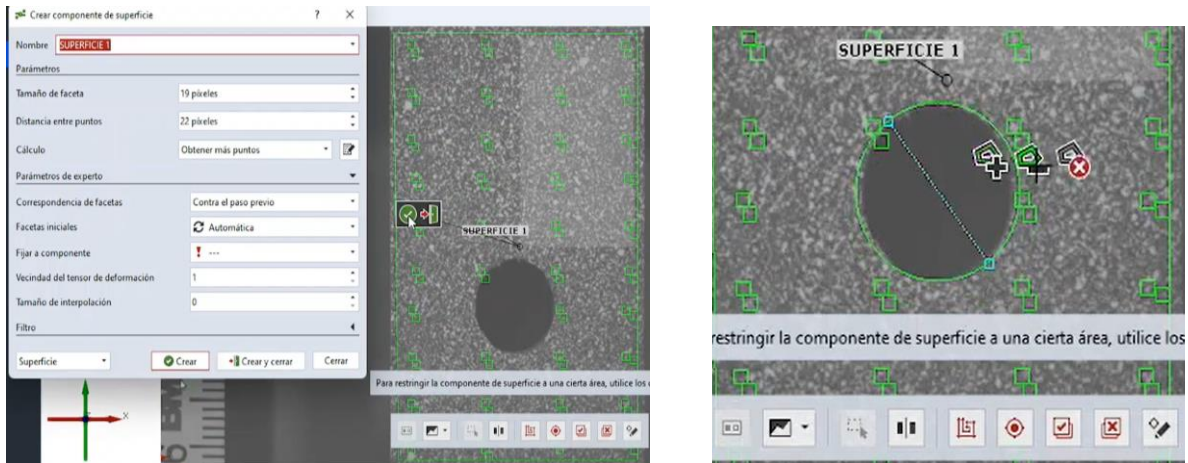


Figura 35: a) Selección del área de análisis. b) Proceso para eliminar cierta área de la zona de análisis.

Una vez creado el componente de superficie, se aplica el área de análisis determinada a cada uno de los fotogramas que compone el video, dicha área se puede visualizar utilizando la opción de vista de medición 3D (figura 36 – a); una vez seleccionada dicha opción se presenta el área de análisis sombreada en un plano blanco cuadrículado como se observa en la figura 36 – b.

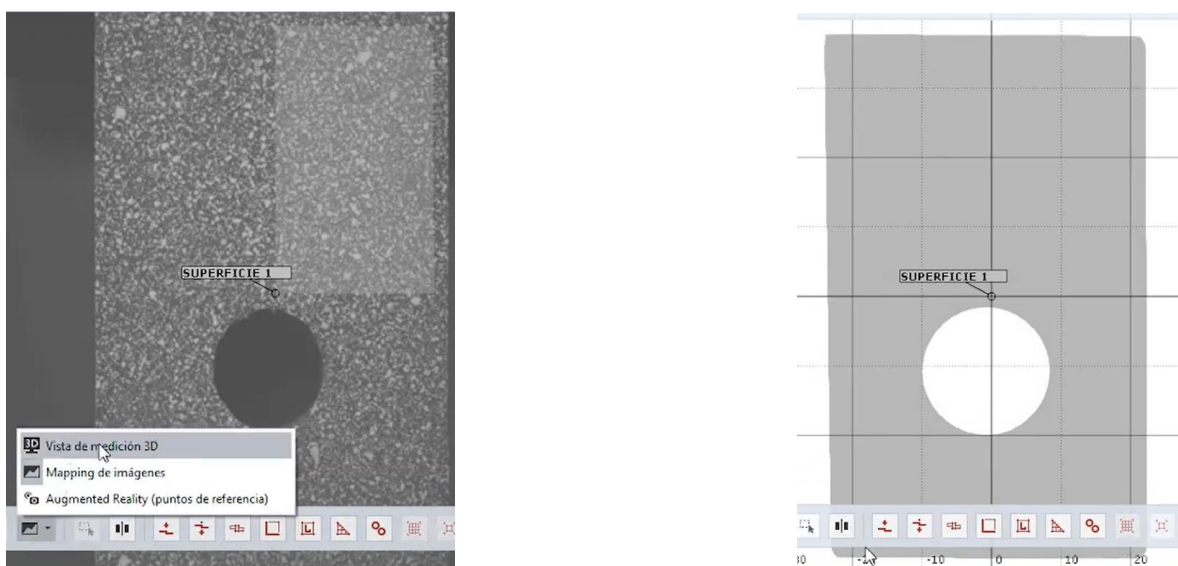


Figura 36: a) Vista de medición 3D. b) Área de análisis para cada fotograma.

Con el área de análisis definida, se determina el Épsilon en Y, (figura 37 – a), debido a que su variación es noble en cada fotograma, se puede seleccionar a todo el rango de valores del porcentaje como visible (figura 37 – b).

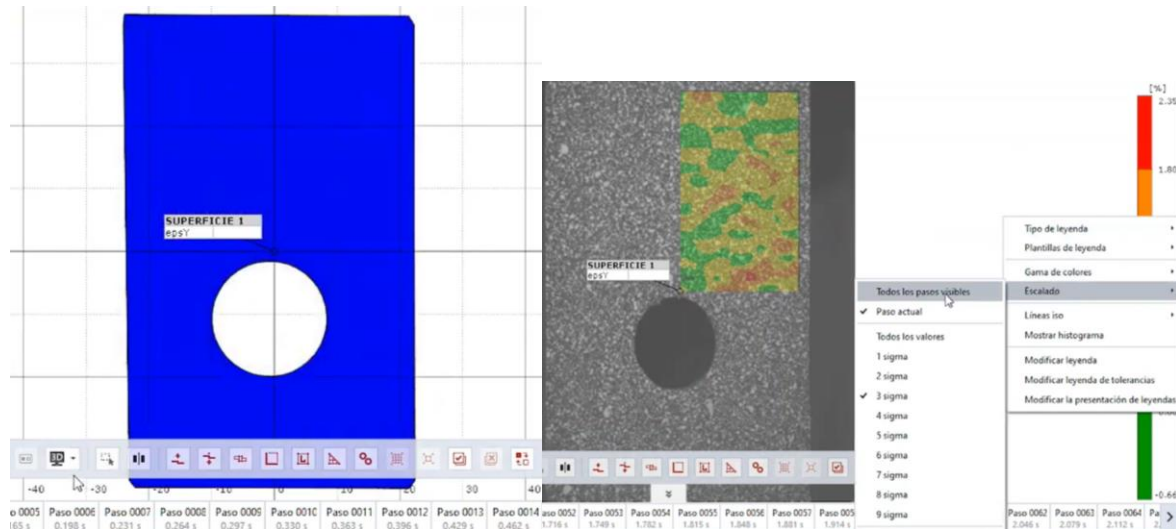


Figura 37: a) Área de análisis definida. b) Visibilidad del rango de valores del porcentaje de Épsilon en Y.

Para distinguir mejor las zonas donde el valor de Épsilon es mayor se selecciona un rango de 8 colores para la barra del porcentaje (figura 38 – a), estos colores son visibles en la figura 38 – b, lo cual facilita visualizar el valor de Épsilon en las diferentes zonas del material en un determinado momento del video.

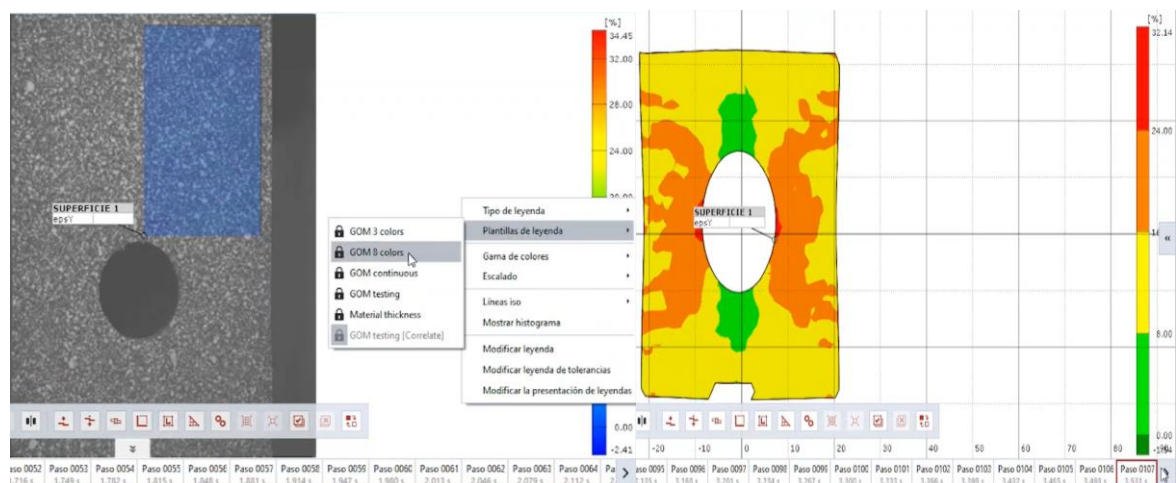


Figura 38: a) Selección del rango de colores. b) Zonas con diferente valor de Épsilon.

Con el propósito de obtener un diagrama que proporcionará la variación de Épsilon en zonas específicas, se selecciona la opción de realizar una inspección por puntos (figura 39 – a), y colocarlos en distintas zonas del área que será analizada, indicándoles que analizarán Épsilon en Y, como se muestra en la figura 39 – b.

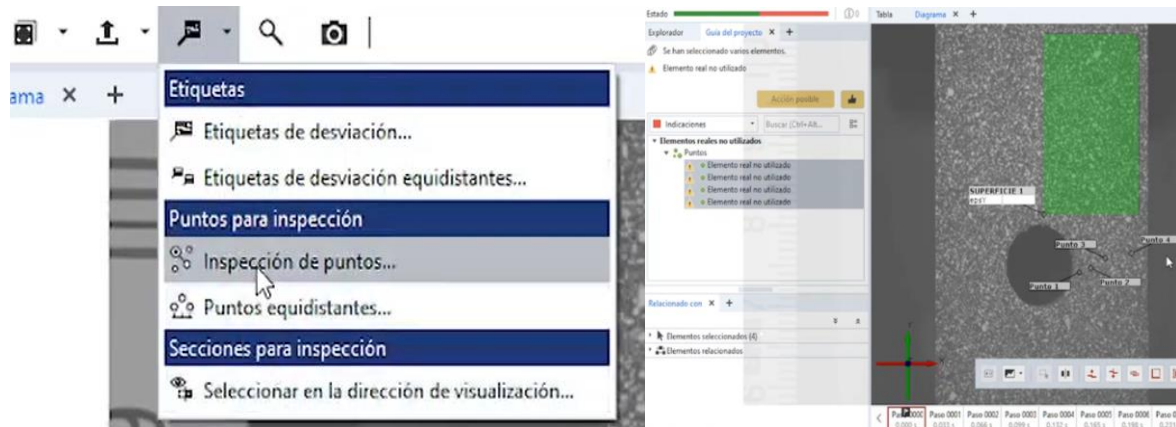


Figura 39: a) Selección de inspección por puntos. b) Colocación de los puntos en el área de análisis.

Al haber colocado los puntos en las zonas determinadas, estos empiezan a otorgar diferentes valores (figura 40 – a), los cuales a medida que avanzan los fotogramas generan un diagrama que indica el comportamiento del material y el valor de Épsilon en dichos puntos, como se visualiza en la figura 40 – b.

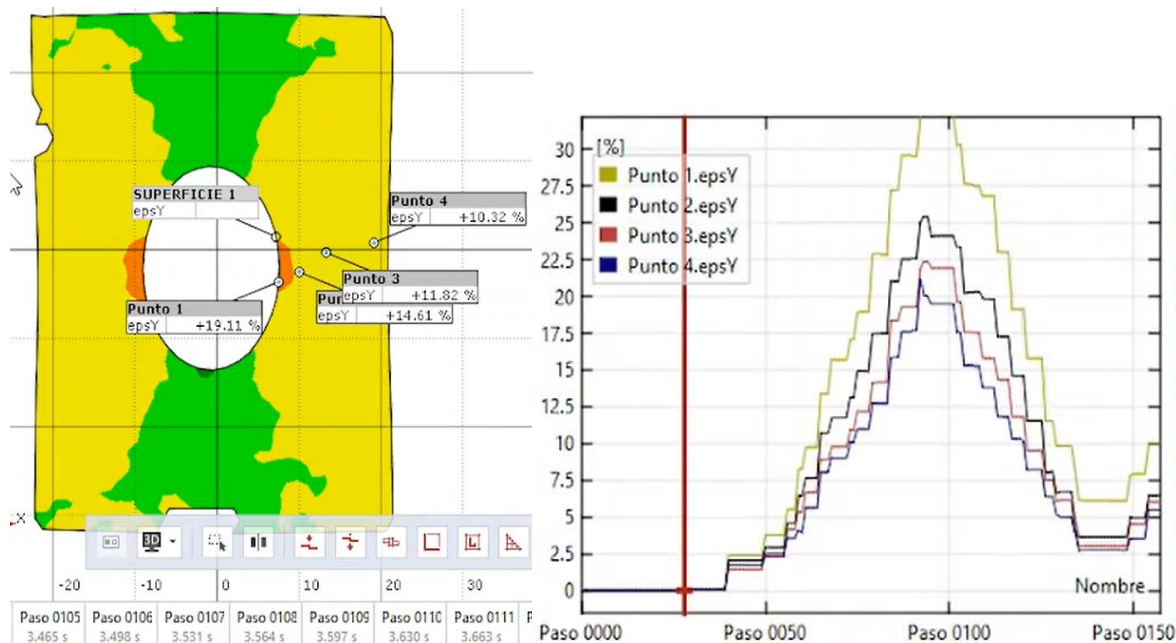


Figura 40: a) Valores de Épsilon en cada punto. b) Diagrama de resultados.

CAPÍTULO 3 FINALIZACIÓN DEL DISPOSITIVO PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES EN CARGAS DE IMPACTO

En el presente capítulo se describirán los distintos pasos realizados para lograr terminar la construcción del banco de pruebas el cual nos permitirá realizar las pruebas experimentales necesarias para la caracterización de la respuesta de los materiales poliméricos a las cargas de impacto; se muestra desde el proceso que se siguió para construir la cabina que resguardaría al polipasto, su respectivo montaje, la preparación que recibió el percutor para ser montado y el proceso para ensamblar el acrílico de protección para hacer al banco de pruebas más seguro.

El banco de pruebas esta hecho principalmente de perfil Bosch de 50 mm x 50 mm, tiene algunos cartabones cuya principal función es unir las diferentes secciones del perfil entre sí, darles seguridad y estabilidad, incluye 1 percutor con un peso de 28 kg, y 1 polipasto que se en cargará de subir y soltar al percutor, por lo cual en la figura 41 se puede observar al banco, donde se realizarían las pruebas experimentales, en su etapa inicial.

Para continuar la construcción del banco de pruebas era necesario realizar una estructura en la parte superior del banco, con el fin de soportar un polipasto eléctrico, el cual cumpliría con la función de retraer y soltar la carga a una altura determinada, para impactar a componentes mecánicos como probetas de polimeros y aluminio; por lo tanto, como se observa en la figura 42, se cortaron 4 secciones de perfil Bosch de 500 mm (color azul) como base y 4 secciones de perfil de 150 mm (color morado) en forma vertical y 4 secciones de 200 mm (color naranja) como unión.



Figura 41: Etapa inicial del banco de pruebas experimentales.

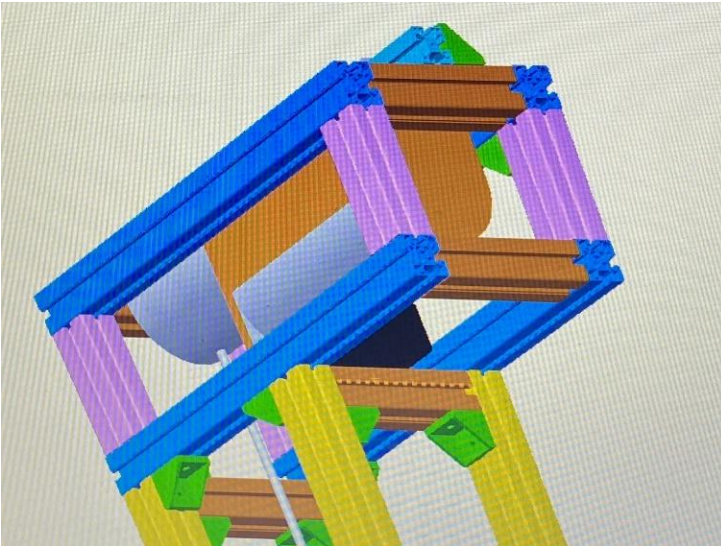


Figura 42: Cabina superior del banco de pruebas.

Para realizar el corte de los perfiles Bosch se ació al laboratorio de manufactura en el Instituto Tecnológico de Pachuca, donde se utilizó una segueta de banco para cortar los diferentes tamaños de perfil necesitados; esto se puede ver en la figura 43 – a y figura 43 – b.

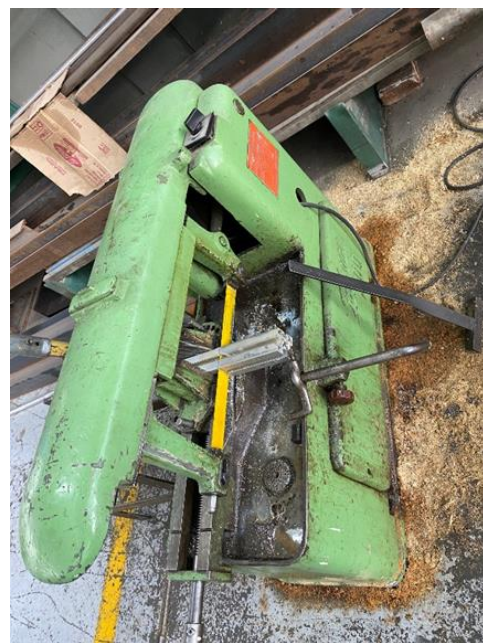


Figura 43: a) Corte de uno de los perfiles de 500 mm. b) Corte de uno de los perfiles de 200 mm.

Una vez que se tuvieron cortadas las secciones de perfil Bosch para crear la cabina que resguardaría al polipasto, se limaron sus bordes para eliminar el filo en estos perfiles y así evitar algún accidente; este proceso se muestra en las figuras 44 – a y en la figura 44 – b.



Figura 44: a) Proceso de limado del borde del perfil. b) Desbaste del filo del perfil de aluminio.

Ya con las diferentes secciones de perfil Bosch recortadas y limadas, se siguió con el armado de la cabina que resguardará al polipasto en la parte superior del banco de pruebas, como se muestra en las figuras 45 – a y en la figura 45 – b.

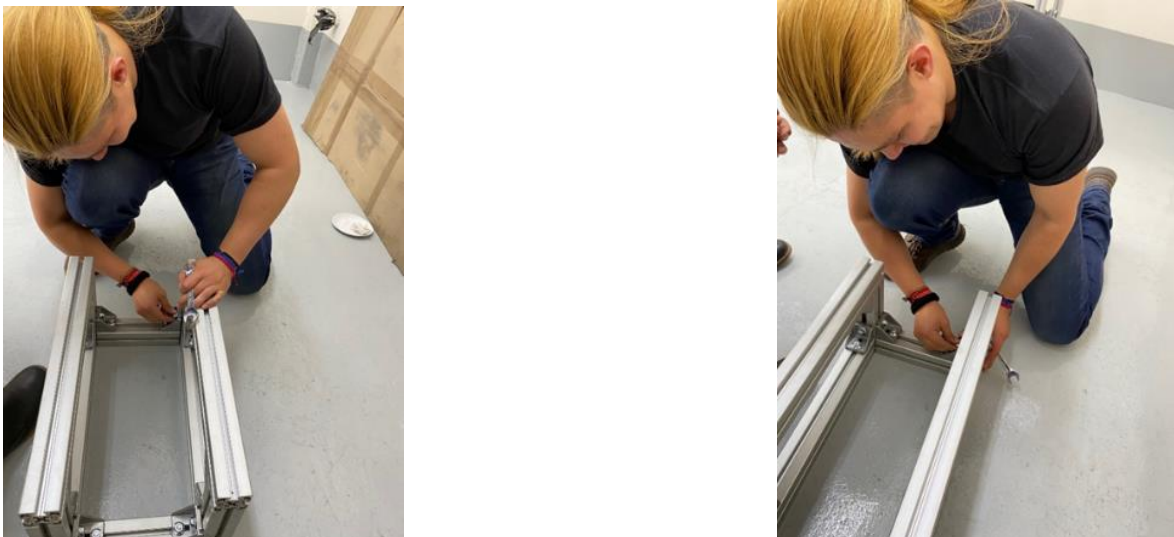


Figura 45: a) Proceso de armado de cabina. b) Armado de cabina del banco de pruebas.

Una vez armada la cabina, se preparó y reforzó la base donde esta sería colocada, como se ve en las figuras 46 – a y la figura 46 – b; teniendo en cuenta que dentro de esta cabina aún se tendría que colocar el polipasto.



Figura 46: a) Preparación de la superficie donde sería montada la cabina. b) Reforzamiento de las uniones en la parte superior del banco de pruebas.

Una vez preparada la base y la cabina del polipasto hecha, se montó la cabina que resguarda al polipasto en la parte superior del banco de pruebas como lo podemos ver en la figura 47 – a y en la figura 47 – b.

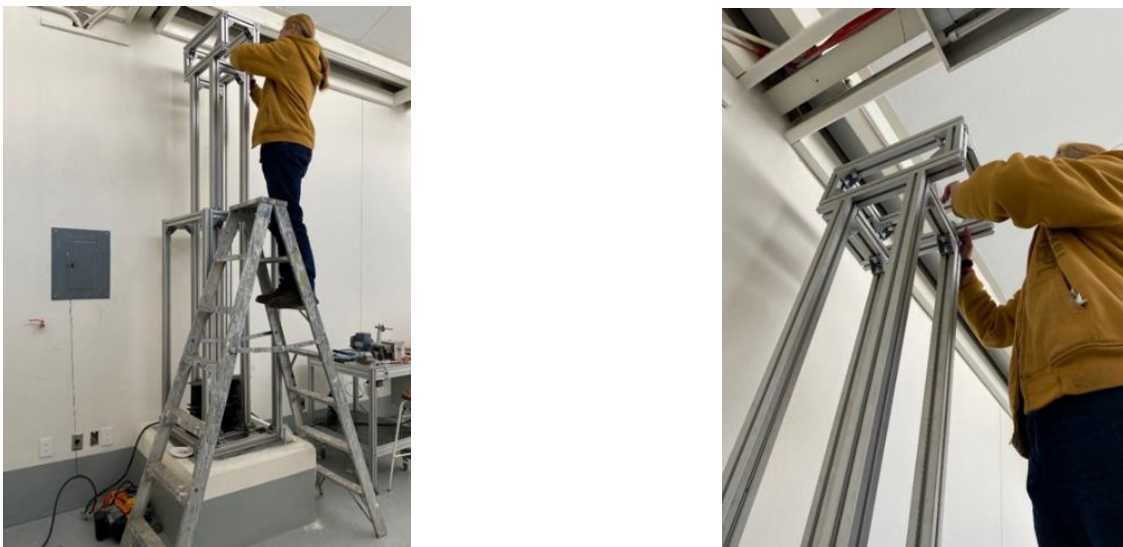


Figura 47: a) Colocación de la cabina del polipasto en el banco de pruebas. b) Proceso de montaje de la cabina.

La cabina ya colocada sobre el banco de pruebas se visualiza en la figura 48, que muestra la posición final de dicha cabina.



Figura 48: Cabina del polipasto sobre el banco de pruebas.

Una vez montada la cabina sobre el banco de pruebas, se procedió a colocar el polipasto, como se puede ver en la figura 49 – a y la figura 49 – b.

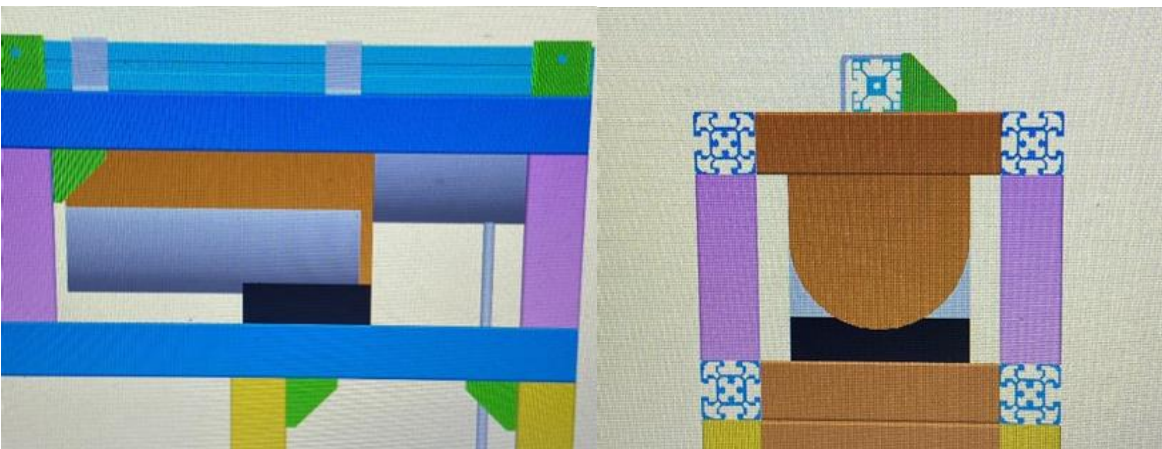


Figura 49: a) Vista lateral de la cabina del polipasto. b) Vista frontal de la cabina.

Se cortó un trozo de perfil Bosch de aluminio de 500 mm (figura 50 – a), encargado de sostener el polipasto, dicho perfil Bosch fue fijado a la cabina (figura 50 – b), para que las vibraciones provocadas por el percutor al impactar con las probetas no provocaran que el polipasto se moviera de su posición original.



Figura 50: a) Corte de perfil de aluminio de 500 mm. b) Montaje del polipasto en la cabina.

Una vez que se ajustó correctamente el polipasto dentro de la cabina, con el perfil Bosch superior que sostiene al polipasto se observa tanto en la figuras 51 – a, y en la Figura 51 – b, como se ve tanto el banco de pruebas como la cabina con el polipasto ya montado.



Figura 51: a) Banco de pruebas con el polipasto montado b) Cabina con el polipasto.

Al intentar realizar las primeras pruebas experimentales se nota que el área de las probetas sobre las cuales serán realizadas las pruebas es mayor a la superficie de contacto del percutor (figura 52 – a); por lo cual, para que la prueba sea realizada de manera correcta se debe aumentar la superficie de contacto del percutor, por lo que se decidió desmontarlo (figura 52 – b), para añadirle una placa de acero que cubra la superficie total de las probetas.



Figura 52: a) Área de la probeta es mayor a la del percutor. b) Proceso para desmontar el percutor.

Una vez que se desmontó el percutor, se utilizó la parte superior del mismo, y fue colocada en el taladro de banco (figura 53 – a), para barrenar los orificios donde iría un anillo que permitiría unir al polipasto con el percutor como se observa en la figura 53 – b.



Figura 53: a) Colocación parte superior del percutor en el taladro de banco. b) Barrenado del percutor.

Ya que se tuvo correctamente barrenada la parte superior del percutor, se procedió a colocar un anillo de unión como se muestra en la figuras 54 – a y la figura 54 – b, el cual serviría para poder conectar al percutor con el polipasto y que este pudiera subir o bajar el percutor.



Figura 54: a) Colocación del anillo de unión en el percutor. b) Fijación del anillo con el percutor.

Para la parte inferior del percutor se barrenaron 4 orificios, que servirían para unir al percutor con una placa de acero, con la cual se abarcaría la superficie de contacto necesaria para cubrir las probetas donde se realizarían las pruebas de impacto; dicho proceso de barrenado es visible en las figuras 55 – a y 55 – b.



Figura 55: a) Colocación de la parte inferior del percutor en el taladro de banco. b) Barrenado de la parte inferior del percutor.

Para cubrir la totalidad del área de las probetas donde se realizarían las pruebas, es necesario unir una placa de acero al percutor; por lo cual primero se marcaron los puntos donde se realizarían los orificios de unión entre la placa de acero y el percutor (figura 56 – a), además de la ubicación de la misma en el taladro de banco (figura 56 – b).



Figura 56: a) Marcaje de los puntos a barrenar en la placa de acero. b) Proceso de barrenado de la placa de acero.

Una vez ubicados los puntos que se tendrían que barrenar en la placa de acero, se inició con el proceso de barrenado de cada orificio de unión, como se muestra en la figura 57 – a; y en la figura 57 – b, se puede ver el proceso de lubricación para cada uno de los orificios hechos, con el fin de facilitar el proceso de barrenado y de cuidar el material con el que se estaba trabajando, para prevenir una posible fractura, de las brocas utilizadas o una posible deformación de las mismas.



Figura 57: a) Barrenado de la placa de acero. b) Proceso de lubricación.

Ya con los 4 orificios hechos que unirían a la parte inferior del percutor con la placa de acero, también se ubicaron y barrenaron otros 4 orificios, lo cual se puede ver en las figuras 58 – a y 58 – b.



*Figura 58: a) Colocación del taladro para realizar los orificios de 3/8 de pulgadas.
b) Segundo proceso de barrenado.*

Cuando se terminó el proceso de maquinado, en la figura 59 – a; se muestran los orificios realizados a la parte inferior del percutor, y en la figura 59 – b; se logra observar el trabajo realizado en la placa de acero.



Figura 59: a) Maquinado de la parte inferior del percutor. b) Maquinado de la placa de acero.

Una vez que se maquinaron tanto la parte inferior del percutor como la placa de acero, se unió y esmeriló la pieza para quitar los bordes filosos y las rebabas que quedaban como se muestra en la figura 60 – a; para dejar la pieza bien preparada para ser montada en el banco de pruebas, figura 60 – b.



Figura 60: a) Proceso de esmerilado de la pieza. b) Parte inferior del percutor lista para ser montada.

Ya con ambas partes del percutor preparadas, primero se montó en el banco de pruebas la parte inferior del percutor, junto con la placa, los deslizadores que permiten el movimiento vertical del percutor a través del banco, y la unión de estos mediante tornillos y 4 secciones de perfil Bosch, observable en la figura 61 – a y en la figura 61 – b.



Figura 61: a) Colocación de la parte inferior del percutor en el banco de pruebas. b) Ajuste del percutor con los deslizadores.

El paso siguiente fue colocar la parte superior del percutor junto con sus respectivos deslizadores en el banco de pruebas, como se visualiza en la figura 62 – a, después se utilizaron 4 tornillos para unir al percutor con sus deslizadores y permitir el juego vertical del mismo, además se atornillaron la parte superior del percutor, junto con la parte inferior para mover la masa total al mismo tiempo, lo cual se presenta en la figura 62 – b.



Figura 62: a) Montaje de la parte superior del percutor en el banco de pruebas. b) Unión de ambas partes del percutor.

Cuando ambas partes se unieron y formaron un solo percutor, se hicieron pruebas en el banco para ver que el movimiento vertical del percutor fuera correcto; además de verificar que el polipasto soportara de forma adecuada el peso y que el percutor luciera totalmente horizontal desde una vista frontal como se ve en la figura 63 – a, por lo cual en la figura 63 – b, se puede ver al banco de pruebas funcional y ya con el percutor montado.



Figura 63: a) Vista frontal del percutor. b) Vista del banco de pruebas funcional y con el percutor montado.

Aunque el banco ya es funcional, por temas de seguridad antes de usarlo se colocó acrílico alrededor de la mitad inferior del banco, el cual cubriera los 3 lados principales donde se corre riesgo de sufrir un accidente, por lo cual primero se tomaron medidas (figura 64 – a) y cortaron (figura 64 – b), 6 placas de acrílico que servirían para armar 3 puertas de seguridad alrededor del banco.



Figura 64: a) Se toman las dimensiones de las placas de acrílico. b) Proceso de corte de las placas.

Para armar las puertas corredizas de seguridad se diseñaron en SolidWorks unos deslizadores que permitieran el movimiento vertical de la puerta y se imprimieron 12 de ellos, como se ve en la figura 65 – a, además de comprar 3 manijas para cada una de las puertas (figura 65 – b).



Figura 65: a) Deslizadores. b) Manijas.

Primero se montaron las 6 placas, 2 en cada lado del banco, una placa a la mitad del perfil que unida a los deslizadores permite un movimiento vertical y otra en la

parte superior, unida a la cara exterior del perfil de cada lado del banco, estas placas no se mueven y será a partir de ellas que se sujete la placa móvil para una mayor facilidad de trabajo como se muestra en las figuras 66 – a y 66 – b.

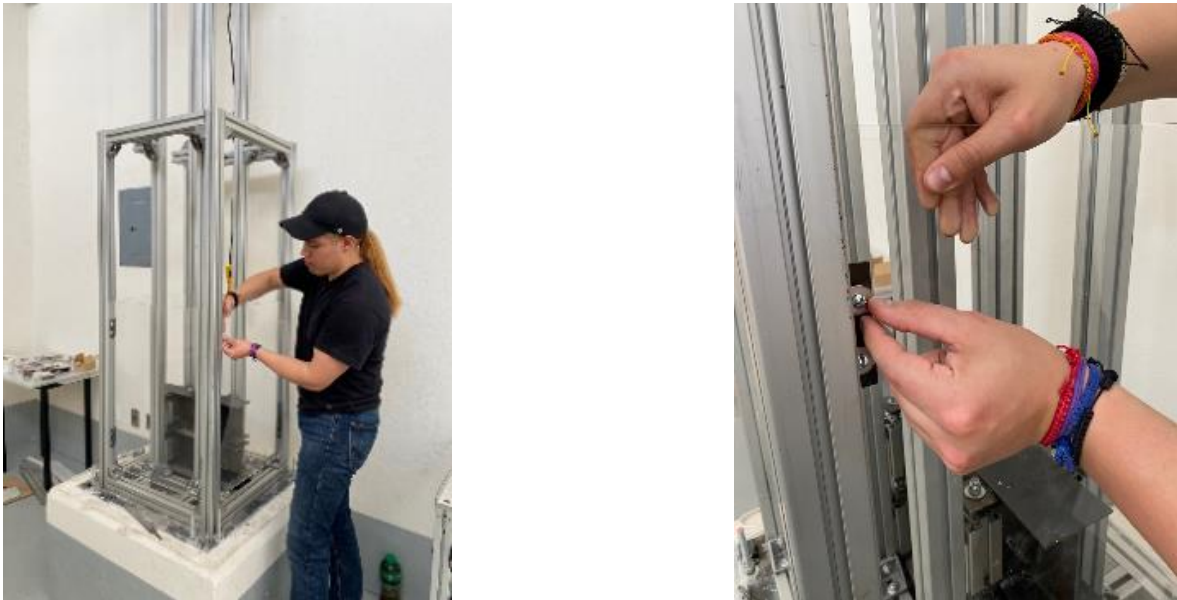


Figura 66: a) Colocación de las placas alrededor del banco. b) Ajuste de los deslizadores.

Cuando se tuvieron completamente montadas y fijadas ambas placas como se muestra en la figura 67 – a, se instalaron las manijas de las puertas corredizas como lo vemos en la figura 67 – b.



Figura 67: a) Placas de acrílico montadas en el banco de pruebas. b) Instalación de manijas.

Es de igual manera que para mantener a las puertas corredizas en una posición elevada se adquirieron 3 sujetadores de pasador que sostendrán a las puertas corredizas para que estas no se caigan mientras se maniobra, como se muestra en las figuras 68 – a y 68 – b.



Figura 68: a) Sujetadores de pasador. b) Montaje de los sujetadores en las puertas de acrílico.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE MULLINS EN POLÍMERO DE POLIETILENO DE CELDA CERRADA.

La información que se presenta en este capítulo está basada en el artículo “Caracterización del efecto de Mullins en polímero de polietileno de celda cerrada”, el cual será presentado en el congreso de SOMIM del año en curso y cuyos autores son Mariela Carolina Bravo Sánchez, Luis Manuel Palacios Pineda, Alex Elías Zúñiga y Jesús Mauricio Briseño Rodríguez.

En este capítulo se mostrará la caracterización del material polimérico de polietileno con celda cerrada el cual ha sido sometido a cargas compresivas cíclicas, tomando en cuenta el uso de la Norma ASTM D1621-00 [6], la cual se encarga de establecer algunos de los requerimientos para poder realizar de forma correcta las pruebas compresivas en los materiales poliméricos. Utilizando la regla de mezclas equivalente se determinó el modelo del efecto de Mullins, que considera la anisotropía del material y así mismo permite generar un ajuste mucho más preciso de las curvas analíticas, las cuales describen la densidad de deformación de

energía. Del mismo modo se recopilaron los datos de las constantes para dichos ajustes de curvas, lo cual permitirá predecir el comportamiento del reblandecimiento en el material de estudio.

El modelo que describe el efecto de Mullins nos permite predecir cual será el comportamiento en la deformación, fractura (daños microestructurales) y rendimiento de materiales poliméricos. Es muy importante tener en cuenta que este modelo nos permite diferenciar entre tres regiones: la región elástica, la región de ablandamiento y la de fractura [1, 2].

Existen una gran cantidad de investigaciones acerca del ablandamiento en materiales poliméricos las cuales suelen mostrar la comparación entre modelos matemáticos y pruebas experimentales, donde podemos confirmar la importancia del estudio y la aplicación del modelo de Mullins, esto debido a que dicho modelo reduce el tiempo empleado en realizar pruebas experimentales manteniendo un alto grado de precisión en la obtención de resultados. Elías-Zúñiga y coautores lograron desarrollar un modelo fenomenológico para el caucho, a partir de datos experimentales y determinando solo tres constantes como el módulo cortante, el número de cadenas moleculares específico del modelo de eslabones, y el parámetro de velocidad de ablandamiento [2]. Durante el 2005, se planteó el mejoramiento del modelo basado en la energía que resulto ser ligeramente superior al basado en la deformación para seguimiento de datos experimentales [3]. De igual forma se lograron describir dos fases; primero se tiene una fase dura la cual se transforma a una fase suave por medio de la evolución de daños microestructurales, los cuales son conseguidos por el fenómeno de esfuerzo-ablandamiento. Del mismo modo introdujeron la caracterización del efecto de Mullins con esfuerzos residuales, en este caso aplicado durante el comportamiento tanto del inflado, como del desinflado de globos de goma para tensiones no monótonas [4].

En el año 2014, se lograron realizar diferentes pruebas cíclicas en materiales biológicos para predecir el ablandamiento por tensión residual, utilizando el modelo del efecto de Mullins, el esfuerzo de Cauchy y la regla de mezclas equivalente [5]. Por lo cual el propósito de la realización de este estudio es el obtener el efecto de Mullins y su correspondiente caracterización mecánica del comportamiento del material polimérico de celda cerrada (polietileno) bajo cargas cíclicas. Para cumplir con nuestro propósito primeramente se realizó una microscopía óptica para detectar el tamaño de porosidad y el tipo de celda en la espuma de polietileno; teniendo en cuenta que el tamaño de muestra tenía un espesor de 5 mm.

Es importante tener en cuenta que las pruebas compresivas cíclicas se realizaron en una máquina de ensayo universal INSTRON 3365 a una temperatura ambiente como lo podemos ver en la figura 69; estas pruebas nos sirvieron para obtener los datos de fuerza y deformación; para esto cabe resaltar que nuestras probetas donde se hicieron las pruebas fueron uniformizadas siguiendo la norma ASTM D1621-00 [6], la cual nos indica que para una sección de contacto de 25.8 cm^2 a 232 cm^2 , necesitamos tener una altura mínima de probeta de 25.4 mm y la altura máxima debe ser igual o menos al ancho o diámetro de nuestra probeta. Por lo cual basándonos en los requerimientos de la norma optamos por seleccionar una probeta con una geometría hexaédrica con una sección transversal cuadrada de 67.31 mm y unos 48.56 mm de altura.

El área de contacto entre las secciones de muestra y los platos de compresión es de 45.31 cm^2 ; además dicha norma establece que la tasa de aplicación de la carga debe ser de $2.5 \pm 0.25 \text{ mm/min}$, esto por cada 25.4 mm de espesor de la muestra, por lo cual en nuestro caso la prueba se debe realizar con una velocidad de compresión de 5 mm/min.

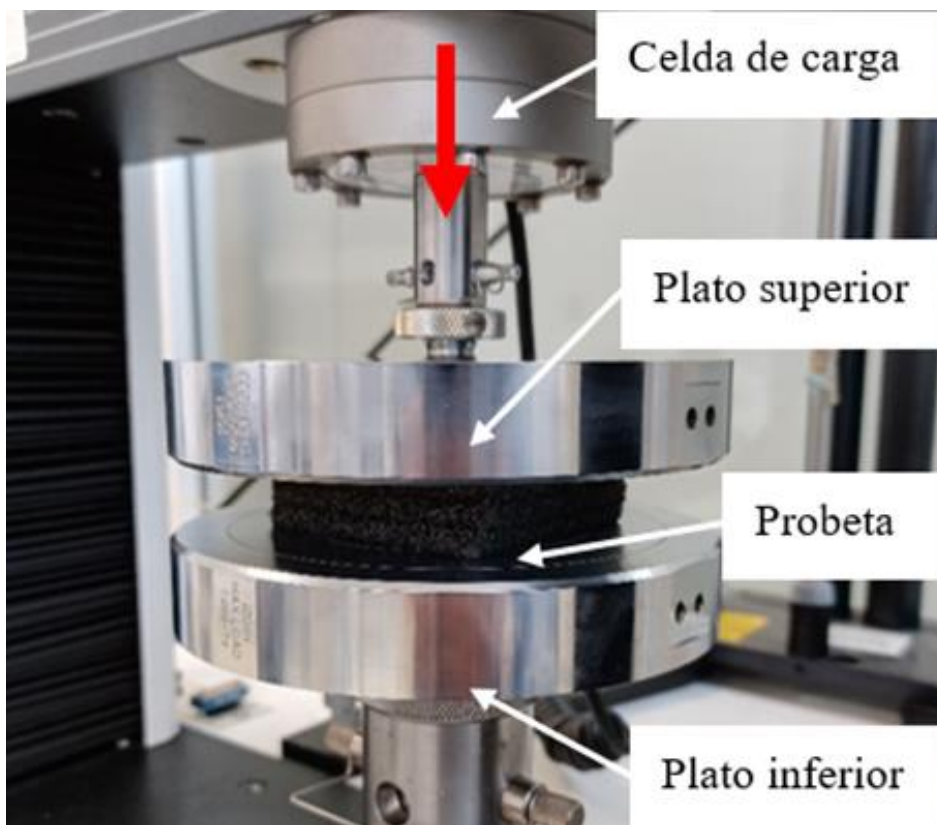


Figura 69: Probeta de polietileno durante la prueba de compresión.

Para realizar las pruebas cíclicas de compresión se seleccionaron ciclos de 12 mm, 24 mm y 36 mm, teniendo en cuenta que la distancia inicial entre los platos de compresión es de 46 mm. De cada probeta se realizó una prueba de compresión en cada una de las direcciones definidas, basados en los ejes mostrados en la figura 70; esto con la finalidad de poder evaluar la anisotropía del material y su respectiva influencia en el efecto de Mullins.

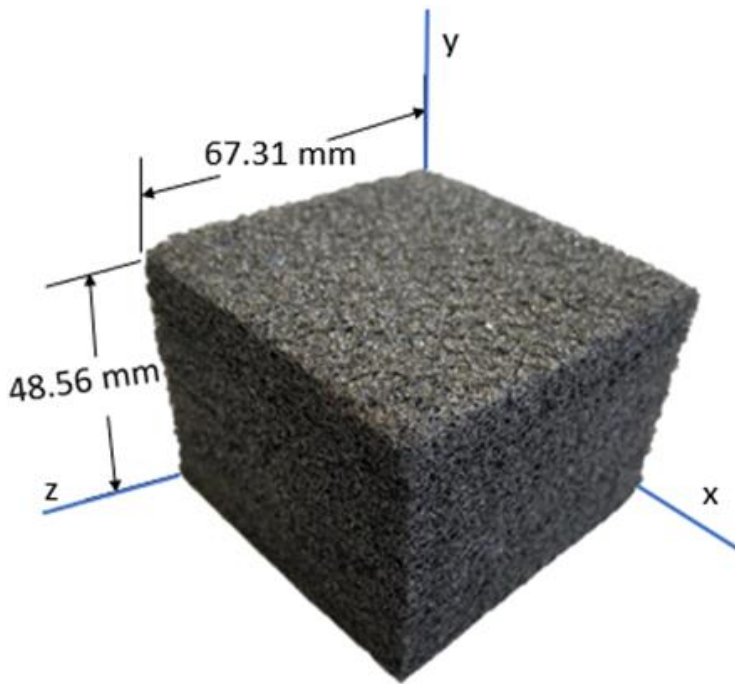


Figura 70: Dimensiones y direcciones de las probetas utilizadas en las pruebas de compresión.

Para poder describir al modelo del efecto de Mullins se requiere de la ecuación (1), la cual representa la densidad de energía de deformación unitaria total, W_T , de acuerdo con la regla de mezclas equivalente que sirve para desarrollar modelos basados en la forma de representación equivalente de la densidad de energía de deformación de materiales hiperelásticos.

$$W_T = (1 - f)W_{iso}(I_1) + fW_{aniso}(I_{4i}, I_{5i}) \quad (1)$$

Donde $W_{iso}(I_1)$ se refiere a la densidad de energía de deformación unitaria relacionada con el comportamiento del material isotrópico; de igual forma tenemos $W_{aniso}(I_{4i}, I_{5i})$ quien es la densidad de energía de deformación unitaria anisotrópica y las variables I_{4i} y I_{5i} representan el cuadrado del estiramiento i - de la familia de las fibras, definida como la ecuación (2).

$$I_{4i} = a_i \cdot C \cdot a_i, \quad I_{5i} = a_i \cdot C^2 \cdot a_i \quad (2)$$

Por otra parte, la variable f ; es la encargada de representar la fracción del volumen anisotrópico equivalente a la contribución de la densidad de energía total del material. Las direcciones de las fibras son conseguidas por los vectores de dirección $a_i = x_{1i}e_1 + x_{2i}e_2 + x_{3i}e_3$ en la configuración inicial, donde x_{ij} son los cosenos de dirección de i - en la familia de las fibras.

Al apoyarse de la ecuación (3), donde A_1 y A_2 son los parámetros de ajuste de densidad de la energía; fue que se realizó un ajuste de las curvas con el modelo matemático y los datos experimentales que capturan la anisotropía del material.

Logrando de este modo obtener las variables necesarias para describir el efecto de Mullins [2].

$$W_T = (1 - f)W_{iso}(I_1) + f \left(\frac{A_1}{3} (I_{1i} - 3) + \frac{A_2}{9} (I_{1i} - 3)^2 - \frac{2A_1}{3} \ln \sqrt{I_{3i}} \right) \quad (3)$$

De la microscopía óptica realizada se lograron obtener algunas imágenes donde se puede observar que estamos trabajando con un polímero de baja densidad y con una celda cerrada; tal y como se muestra en la figura 71.

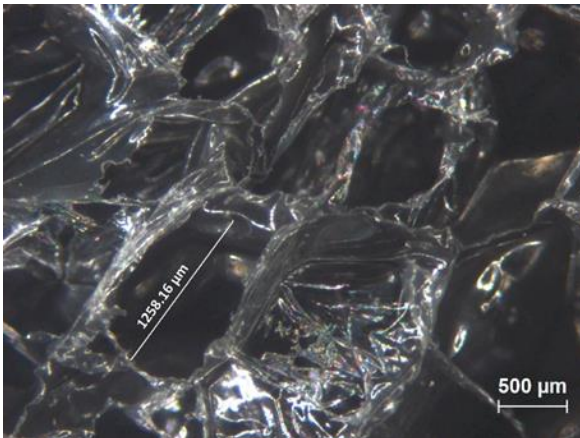


Figura 71: Microscopía óptica de polímero de polietileno.

Una vez que se analizaron las imágenes, se compararon los tamaños promedio del largo de los poros como es visible en la figura 72; donde se obtuvo un valor promedio de $1442 \mu m$; sin embargo es importante tener en cuenta que al trabajar con un material poroso y de comportamiento anisotrópico, existe una diversificación en los tamaños del largo de los poros.

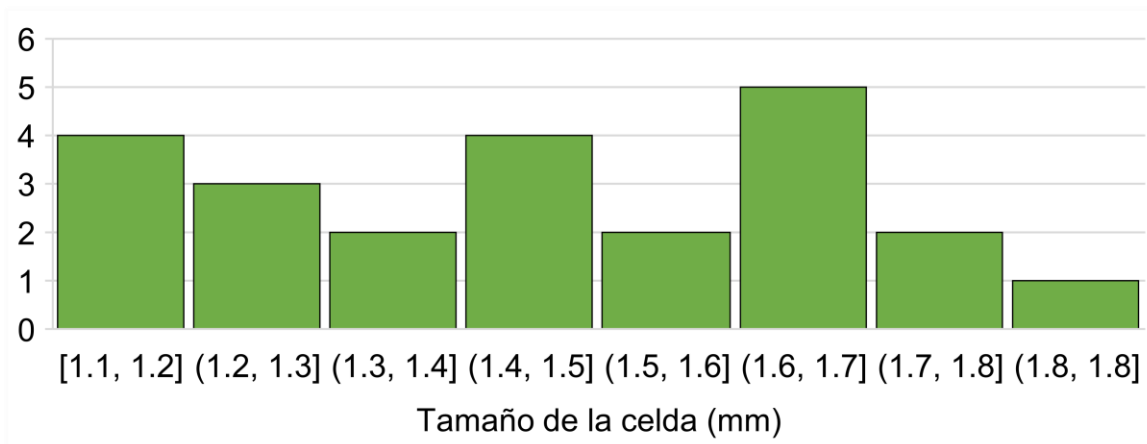


Figura 72: Valores de tamaño de largo de la porosidad de las muestras de polietileno.

Al realizar las diferentes pruebas cíclicas compresivas, la caracterización mecánica de las probetas permitió generar algunas curvas de fuerza [N] – desplazamiento [mm], por cada eje de cada probeta, para lo cual se realizó un post procesamiento donde se prepararon los datos para agruparlos en 4 grupos.

Estos grupos consistieron en una línea constante de carga y 3 líneas de descarga, estos grupos se nombraron como data, data 1, data 2 y data 3 respectivamente. De cada probeta se obtuvieron sus esfuerzos axiales [MPa] y la deformación unitaria [mm/mm]. En la figura 73 se muestran las curvas con un comportamiento promedio entre todas para cada eje.

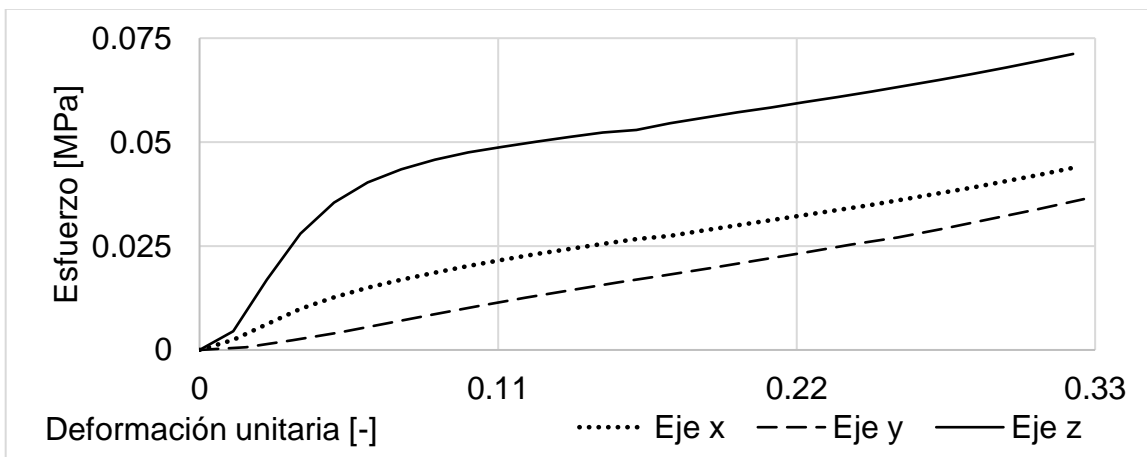


Figura 73: Curva de esfuerzo [MPa] - deformación unitaria [-] de la prueba promedio sobre los ejes X, Y, Z.

De dichas curvas se obtuvieron los diferentes módulos de rigidez (μ) mostrados en la tabla 2 y sus valores promedio correspondientes; de igual forma cabe resaltar que

la desviación estándar de variación máxima fue de 2σ , que corresponde a 1.25 para μ_x , 0.38 para μ_y , y 7.15 para μ_z lo cual nos indica que existe una excelente agrupación de los datos.

Tabla 2: Módulo de rigidez (μ) según el eje de aplicación de las cargas de compresión a las probetas.

	μ_x (kPa)	μ_y (kPa)	μ_z (kPa)
	42.59	10.58	92.93
	42.99	11.40	109.06
	43.52	11.02	105.26
	45.41	10.64	98.58
Promedio	43.63	10.91	101.46

Para las curvas cíclicas compresivas se tuvo que obtener el valor del estiramiento [-], mediante la suma de una unidad a cada uno de los valores de la deformación unitaria [-], para después tomar una muestra del 1% de los datos; teniendo en cuenta que el total de los mismos es de 4322, este muestreo facilitó el manejo de los datos y el entendimiento del comportamiento del material para el ajuste del modelo del efecto de Mullins.

De igual forma se realizó la comparación de las curvas obtenidas en base a la aplicación de la carga cíclica compresiva, esto con el fin de poder visualizar que gráfica presentaba un comportamiento promedio de entre todas las demás. Cabe resaltar que solo fueron agregados los datos de data, data 1 y data 2 para no generar una saturación de estos.

En la figura 74 se observa una de las curvas compresivas cíclicas de las pruebas experimentales, donde con una línea continua se representan los datos de la carga en un rango de aplicación que va desde 0 mm hasta 24 mm, la línea punteada indica todos los datos de la primera descarga desde 12 mm a 0 mm y la línea con guiones representa a los valores de descarga desde 24 mm hasta 0 mm. Es con este tipo de curvas que se realizarán los diferentes ajustes para poder obtener las diferentes variables que nos permitirán predecir el efecto de Mullins.

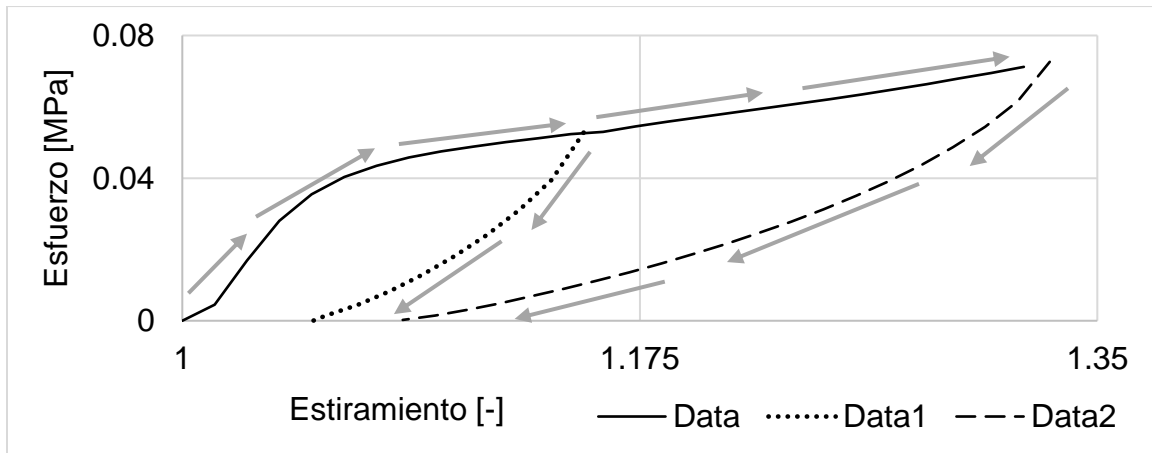


Figura 74: Curva compresiva cíclica dividida por una línea constante de carga y 2 líneas de descarga.

En la tabla 3 se encuentran los valores de todas las constantes obtenidas del material que permitieron los mejores ajustes de los datos experimentales, las cuales ayudan a comprender mejor el modelo del efecto de Mullins; donde podemos observar a μ que representa al modelo de rigidez del material, también se tienen la variable N que se usa para describir número de eslabones de cadena; esta variable es la que más influye en la precisión del comportamiento cuantitativo y cualitativo de las predicciones teóricas realizadas [2], la variable f es el porcentaje de la contribución anisotrópica del material, el cual se encuentra sometido a una carga uniaxial [5], Por su parte A_1 y A_2 son variables que señalan los parámetros del ajuste de densidad de energía, y las variables b y C ayudan a obtener un mejor ajuste de los datos experimentales.

Tabla 3: Constantes usadas en el material para el ajuste de los datos experimentales.

	Eje X	Eje Y	Eje Z
μ (kPa)	42.59	11.02	98.58
N	0.99	5	0.99
f (%)	-1.03	6.09	-2.39
A_1 (kPa)	-49.7	20.8	-13.9
A_2 (kPa)	-75.5	21.5	-53.7
b	0.8	0.4	0.98
C (kPa)	700	450	655

Las figuras 75, figura 76 y la figura 77 presentan la comparación realizada de los resultados obtenidos acerca de las pruebas experimentales de esfuerzo [MPa] – estiramiento [-] y la curva generada a partir de las constantes del ajuste para el modelo del efecto de Mullins (MDM), generadas a partir de las ecuaciones mostradas; es importante notar que los puntos rojos son los datos obtenidos de forma experimental y la línea negra mostrada son los datos obtenidos analíticamente utilizando el modelo del efecto de Mullins (MDM).

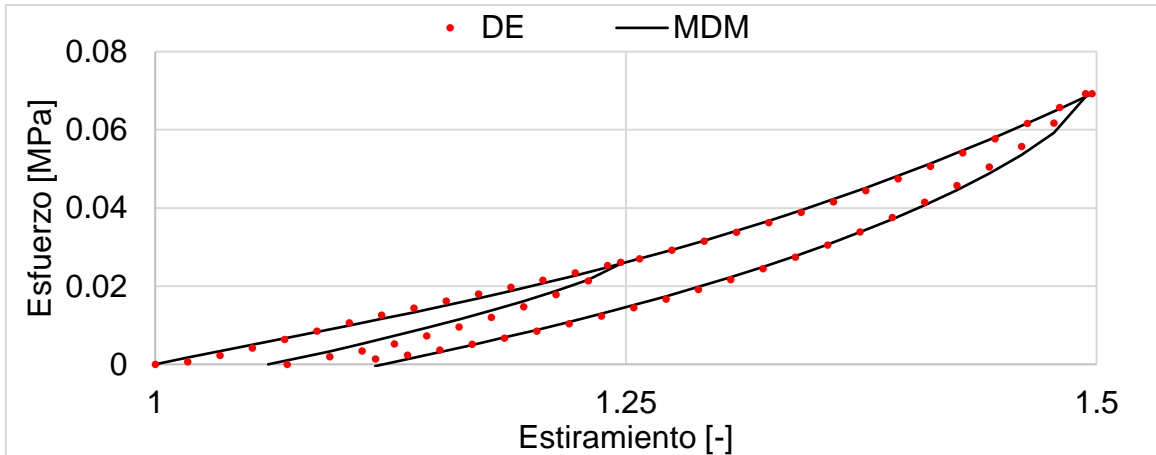


Figura 75: Ajuste de la curva sobre el eje Y.

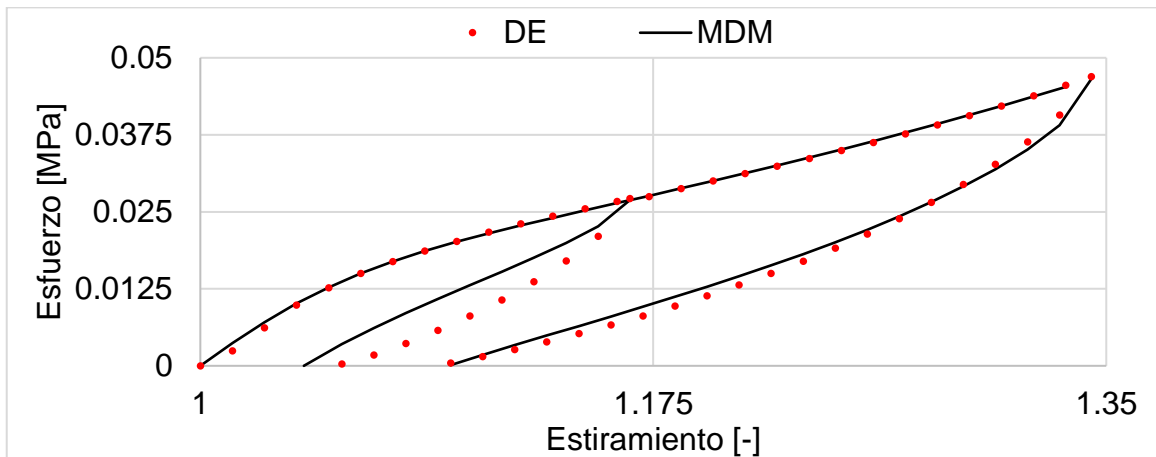


Figura 76: Ajuste de la curva sobre el eje X.

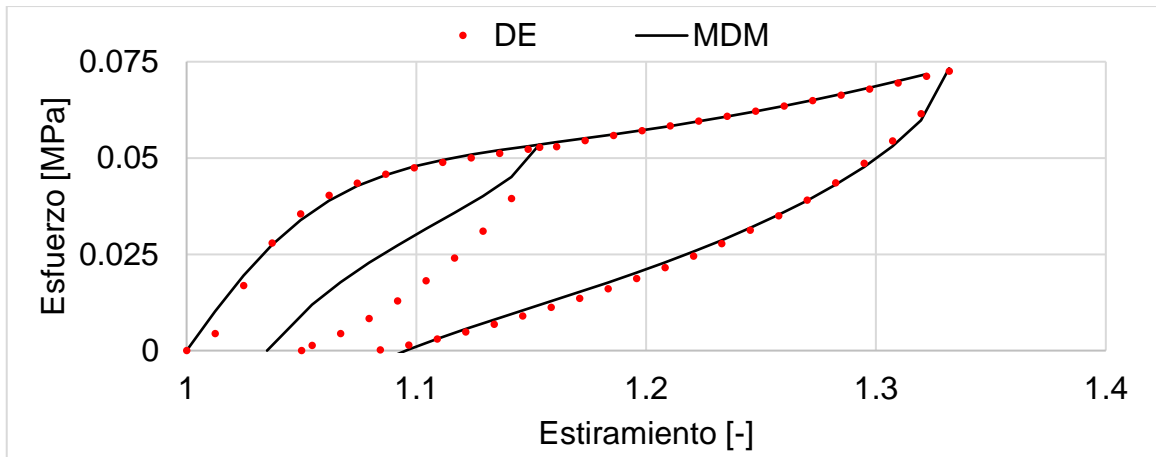


Figura 77: Ajuste de la curva sobre el eje Z.

A partir de las pruebas cíclicas compresivas realizadas en un material de polímero de polietileno de baja densidad se pudo realizar la comparación de las curvas obtenidas de los datos experimentales contra las curvas resultantes del ajuste para el modelo de Mullins, realizado a partir de las ecuaciones presentadas. Reiterando la veracidad y la similitud del comportamiento presentado de los resultados experimentales contra las predicciones de los materiales hiperelásticos, realizadas con la regla de mezclas equivalente y la consideración de su anisotropía.

La constante N , quien representa el número de eslabones de cadena, es la constante que más influye en el grado de precisión del ajuste del modelo, por lo cual al encontrar este valor sobre los datos experimentales se obtiene un ajuste mucho mejor del modelo del efecto de Mullins.

Como parte de los resultados, es importante resaltar el valor del módulo de rigidez (μ), debido a que μ_y tiene un valor de 11.02 kPa, y μ_x es casi 4 veces mayor que μ_y ; y a su vez μ_z es prácticamente 9 veces mayor que μ_y ; lo cual permite destacar que la carga de aplicación sobre el eje z cuenta con una rigidez superior a los demás ejes.

El utilizar los datos experimentales recolectados de las pruebas de espuma de polietileno donde se aplicaron las ecuaciones de densidad de deformación unitaria de energía equivalente, fue bastante útil para poder realizar la comparación de los datos extraídos de forma experimental, contra el ajuste del reblandecimiento como se muestra en las figuras 65 – a, 65 – b y la figura 66, lo cual permite considerar que la gran similitud entre los datos experimentales obtenidos con los generados en el ajuste hacen del modelo propuesto uno preciso y confiable.

Las constantes obtenidas y los ajustes de las curvas realizados permiten confirmar tanto de forma gráfica como numérica que el uso del modelo analítico para el material en estudio fue adecuado; lo cual es un indicador que el resultado experimental obtenido es muy semejante al resultado esperado de forma analítica, reafirmando la confiabilidad de la aplicación del modelo del efecto de Mullins para el material de estudio.

CONCLUSIÓN

La importancia de comprender la respuesta dinámica de una espuma de polietileno bajo cargas de impacto radica en la necesidad de garantizar la integridad estructural de diversos dispositivos, especialmente en la industria aeroespacial. Para diseñar sistemas efectivos de protección de productos, es esencial tener en cuenta las diferentes aceleraciones de impacto que pueden afectar al dispositivo, causando daños mecánicos. También se debe considerar factores como el peso, las dimensiones, la fragilidad, el material y las propiedades del amortiguador, ya que la deformación del amortiguador está relacionada con la disipación de la energía durante el impacto.

La caracterización de la espuma de polietileno de celda cerrada, sujeta a cargas de impacto compresivas cíclicas, fue realizada siguiendo la norma ASTM D1621-00, que establece los parámetros para realizar correctamente las pruebas compresivas, para obtener curvas de amortiguamiento (esfuerzo – deformación), que relacionan la respuesta dinámica al dejar caer una masa con un peso determinado, desde una altura fija en caída libre, junto con la desaceleración máxima de la masa y la deformación que sufre la espuma amortiguante. Mediante el uso de la regla de mezclas equivalentes se determinó el modelo del efecto de Mullins, considerando la anisotropía del material, que permite la generación de un ajuste de curvas analíticas mucho más preciso; dichos ajustes nos permiten predecir el comportamiento del reblandecimiento del material.

Al realizar la microscopía óptica del material se determinó que el tamaño promedio del largo de los poros es de $1442 \mu m$, comprobando que se trata de un material de celda cerrada de baja densidad y de comportamiento anisotrópico. Las pruebas compresivas cíclicas se realizaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D1621-00, las cuales fueron de utilidad para obtener información de la fuerza y deformación a las que debían ser sometidas las muestras de la espuma de polietileno; es importante resaltar que los ciclos en los que se realizaron las pruebas fueron de 12 mm, 24 mm y 36 mm tomando en consideración que la distancia entre los platillos de compresión es de 46 mm, las pruebas fueron realizadas para los ejes x, y y z, con el fin de analizar la anisotropía del material y su comportamiento respectivo al efecto de Mullins.

Es importante precisar que el número de eslabones de cadena es el parámetro más influyente el ajuste del modelo matemático. Al precisar este valor con respecto a los datos experimentales se obtiene una mejor descripción del efecto de Mullins. Es interesante resaltar el valor del módulo de rigidez ya que μ_y tiene un valor de 11.02 kPa, y μ_x es casi 4 veces mayor que μ_y , y μ_z es prácticamente 9 veces mayor que μ_y . Haciendo resaltar, que la carga de aplicación sobre el eje z cuenta con una rigidez superior a los demás ejes. Sabiendo lo anterior se evidencia la importancia de la consideración de la anisotropía en el modelo del efecto de Mullins.

Las constantes obtenidas y los ajustes de las curvas realizados nos permiten confirmar tanto de forma gráfica como numérica que el uso del modelo analítico para el material en estudio fue adecuado; lo cual indica que el resultado experimental obtenido es muy semejante al resultado esperado de forma analítica, reafirmando la confiabilidad de la aplicación del modelo del efecto de Mullins para el material de estudio.

Durante mi periodo en el Tecnológico Nacional de México Campus Pachuca, en la División de Estudios de Posgrado en la Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la supervisión del Dr. Luis Manuel Palacios Pineda, Coordinador de la Maestría en Ingeniería Mecánica, y en colaboración con la estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica, Ing. Mariela Carolina Bravo Sánchez, he adquirido una amplia gama de habilidades técnicas y de software. En el ámbito del análisis de video, he empleado el programa Tracker para calcular parámetros como la aceleración, velocidad, posición, aceleración angular y ángulo de rotación de objetos a lo largo del tiempo. Además, con el programa GOM Correlate, he evaluado la deformación y el desplazamiento de piezas montadas, generando superficies de análisis específicas para comprender el comportamiento de los materiales bajo diferentes cargas.

En cuanto a la programación, he utilizado Python, MatLab y Mathematica para desarrollar modelos matemáticos que han permitido la realización de pruebas compresivas cíclicas experimentales y la generación de informes de resultados detallados, especialmente enfocados en materiales poliméricos sometidos a cargas de impacto. Mi capacidad de diseño computacional se ha fortalecido mediante el uso de SolidWorks, y he aprendido a utilizar software de manufactura aditiva para crear componentes tridimensionales utilizados en el banco de pruebas, como los deslizadores que garantizan la movilidad de las puertas de seguridad hechas de acrílico.

Participé activamente en la finalización de la construcción del banco de pruebas experimentales, desde el montaje de la cabina del polipasto hasta la preparación del percutor para su funcionamiento óptimo. Esta experiencia me permitió apreciar la importancia de la seguridad en la operación de equipos y la necesidad de medidas de protección, como las puertas de acrílico y sus accesorios, para garantizar la integridad de las personas que trabajan con el instrumento.

Colaboré en la elaboración de un artículo científico titulado "Caracterización del efecto de Mullins en polímero de polietileno de celda cerrada," que será presentado en el congreso de SOMIM. Esta colaboración práctica resaltó la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación académica en un proyecto real y subrayó la importancia de cumplir con las normativas, como la Norma ASTM D1621-00, en las pruebas cíclicas compresivas de materiales poliméricos. El modelo del efecto de Mullins se determinó con precisión mediante la regla de mezclas equivalente, permitiendo un ajuste más preciso de las curvas analíticas que describen la densidad de deformación de la energía.

En resumen, este periodo he enriquecido mis habilidades técnicas y mi comprensión de la ingeniería, y me ha motivado a explorar aún más las diversas aplicaciones del campo en el mundo real.

REFERENCIAS

- [1] A. INTERNATIONAL, *D1621-00*.
- [2] A. Elías-Zúñiga, I. A. Perales-Martínez, L. M. Palacios-Pineda, O. Martínez-Romero, D. Olvera-Trejo y I. H. Jiménez-Cedeño, «Investigating the Mullins Effect and Energy Dissipation in Magnetorheological Polyurethane Elastomers,» *International Journal of Molecular Sciences*, pp. 1-24, 2020.
- [3] A. E. Z. a. M. F. Beatty, «A new phenomenological model for stress-softening in elastomers,» *Mathematik und Physik ZAMP*, p. 794–814, 2002.
- [4] A. Elías-Zúñiga, «A phenomenological energy-based model to characterize stress-softening effect in elastomers,» *elsevier*, p. 3496–3506, 2005.
- [5] A. Elías-Zúñiga y C. A. Rodríguez, «A non-monotonous damage function to characterize stress-softening effects with permanent set during inflation and deflation of rubber balloons,» *elsevier*, p. 1937–1943, 2010.
- [6] A. Elías-Zúñiga, K. Baylón, I. Ferrer, L. Serenó, M. L. Garcia-Romeu, I. Bagudanch, J. Grabalosa, T. Pérez-Recio, O. Martínez-Romero, W. Ortega-Lara y L. Ernesto Elizalde, «On the Rule of Mixtures for Predicting Stress-Softening and Residual Strain Effects in Biological Tissues and Biocompatible Materials,» *materials*, pp. 441-456, 2014.
- [7] M. T. Hatae, «New Techniques in Packagin», *Space and Information Systems Div. North American Aviation Inc*, pp 1-5, 1964.
- [8] G. J. Burgess, «Product Fragility and Damage Boundary Theory», *School of Packaging, Michigan State University; Packaging Technology and Science, vol 1 5-10*, pp 1-6, 1988.
- [9] G. J. Burgess, «Consolidation of Cushon Curves», *School of Packaging, Michigan State University; Packaging Technology and Science, vol 3 189-194*, 1990.
- [10] J. M. Gilbert, G. S. Batt, «Impact Oscillator Model for the Prediction of Dynamic Cushion Curves of Open Cell Foams», *Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University, Potsdam, NY, USA, Packaging Technology and Science, vol 28 227 – 239*, 2015.

- [11] T. Piatkowski y P. Osowski, «Modified Method for Dynamic Stress – Strain Curve Determination of Closed – Cell Foams», *Faculty of Mechanical Engineering, UTP University of Science and Technology, Bydgoszcz, Polonia; Packaging Technology and Science*, vol 29 337 – 349, 2016.
- [12] A. Joodaky, G. S. Batt, J. M. Gilbert, «Prediction of cushion curves of polymer foams using a nonlinear distributed parameter model», *School of Mechanical Engineering, Purdue University, Packaging Technology and Science*, pp 1 – 12, 2019.
- [13] M. C. Bravo-Sánchez, J. M. Briseño-Rodríguez, L.M. Palacios-Pineda, A. Elías-Zúñiga, O. Martínez-Romero, «Caracterización del efecto de Mullins en polímero de polietileno de celda cerrada», *Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, pp 1 – 6, 2023.