

Análisis del Comportamiento Viscoelástico de un Material por Medio de
Correlación de Imagen a Partir de un Ensayo de Relajación.

Andrés Felipe Sanabria Vargas (1) y Juan Diego Perilla Jaimes (2)

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

William Pinto Hernández

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Pregrado en Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A nuestras familias, por el amor. A Jorge Luis Borges, por la magia.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el respaldo de muchas personas que de una u otra forma dejaron su huella en este proceso. Agradecimiento a nuestro director y profesores por su paciencia y enseñanzas, a nuestras familias por su apoyo inagotable, y a los amigos por su compañía en los momentos difíciles. También se extiende nuestra gratitud a la Escuela de Ingeniería Mecánica, quienes facilitaron equipos y espacios ayudando a concretar esta meta.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Metodología	17
2.1 Materiales y Equipos	17
2.1.1 Propiedades Mecánicas de los Materiales Viscoelásticos	17
2.1.2 Modelos Matemáticos para Materiales Viscoelásticos	18
2.1.2.1 Modelo de Maxwell.	18
2.1.2.2 Series de Prony.	19
2.1.3 Ensayo de Relajación de Esfuerzos	20
2.1.3.1 Principios del Ensayo de Relajación.	20
2.1.3.2 Equipos Utilizados en Ensayos de Relajación.	20
2.1.4 Software de correlación de imágenes NCORR v1.2	20
2.1.5 Principios de la Correlación de Imágenes	21
2.2 Modelo de referencia	21
2.3 Diseño y Construcción del Mecanismo	24
2.3.1 Medición de Carga	24
2.3.2 Marco del Mecanismo	26
2.3.3 Aprisionamiento de las Probetas	28
2.3.4 Sistema de Desplazamiento	29

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE UN MATERIAL	5
2.4 Ensayos con el Mecanismo y Captura de Imágenes	31
2.5 Implementación del software NCORR v1.2	34
2.5.1 Configuración y Proceso de Análisis en NCORR	34
2.5.2 Generación y Visualización de Resultados	36
2.6 Ajuste por Medio de Inferencia Bayesiana	39
2.6.1 Inferencia Bayesiana	39
2.6.2 Procesamiento de datos	39
2.6.3 Definición e Implementación del modelo Bayesiano	40
2.7 Comparación de Modelos de Maxwell: MTS vs. Mecanismo Experimental	41
3. Análisis de Resultados	42
3.1 Ajuste del Modelo de Maxwell	42
3.2 Validación del modelo	44
3.3 Cálculo de Poisson por medio de NCORR	46
4. Conclusiones	47
5. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	50
Apéndices	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Modelo de Maxwell: MTS</i>	42
Tabla 2 <i>Modelo de Maxwell: mecanismo.</i>	43
Tabla 3 <i>Valor hallado del coeficiente de Poisson a partir de Inferencia Bayesiana</i>	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Representación gráfica del comportamiento de un material viscoelástico según el Modelo de Maxwell</i>	18
Figura 2 <i>Máquina Universal de Ensayos Landmark MTS</i>	22
Figura 3 <i>Probeta de PLA</i>	23
Figura 4 <i>Software de impresión 3D</i>	23
Figura 5 <i>Ensayo de relajación MTS</i>	24
Figura 6 <i>Celda de carga</i>	25
Figura 7 <i>Conexión de la celda de carga</i>	25
Figura 8 <i>Marco del mecanismo</i>	27
Figura 9 <i>Montaje de la celda de carga</i>	27
Figura 10 <i>Mordazas</i>	28
Figura 11 <i>Montaje de las mordazas</i>	29
Figura 12 <i>Base móvil</i>	30
Figura 13 <i>Base móvil instalada</i>	31
Figura 14 <i>Probeta para análisis DIC</i>	32
Figura 15 <i>Toma de datos</i>	33
Figura 16 <i>Interfaz procesamiento NCORR</i>	34
Figura 17 <i>Interfaz de selección de ROI en el entorno NCORR</i>	35
Figura 18 <i>Interfaz de definición de resolución y mallado en el entorno NCORR</i>	36

Figura 19 <i>Visualizador de gráficas de datos de desplazamientos entre imágenes entorno NCORR</i>	37
Figura 20 <i>Visualizador de gráficas de datos de deformaciones entre imágenes entorno NCORR</i>	37
Figura 21 <i>Interfaz de extensión de postprocesamiento entorno NCORR</i>	38
Figura 22 <i>Gráfica Esfuerzo vs Tiempo ajustado al Modelo de Maxwell mediante Inferencia Bayesiana</i>	40
Figura 23 <i>Modelo de Maxwell MTS</i>	43
Figura 24 <i>Modelo de Maxwell: mecanismo</i>	44
Figura 25 <i>Ajuste del esfuerzo entre el modelo de referencia y el mecanismo experimental</i>	45
Figura 26 <i>Ajuste del Tau entre el modelo de referencia y el mecanismo experimental</i>	45
Figura 27 <i>Gráfica de distribución del Coeficiente de Poisson a partir de Inferencia Bayesiana</i>	47

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A <i>Implementación del software NCORR v1.2</i>	53
Apéndice B <i>Datos extraídos del NCORR para el cálculo de Poisson</i>	61
Apéndice C <i>Datos y ajuste por medio de Inferencia Bayesiana</i>	66

Resumen

Título: Análisis del Comportamiento Viscoelástico de un Material por Medio de Correlación de Imagen a Partir de un Ensayo de Relajación.^{1*}

Autor: Andrés Felipe Sanabria Vargas (1) y Juan Diego Perilla Jaimes (2)^{2*3*}

Palabras Clave: Ensayo de relajación, Material viscoelástico, Correlación de imágenes.

Descripción: El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar una metodología accesible para la caracterización del comportamiento viscoelástico de la silicona VMQ mediante correlación de imágenes y ensayos de relajación de esfuerzos. Para ello, se diseñó y construyó un mecanismo sencillo que aplicó una deformación controlada sobre una probeta del material, permitiendo registrar su respuesta mecánica a lo largo del tiempo. Inicialmente, se obtuvo un modelo de referencia del material utilizando la máquina universal de ensayos Landmark MTS, lo que permitió establecer una base de comparación confiable. Posteriormente, el ensayo se replicó con el mecanismo diseñado, capturando datos de esfuerzo a través del tiempo para obtener las constantes de la relajación del modelo de Maxwell e imágenes del proceso para su análisis con el software NCORR, que permitió extraer datos de desplazamiento y deformación, los cuales fueron utilizados para encontrar el módulo de Poisson. Finalmente, se comparó el modelo obtenido con el mecanismo propuesto frente al modelo de referencia, evaluando su precisión y validez. Esto permitió determinar que la metodología propuesta es una alternativa viable en la caracterización

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Pregrado en Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto Hernández. PhD. Ingeniería Mecánica.

de la relajación en materiales viscoelásticos sin la necesidad de equipos de alta gama, pero presenta oportunidades de mejora en cuanto a su precisión.

Abstract

Title: Analysis of the Viscoelastic Behavior of a Material Using Image Correlation in a Stress Relaxation Test.

Author(s): Andrés Felipe Sanabria Vargas (1) and Juan Diego Perilla Jaimes (2)⁴

Key Words: Relaxation Test, Viscoelastic Material, Image Correlation.

Description: This project aimed to develop an accessible methodology for the characterization of the viscoelastic behavior of VMQ silicone through image correlation, applied to stress relaxation tests. To achieve this, a simple mechanism was designed and built to apply a controlled and constant deformation to a material specimen, allowing its mechanical response to be recorded over time. Initially, a reference model of the material was obtained using the Landmark MTS universal testing machine, providing a reliable baseline for comparison. Subsequently, the test was replicated using the proposed mechanism, taking values of stress over time to obtain the constants of stress relaxation from the Maxwell's model and filming the process to analyse it through the NCORR software, which extracted displacement and strain data, that was used to obtain the material's Poisson's ratio. Finally, the model obtained using the proposed mechanism was compared with the reference model to evaluate its precision and validity. This determined that the proposed methodology is a viable and accurate alternative for characterizing viscoelastic materials without requiring high-end equipment, but presents improvement opportunities in its precision.

⁴Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Undergraduate Program in Mechanical Engineering. Advisor: William Pinto Hernández, Ph.D. in Mechanical Engineering.

Introducción

Los sistemas de amortiguación juegan un papel crucial en la ingeniería mecánica, ya que permiten reducir vibraciones e impactos que pueden comprometer la integridad de estructuras y componentes, además de generar incomodidad, ruidos excesivos y pérdidas energéticas. Entre las estrategias utilizadas para mitigar estos efectos, los materiales viscoelásticos destacan por su capacidad de disipar energía mediante deformaciones controladas, recuperando su forma original una vez que cesa la carga aplicada. (Fujii & Yamaguchi, 2005)

Sin embargo, la caracterización de estos materiales suele depender de equipos sofisticados y costosos, lo que limita su accesibilidad en ciertos entornos de investigación y desarrollo (Alfrey & Doty, 1945). En este contexto, surge la necesidad de explorar métodos alternativos que permitan evaluar su comportamiento de manera precisa, práctica y accesible. La correlación de imágenes, en combinación con ensayos de relajación de esfuerzos, se presenta como una solución viable para este propósito, al proporcionar mediciones detalladas de deformación sin requerir sensores de contacto. (Chu et al., 1985)

El presente trabajo de investigación busca desarrollar una metodología accesible para caracterizar el comportamiento viscoelástico de la silicona VMQ (vinil-metil-siloxano), utilizando un ensayo de relajación a tensión y el software de correlación de imágenes (NCORR) para analizar la respuesta del material. La validación de esta metodología se llevará a cabo mediante la comparación con un modelo de referencia obtenido con la máquina universal de ensayos Landmark MTS.

La caracterización de materiales viscoelásticos ha sido un área de interés en diversas disciplinas debido a sus múltiples aplicaciones en la industria automotriz, aeroespacial y naval. Según Elmoghazy et al. (2024), estos materiales tienen la capacidad de disipar energía al

deformarse, liberándola en forma de calor, lo que los hace ideales para sistemas de amortiguación pasiva. De acuerdo con Zhou et al. (2016), se destacan por su bajo costo, ligereza y fácil implementación, lo que ha impulsado su uso en componentes estructurales que requieren reducción de vibraciones.

En la Universidad Industrial de Santander, la investigación en este campo ha tomado relevancia, con trabajos como el de Camargo Alvarado (2022), donde se analiza la caracterización dinámica de materiales viscoelásticos para aplicaciones de amortiguación pasiva. Estos estudios han demostrado la importancia de desarrollar metodologías eficientes para evaluar el comportamiento de estos materiales.

El uso de la correlación de imágenes en la caracterización de materiales ha evolucionado en las últimas décadas, permitiendo obtener mediciones precisas sin la necesidad de sensores de contacto. Su aplicación en ensayos de relajación de esfuerzos ha demostrado ser una alternativa prometedora para la evaluación del comportamiento viscoelástico, al proporcionar datos detallados de deformación y esfuerzo en función del tiempo. (Sutton et al., 2012)

El desarrollo de una metodología accesible para la caracterización de materiales viscoelásticos representa un aporte significativo tanto en el ámbito académico como en la industria.

En el entorno universitario, el uso de correlación de imágenes permite realizar estudios sin depender de maquinaria especializada, ampliando las oportunidades de investigación y fomentando la adopción de tecnologías innovadoras para el análisis de materiales. Esta metodología podría implementarse en futuros estudios, permitiendo la caracterización de otros materiales sin necesidad de equipos de alto costo.

Este trabajo no busca caracterizar la silicona VMQ en sí, ya que sus propiedades están bien documentadas en la industria, sino evaluar la viabilidad de un método alternativo y accesible para

su caracterización. La posibilidad de obtener datos confiables sin depender de equipos especializados puede beneficiar a laboratorios con recursos limitados, facilitando la implementación de pruebas en diferentes contextos.

Además, el diseño y construcción de un mecanismo de ensayo de fácil acceso permitiría replicar este procedimiento en otras instituciones o industrias interesadas en evaluar materiales viscoelásticos sin incurrir en inversiones significativas. De esta manera, el estudio no solo contribuye al avance de la investigación en materiales, sino que también abre la puerta a aplicaciones prácticas en ingeniería mecánica, donde la caracterización de materiales viscoelásticos es clave en el diseño de sistemas de amortiguación y control de vibraciones. (Schapery, 1969)

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar el comportamiento viscoelástico de la silicona VMQ mediante el diseño y construcción de un mecanismo de ensayo de relajación, utilizando el software de correlación de imágenes y aplicando el modelo de Maxwell, aportando al propósito de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander de fomentar la investigación y la extensión con el fin de contribuir al desarrollo social, científico y tecnológico, y dar respuesta a las necesidades de la sociedad.

1.2 Objetivos Específicos

1. Obtener un modelo de referencia del comportamiento viscoelástico de la silicona VMQ utilizando la máquina universal de ensayos Landmark MTS para determinar las propiedades precisas del material.

2. Diseñar y construir un mecanismo que aplique un desplazamiento fijo a una probeta del material, permitiendo la captura de datos de esfuerzo y deformación para ensayos de relajación.
3. Obtener datos experimentales sobre deformación y esfuerzo de la silicona VMQ mediante el software de correlación de imágenes NCORR, a partir de un ensayo de relajación de esfuerzos.
4. Ajustar los parámetros del modelo de Maxwell usando inferencia bayesiana, aplicando los datos obtenidos del ensayo de relajación para mejorar la precisión del modelo.
5. Evaluar la precisión del modelo de Maxwell ajustado mediante comparación con el modelo de referencia obtenido en la máquina de ensayos.

2. Metodología

En este capítulo se presentará la metodología desarrollada para caracterizar el material seleccionado y validar los resultados obtenidos.

2.1 Materiales y Equipos

El material seleccionado para ser caracterizado fue la silicona VMQ, que tiene un comportamiento viscoelástico. Es decir, sus propiedades mecánicas tienen una dependencia del tiempo, presentando fenómenos como la relajación (disminución de esfuerzos al ser sometidos a una deformación constante) o el creep (aumento en la deformación al ser sometidos a un esfuerzo constante). Conocer dichas propiedades puede permitir encontrar nuevos usos en ingeniería, aprovechándolas principalmente en aplicaciones de disipación de energía.

2.1.1 Propiedades Mecánicas de los Materiales Viscoelásticos

Los materiales viscoelásticos muestran un comportamiento mecánico que depende directamente del tiempo, lo que implica que su esfuerzo y deformación varían según la duración y la magnitud de la carga que se aplica. De esta forma se puede disipar energía en forma de calor

por medio de un fenómeno llamado histéresis, el cual se observa en los ciclos de carga y descarga en los que el material no regresa a su posición inicial.

Esta propiedad es esencial en aplicaciones como amortiguadores y aisladores de vibraciones, donde la capacidad de disipar energía y la respuesta mecánica es clave para su desempeño.

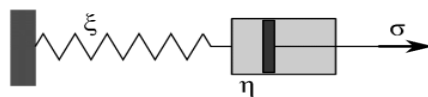
2.1.2 Modelos Matemáticos para Materiales Viscoelásticos

Para entender el comportamiento de los materiales viscoelásticos se han desarrollado modelos matemáticos que combinan elementos viscosos y elásticos. A continuación, se explicará el Modelo de Maxwell.

2.1.2.1 Modelo de Maxwell. El modelo de Maxwell contempla el uso de dos elementos en serie para expresar matemáticamente el comportamiento de un material viscoelástico. Los elementos: elástico (resorte) y viscoso (amortiguador), los cuales se expresan con las variables E y η respectivamente, representan la respuesta elástica y la disipación de energía. De esta manera se permite describir la respuesta del material ante una carga en función del tiempo, mostrando una recuperación elástica instantánea y una deformación retardada.

Figura 1

Representación gráfica del comportamiento de un material viscoelástico según el Modelo de Maxwell



Nota. Adaptado de Balart Gimeno, R. A., Montañés Muñoz, N., Quiles-Carrillo, L. J., Torres-Giner, S., Lascano Aimacaña, D., Rojas Lema, S., & Ivorra Martínez, J. (s.f.). Viscoelasticidad. Modelo básico de Maxwell. Universitat Politècnica de València.

La ecuación diferencial en Eq (1) que rige el modelo se obtiene a partir de la ley de Hooke y la ley de Newton, refiriéndose al resorte y al amortiguador respectivamente:

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

En el ensayo de relajación de esfuerzos, que se explicará de manera más extendida más adelante, la deformación se mantiene constante y dicha ecuación tiene una solución exponencial de la forma Eq (2):

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

Donde $\tau = \eta / E$ el tiempo de relajación, que describe la rapidez con la que el esfuerzo decae en función del tiempo.

Se resalta que, a pesar de la utilidad del modelo de Maxwell para la descripción de la relajación de los esfuerzos, este presenta ciertas limitaciones para describir otras propiedades de los materiales viscoelásticos como la fluencia. Debido a estas restricciones, en aplicaciones más complejas suele ser necesario ampliar el modelo usando las Series de Prony, de las cuales se hablará en el siguiente apartado.

2.1.2.2 Series de Prony. Las series de Prony son la expansión del modelo de Maxwell. Al tener una mayor complejidad matemática abarcan una mayor precisión para diferentes aplicaciones.

2.1.3 Ensayo de Relajación de Esfuerzos

El ensayo de relajación es una prueba en la que se somete un material a una deformación constante, en esta, se registra la disminución del esfuerzo con respecto al tiempo.

2.1.3.1 Principios del Ensayo de Relajación. El ensayo consiste en dos fases. La primera: aplicar y llegar a una deformación constante. La segunda: medir la disminución del esfuerzo una vez llegada a la deformación constante.

2.1.3.2 Equipos Utilizados en Ensayos de Relajación. La máquina universal de ensayos Landmark MTS, es una herramienta que proporciona al usuario la capacidad de hacer ensayos destructivos (tracción, fatiga) y no destructivos (relajación, creep).

Los sensores de carga para la medición del esfuerzo al cual el material es sometido se pueden calibrar de tal manera que sean una alternativa económica y eficiente para medir la relajación del material.

2.1.4 Software de correlación de imágenes NCORR v1.2

Es un software de código abierto utilizado para realizar correlación de imágenes para ensayos mecánicos. Se emplea para analizar el comportamiento de materiales al medir sus desplazamientos y deformaciones sin contacto directo. Es de fácil acceso e implementación, además de contar con la capacidad de proporcionar resultados en la evaluación de la relajación de esfuerzos y hallar el coeficiente de Poisson del material por medio del análisis de sus deformaciones en x e y. (Blaber et al., 2015)

El software usado funciona a partir de un algoritmo de iteración, un factor de minimización y un coeficiente de Correlación. Siendo el suelo matemático sobre el cual se fundamenta el código para correlacionar imágenes de forma precisa.

2.1.5 Principios de la Correlación de Imágenes

Esta técnica es una forma de medición no invasiva que es muy útil para determinar desplazamientos y deformaciones en una superficie, esto a partir de la comparación de imágenes tomadas antes y después de someter al material a una carga.(Peters & Ranson, 1982)

Las imágenes proporcionadas deben contar con un foco llamado región de interés (ROI), en el cual el software genera un mallado con partículas por píxel, dichas partículas son comparadas a lo largo del procesamiento mediante algoritmos de correlación digital.

2.2 Modelo de referencia

Como primera parte del proyecto se realizaron nueve ensayos de relajación a tracción en la máquina de ensayos Landmark MTS (ver Figura 2), ubicada en el laboratorio de materiales de la Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de obtener un modelo de referencia para contrastar los datos obtenidos por medio del mecanismo propuesto. Para esto, se fabricó una probeta en PLA por medio de impresión 3D con las dimensiones obtenidas de la norma ASTM D412 (probeta halterio tipo C), con longitud total de 115 mm, ancho de la sección de interés de 6 mm y longitud de 33 mm, que se utilizó como guía para cortar las probetas de caucho de silicona de una lámina de 3 mm de espesor, como se muestra en la Figura 3. Por su parte, la Figura 4 muestra el entorno de impresión 3D.

A continuación, se programó la máquina de ensayos para garantizar una deformación sostenida en las probetas a tres dimensiones diferentes: 5 mm, 10 mm y 15 mm. Para cada una de las deformaciones se realizaron tres ensayos, con el objetivo de obtener las constantes de la relajación en el modelo de Maxwell de forma confiable. La Figura 5 enseña una probeta de silicona VMQ siendo probada en la máquina de ensayos.

Figura 2

Máquina Universal de Ensayos Landmark MTS



Nota. Referencia de la máquina universal de ensayos MTS utilizada en la definición del modelo de referencia. Tomado de: <https://www.mts.com/la/products/materials/dynamic-materials-test-systems/landmark-servo-hydraulic>

Figura 3

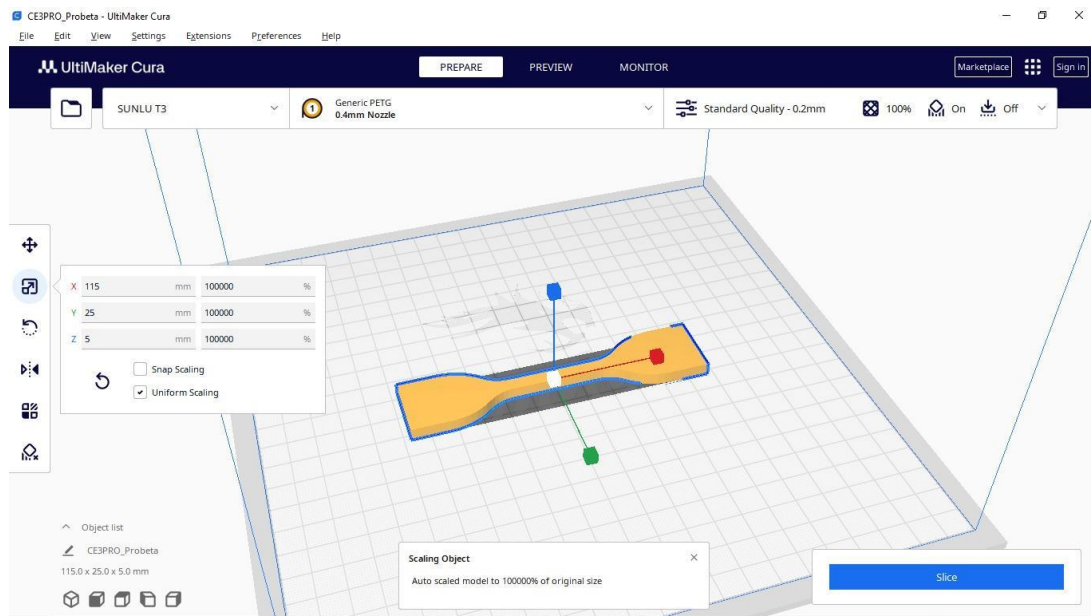
Probeta de PLA



Nota. Probeta de PLA impresa en 3D con las dimensiones entregadas por la norma ASTM D412, utilizada como guía para el corte de las probetas de la lámina de silicona VMQ. Fuente: autores.

Figura 4

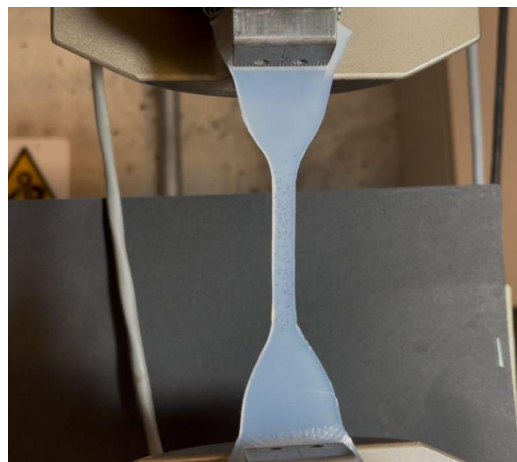
Software de impresión 3D



Nota. Software UltiMaker Cura para el proceso de impresión de la probeta guía. Fuente: autores.

Figura 5

Ensayo de relajación MTS



Nota. Probeta de silicona VMQ siendo deformada por la máquina de ensayos Landmark MTS. Fuente: autores.

2.3 Diseño y Construcción del Mecanismo

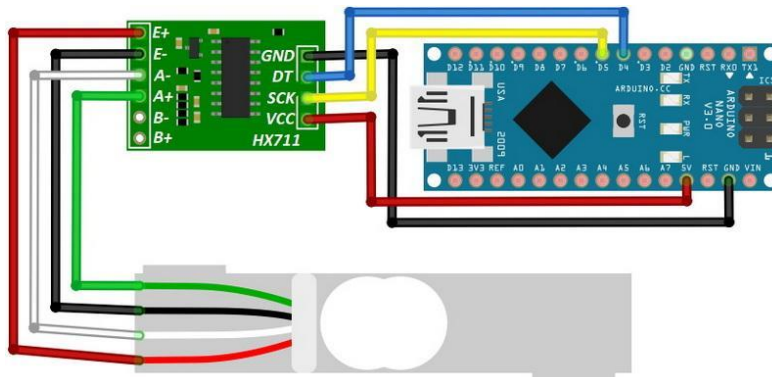
El mecanismo requerido para realizar los ensayos de relajación debe cumplir con una serie de requisitos para garantizar la deformación constante de las probetas. El primero de ellos fue que el movimiento de las probetas se diera de forma estrictamente vertical, ya que un movimiento horizontal generaría un cambio en el esfuerzo medido. Adicionalmente, la deformación a obtener debió ser regulable a los tres estiramientos seleccionados (5 mm, 10 mm y 15 mm). Sumado a esto, debió contar con mordazas que impidieran el deslizamiento de la probeta al ser estirada y una celda de carga capaz de determinar el esfuerzo a cualquier instante dado.

2.3.1 Medición de Carga

En primer lugar, se seleccionó el tipo de celda de carga a utilizar, ya que el mismo determinaría el montaje necesario para el resto del mecanismo. En este caso, se seleccionó una celda de carga tipo viga con carga máxima de 20 kg (ver Figura 6), gracias a su amplia disponibilidad en el mercado, capacidad de tomar datos para una carga de tensión, programabilidad e información para su correcto funcionamiento. Para la recolección de los datos, se escogió una placa de desarrollo Arduino Nano, que se encargó de transmitir la señal entre un computador y la celda de carga. En cuanto al módulo amplificador de señal, se utilizó un HX711. La Figura 7 enseña la conexión de la celda con la placa de desarrollo para la recolección de datos.

Figura 6*Celda de carga*

Nota. Celda de carga tipo viga con carga máxima de 20 kg. Fuente: autores.

Figura 7*Conexión de la celda de carga*

Nota. Esquema de conexión de la celda de carga para la toma de datos. Tomado de:

<https://www.fibossensor.com/es/how-to-wire-a-load-cell.html>

2.3.2 Marco del Mecanismo

Una vez seleccionada la celda de carga, se dimensionó el marco en el que se instaló el mecanismo, considerando las medidas de esta. Para escoger el grosor de la tubería, que por efectos prácticos se asumió cuadrada, se tuvo en cuenta la ubicación de los tornillos de ajuste de la celda,

cuya distancia entre centros fue de 15 mm. Para esto, una tubería cuadrada de 1 pulgada dio el espacio suficiente para perforar los huecos de 4 mm con los que se aprisionó la celda contra el marco. Del otro lado de la celda, fue necesario ubicar el centro entre los huecos de ajuste para marcar la ubicación de una barra horizontal en la parte inferior del mecanismo, que sirvió como soporte para la base móvil, y los rieles que dirigieron su movimiento. En cuanto al resto del marco, se procuró dejar espacio para ubicar el trípode con el que se tomaron los videos. Adicionalmente, la altura se determinó de tal manera que la base móvil pudiese tener un desplazamiento hasta de 20 mm, que la probeta quedase sin deformar entre el soporte ubicado en la celda de carga y la posición más alta de la mordaza inferior.

En este caso, un marco cúbico de 300 mm de lado cumplió con las características necesarias y fue fabricado con una tubería cuadrada de 1 pulgada en acero, con soldadura 3/32". La Figura 8 muestra el resultado final de la construcción del marco, con los resortes y la varilla roscada del sistema de desplazamiento. Por su parte, la Figura 9 muestra la vista superior del marco con la celda de carga instalada, evidenciando la posición centrada y el ajuste de los huecos perforados para garantizar su montaje para la toma de datos.

Figura 8

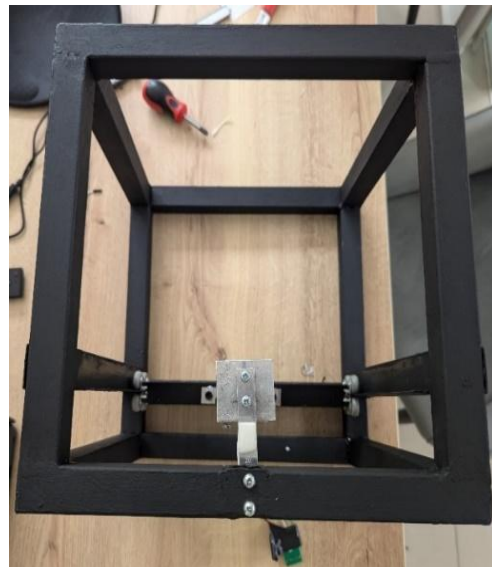
Marco del mecanismo



Nota. Marco construido para el montaje del mecanismo del ensayo de relajación. Fuente: autores.

Figura 9

Montaje de la celda de carga



Nota. Montaje de la celda de carga centrada en el marco. Fuente: autores.

2.3.3 Aprisionamiento de las Probetas

En el desarrollo de las mordazas se optó por fabricar dos pares de piezas rectangulares en aluminio, ubicando un par en la parte superior y el otro en la parte inferior de las probetas, utilizándolas para aprisionarla y ajustándolas entre ellas por medio de un tornillo y una tuerca. Las piezas contaron con un espesor de 6 mm, un ancho de 40 mm y una altura de 15 mm. A ello se le sumaron dos huecos de 4 mm de diámetro donde se ubicaron los tornillos de ajuste, cuya distancia entre centros fue de 30 mm, con ambas perforaciones simétricas con respecto al centro de la arista de 40 mm y centrados con respecto a la de 15 mm. Las dimensiones fueron determinadas considerando el tamaño de la zona de sujeción de la probeta tipo C de la norma ASTM D412, con un énfasis especial en la distancia entre los tornillos para no hacer interferencia con el ancho de la probeta (25 mm). La Figura 10 presenta las mordazas fabricadas, mientras que la Figura 11 muestra su montaje a la celda de carga.

Figura 10

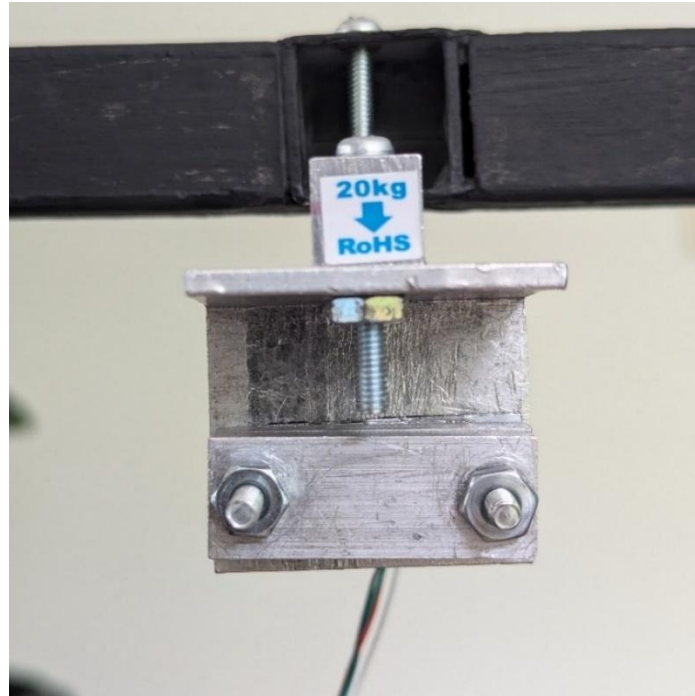
Mordazas



Nota. Mordazas fabricadas en aluminio para aprisionar las probetas. Fuente: autores.

Figura 11

Montaje de las mordazas



Nota. Montaje de las mordazas a la celda de carga por medio de un ángulo fabricado en aluminio.
Fuente: autores.

2.3.4 Sistema de Desplazamiento

Para el sistema de desplazamiento, se ubicó una base móvil en la parte inferior de la probeta, capaz de sostener el par de mordazas de manera firme, para garantizar que el desplazamiento modificara únicamente la deformación de la probeta. Para conseguirlo, también fue necesario considerar un par de rieles que guiasen el movimiento de la base móvil de manera vertical, con un deslizamiento suave para no generar fricción entre los componentes del sistema y facilitar la graduación de la altura. En este caso, se utilizaron dos juegos de ruedas instaladas a presión en cada lado de la base contra una lámina vertical, garantizando el ajuste necesario para

impedir el ladeo de la base. En la Figura 12 se puede observar el resultado final de la base móvil, con el montaje de las mordazas inferiores y las ruedas guía.

Figura 12

Base móvil

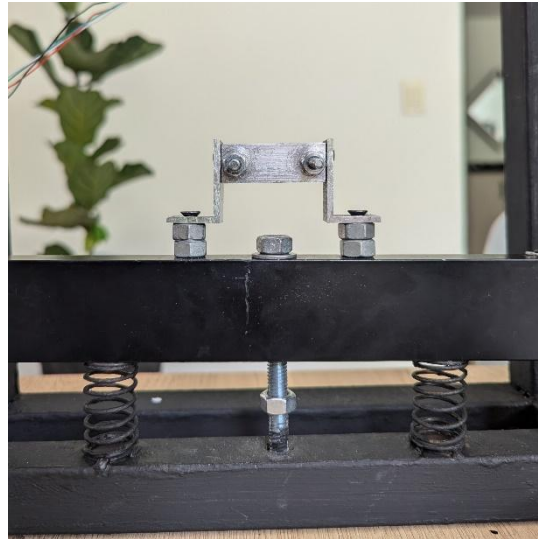


Nota. Base móvil fabricada en aluminio, con la instalación de las mordazas inferiores y los juegos de ruedas que van ajustadas a los rieles.

Para ajustar el desplazamiento, se utilizó una varilla roscada con una tuerca a cada lado de la base, con el objetivo de fijar los desplazamientos. En cuanto a la tuerca superior, fue utilizada como soporte para sostener el desplazamiento de la base a través del tiempo en la deformación requerida, mientras que la inferior fue la encargada de determinar el desplazamiento. En medio de la construcción, se encontró la necesidad de agregar un par de resortes a la parte inferior de la base móvil para garantizar que se mantuviera unida a la rosca superior en todo momento, permitiendo iniciar cada prueba sin esfuerzos adicionales para la probeta y que el desplazamiento arrancase siempre con la probeta sin deformar. La Figura 13 presenta el montaje de la base móvil sobre los rieles.

Figura 13

Base móvil instalada



Nota. Base móvil montada sobre los rieles en su posición superior, con la varilla roscada en medio y los resortes asegurando el ajuste a la tuerca superior. Fuente: autores.

2.4 Ensayos con el Mecanismo y Captura de Imágenes

Con el mecanismo propuesto el primer paso fue agregar marcas aleatorias de pintura a la sección de interés de las probetas cortadas en la primera etapa de la metodología para que el software NCORR tomara los puntos como referencia y siguiera sus desplazamientos a través del tiempo. En la Figura 14 se muestra un ejemplo de las marcas generadas en las probetas. Adicionalmente, se ubicó un fondo negro para generar contraste con la probeta.

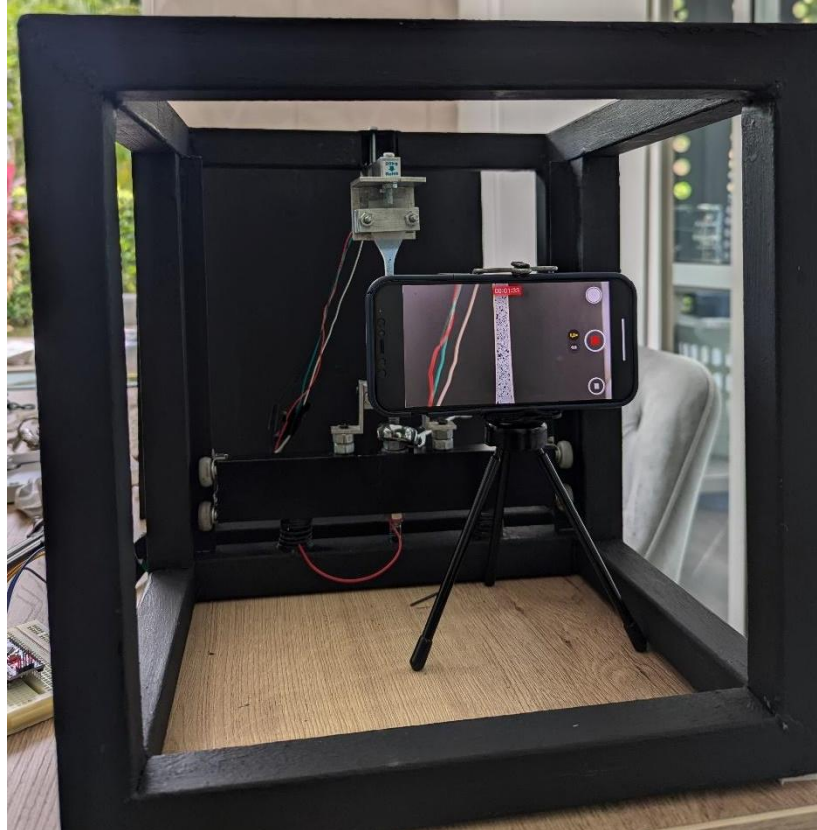
Figura 14

Probeta para análisis DIC



Nota. Probeta con marcas aleatorias utilizada para realizar los ensayos de relajación con la metodología propuesta. Fuente: autores.

El siguiente paso en el proceso de toma de datos fue calibrar la celda de carga para tomar la fuerza ejercida por la probeta al ser estirada. Para esto, se utilizó la función de tarar a través de la placa de desarrollo y, posteriormente, la función de calibrar, en la que se ubicó una masa conocida en las mordazas y por medio del código se obtuvo el factor de escala. Después de tener la celda de carga calibrada, se estableció el primer desplazamiento por medio del juego de tuercas y se ubicó la primera probeta en las mordazas. Para la toma de las imágenes, se ubicó un celular iPhone 12, cuya cámara es de 12 megapíxeles, en un trípode de forma paralela a la probeta, con el fin de captar los movimientos en la zona de interés mientras se produjo la relajación, como se muestra en la Figura 15. La grabación se realizó a 30 frames por segundo, con una calidad de 1080p.

Figura 15*Toma de datos*

Nota. Toma de datos del mecanismo para una deformación de 15 mm. Fuente: autores.

El primer ensayo realizado fue el del estiramiento de la probeta a 15 mm y fue repetido dos veces más, proceso que también se llevó a cabo con las deformaciones de 5 mm y 10 mm. Durante cada uno de los ensayos, la acción inicial fue cambiar la probeta y tarar la celda, con el objetivo de que empezara a tomar únicamente los valores de fuerza producidos por la deformación. Posteriormente, se realizaron los estiramientos, se fijaron para sostenerlos a través del tiempo y se grabó el área de interés. Los valores de fuerza a través del tiempo, por su parte, se obtuvieron a través del monitor serial y fueron recopilados cada 1.3 segundos, aproximadamente.

2.5 Implementación del software NCORR v1.2

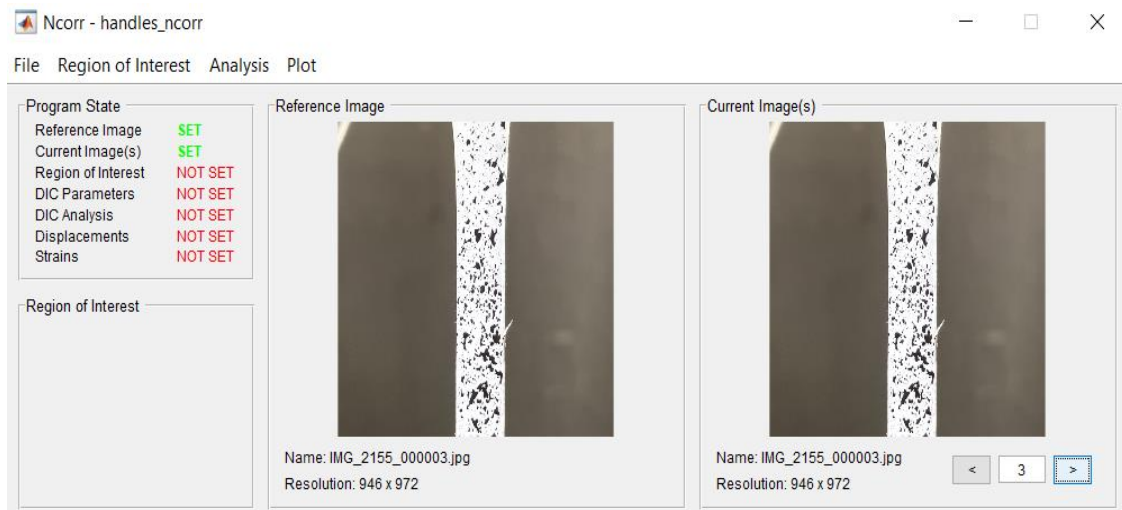
2.5.1 Configuración y Proceso de Análisis en NCORR

De la recopilación audiovisual obtenida del ensayo de relajación con el mecanismo experimental se realizó una tasa de captura de una imagen cada dos segundos durante sesenta segundos. A partir de esto se realizó el análisis de deformaciones.

Se seleccionó una imagen de referencia mostrada en la Figura 16 que refleja el estado inicial del sistema y un conjunto de imágenes del ensayo durante la relajación.

Figura 16

Interfaz procesamiento NCORR

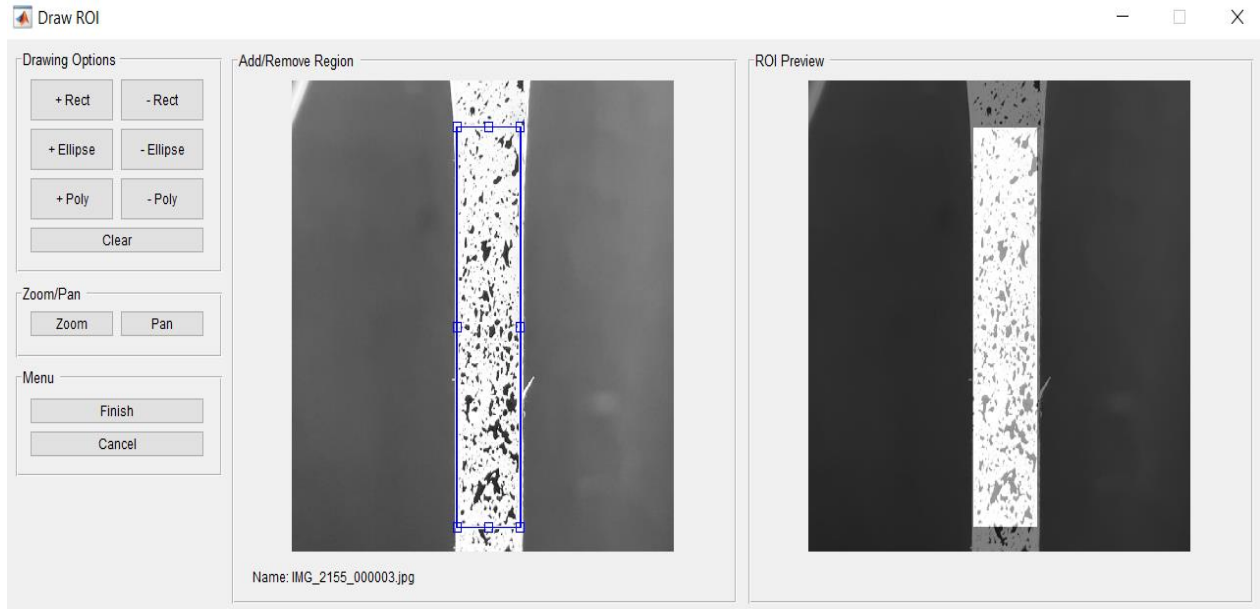


Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

Se definieron los parámetros del sistema: la Región de Interés (ROI) que define el marco de enfoque del software en las imágenes a seguir, como se presenta en la Figura 17.

Figura 17

Interfaz de selección de ROI en el entorno NCORR



Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

Se configuran los siguientes parámetros en la interfaz mostrada en la Figura 18:

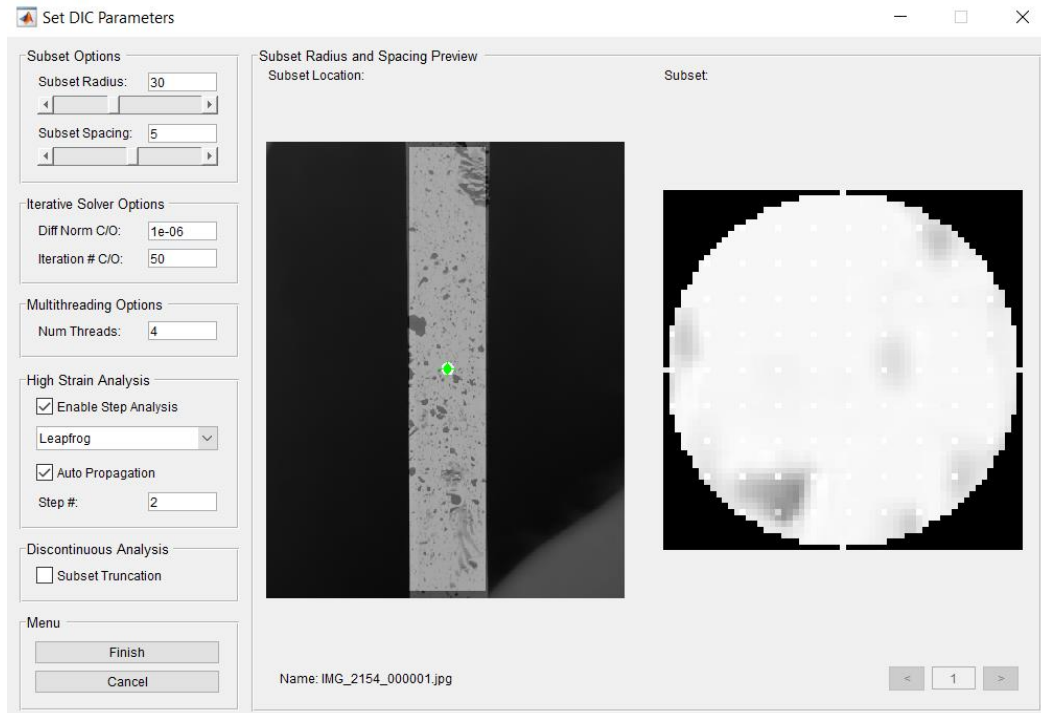
El radio del subconjunto, en el que se configura el tamaño del área utilizada para correlacionar cada punto en la imagen.

La distancia entre subconjuntos, por el cual se define la resolución espacial del análisis.

El método de interpolación, en donde se controla la precisión en el seguimiento de desplazamientos, configurando el número de iteraciones y valor de convergencia.

Figura 18

Interfaz de definición de resolución y mallado en el entorno NCORR



Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

Una vez ejecutado el análisis el NCORR calculó los campos de desplazamiento y deformación de la probeta en cada instante de tiempo.

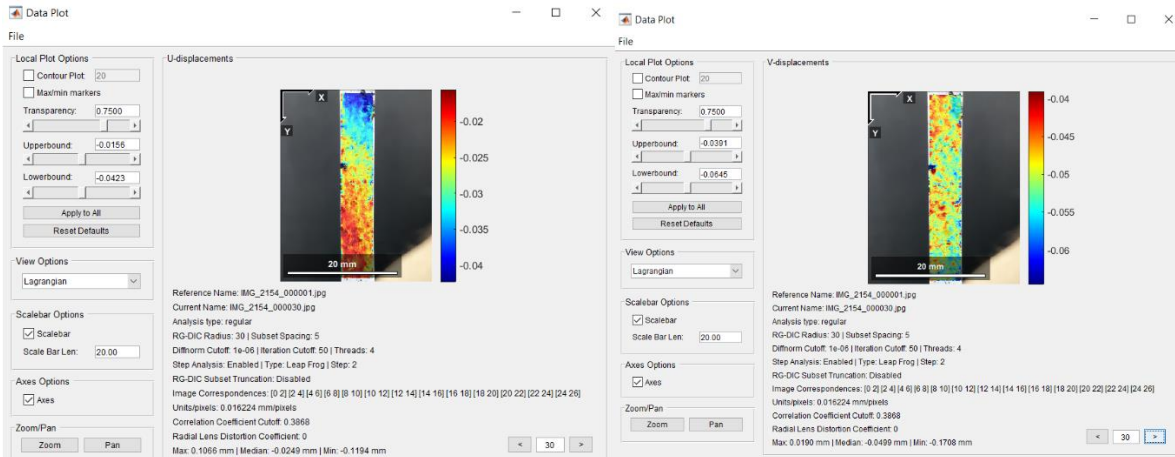
2.5.2 Generación y Visualización de Resultados

Los resultados generados a partir del procesamiento en NCORR incluyen:

1. Campos de desplazamiento: Representan los movimientos locales en la superficie de la probeta. (ver Figura 19)

Figura 19

Visualizador de gráficas de datos de desplazamientos entre imágenes entorno NCORR

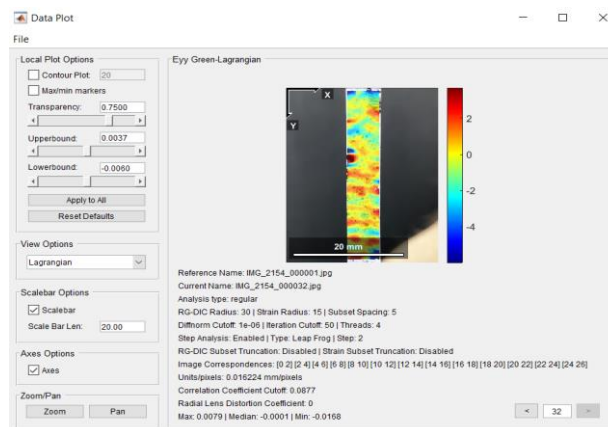


Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

2. Campos de deformación: Permiten analizar la respuesta mecánica del material durante la relajación. (ver Figura 20)

Figura 20

Visualizador de gráficas de datos de deformaciones entre imágenes entorno NCORR



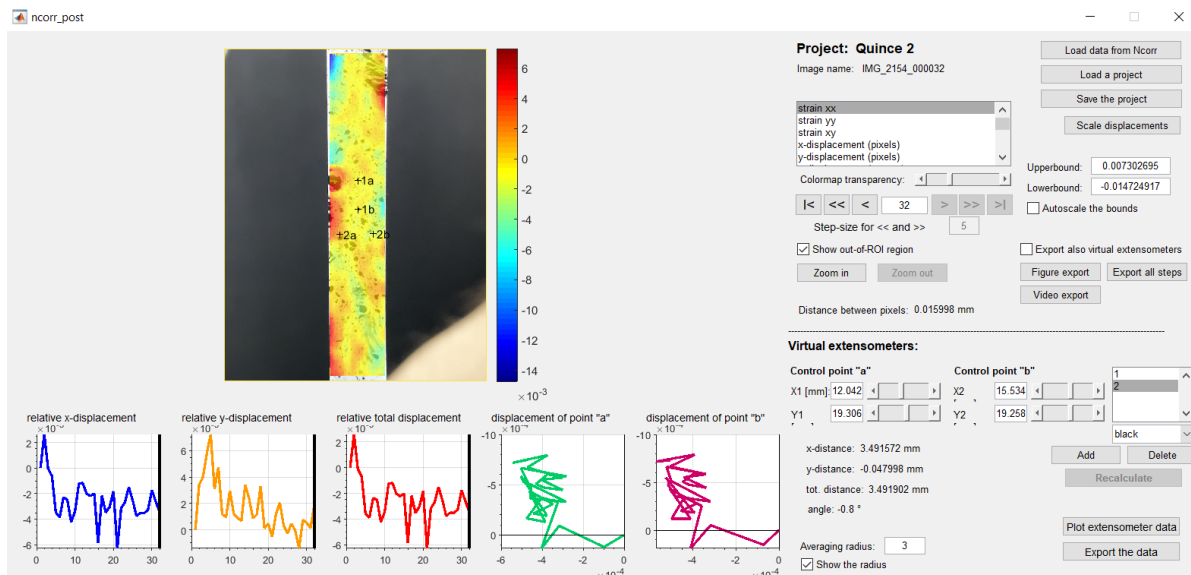
Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

- Validación de datos: Se filtran valores inconsistentes para aumentar la precisión de los resultados.

Se realizó un proceso de post procesamiento y filtrado de datos con el fin de obtener información con calidad (Nežerka et al., 2016). A partir del uso de extensómetros virtuales, se determinaron desplazamientos unitarios en las direcciones x e y, lo que permitió evaluar el impacto en el modelo de relajación. (ver Figura 21)

Figura 21

Interfaz de extensión de posprocesamiento entorno NCORR



Nota. Tomado en el momento del procesamiento de la prueba 3, desplazamiento 15 mm. Fuente: autores.

2.6 Ajuste por Medio de Inferencia Bayesiana

2.6.1 Inferencia Bayesiana

Es un método que toma datos experimentales para actualizar la probabilidad de los parámetros de un modelo. Se realizó el uso de Inferencia Bayesiana como método estadístico para

estimar dichos parámetros con un intervalo de confianza dado que la toma de datos implica variabilidad e incertidumbre en la medición. De esta manera, se realiza un ajuste en el comportamiento de la curva.

Para caracterizar el comportamiento viscoelástico del material analizado, se ajustaron los parámetros de esfuerzo inicial (σ_0) y tiempo de relajación (τ) del modelo de Maxwell a partir de los datos obtenidos en los ensayos de relajación de esfuerzos. El proceso de ajuste se realizó sobre los conjuntos de datos de esfuerzo y tiempo obtenidos de los ensayos realizados en la MTS que representa un modelo de relajación confiable, y los realizados con el mecanismo experimental, con el fin de evaluar su desempeño en comparación con la MTS.

2.6.2 Procesamiento de datos

Se realizó un filtrado y preprocesamiento en el cual se eliminaron valores atípicos, y en el caso de los datos de la MTS se aplicó un suavizado para reducir el ruido en la señal. Se utilizó el método de media móvil cada 120 datos para conseguirlo.

Se seleccionó una región óptima de ajuste en el que el intervalo de tiempo arrojaba una relajación que se comportaba de acuerdo con el modelo esperado, para ello se ajustó a 60 segundos de tiempo de relajación.

2.6.3 Definición e Implementación del modelo Bayesiano

Para la estimación de Sigma inicial (σ_0) y Tau (τ) se usó un modelo probabilístico Bayesiano con distribuciones previas formadas por los datos experimentales y un ajuste mediante muestreo Monte Carlo vía Cadenas de Markov (MCMC).

El ajuste se llevó a cabo por medio de Python, usando la librería PyMC3/PyMC para la inferencia Bayesiana. Se establecieron las siguientes condiciones iniciales:

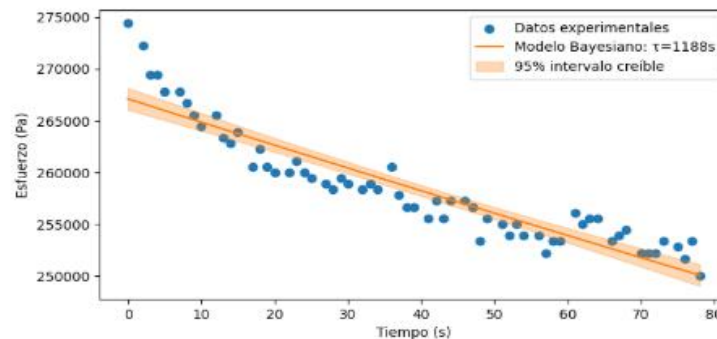
1. Se modeló con una distribución normal centrada en el valor medio de los datos de esfuerzo.
2. Se utilizó una distribución log-normal para garantizar que los valores estimados fueran siempre positivos.
3. Se asumió una distribución normal con desviación estándar ajustada a partir de la variabilidad de los datos.

Se obtuvieron los valores más probables junto con un intervalo de credibilidad del 95% HDI (Intervalo de Máxima Densidad), se usó para indicar el rango donde se encuentran los valores más factibles del parámetro estimado con una determinada probabilidad para aumentar la confiabilidad. A diferencia del intervalo de confianza clásico, el HDI refleja la probabilidad directa de encontrar el parámetro en un rango determinado. (*Bayesian Inference in Statistical Analysis - George E. P. Box, George C. Tiao - Google Books, n.d.*)

Inferencia Bayesiana (HDI 95%) indica, finalmente que hay un 95% de probabilidad de que el parámetro esté dentro de este intervalo.

Figura 22

Gráfica Esfuerzo vs Tiempo ajustado al Modelo de Maxwell mediante Inferencia Bayesiana



Nota. Gráfica elaborada a partir de los datos tomados del mecanismo experimental. Fuente: autores.

2.7 Comparación de Modelos de Maxwell: MTS vs. Mecanismo Experimental

Para validar el alcance del mecanismo experimental como alternativa para el análisis y caracterización de materiales viscoelásticos, se compararon los parámetros obtenidos de la relajación de ambos modelos. En particular, se analizaron los valores de Sigma inicial y Tau, obtenidos mediante Inferencia Bayesiana en cada uno de los ensayos.

Se recopilaron los valores de los parámetros a comparar tanto de la MTS como del mecanismo experimental, se utilizaron los calores de media y los intervalos de credibilidad del 95% HDI para evaluar la variabilidad de cada método.

Se realizó un análisis estadístico en el que se representaron los datos en gráficos de dispersión con barras de error.

Se evaluaron las diferencias en los valores obtenidos para determinar en qué condiciones el mecanismo experimental puede reemplazar a la MTS.

3. Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de relajación realizados con la máquina de ensayos Landmark MTS y con el mecanismo experimental. Se comparan los valores de Sigma inicial y la constante Tau obtenidos mediante Inferencia Bayesiana, los cuales sirvieron para caracterizar el modelo de Maxwell para la relajación del material y predecir su comportamiento.

3.1 Ajuste del Modelo de Maxwell

En primer lugar, se obtuvo el ajuste de los valores de esfuerzo a través del tiempo entregados por la Landmark MTS para los tres desplazamientos y el modelo obtenido para cada una de las deformaciones fue consignado en la Tabla 1. Entre ellos, el valor del esfuerzo (Sigma inicial) alcanzado al llegar al desplazamiento establecido tuvo la tendencia esperada, teniendo su

valor mínimo para la deformación de 5 mm y el máximo para la de 15 mm. Al superponer los ensayos entre ellos, se obtuvo un modelo similar para las tres deformaciones, con valores de Tau que se ubican en un rango entre 1075.34 s y 1171.24 s al aplicar un intervalo de confianza del 95% utilizando el método de inferencia bayesiana. En la Figura 23 se presenta el modelo de Maxwell de referencia final obtenido por medio de la MTS para cada una de las deformaciones propuestas, con su intervalo de confianza.

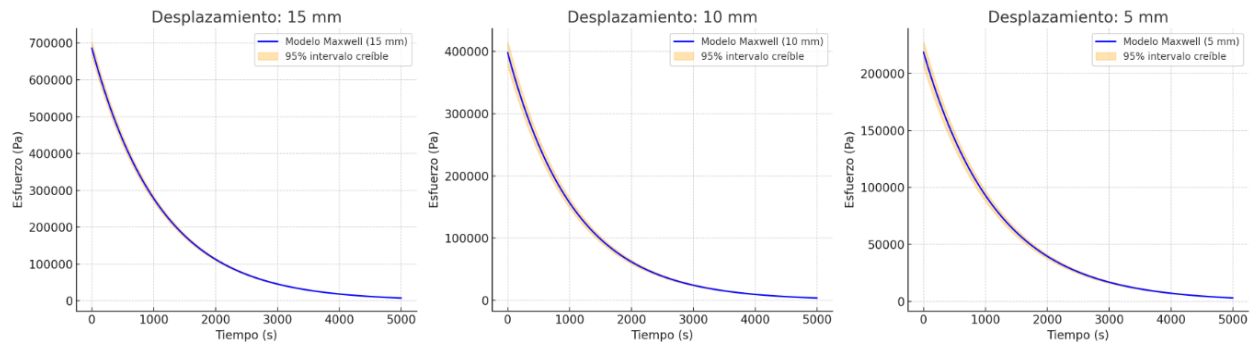
Tabla 1

Modelo de Maxwell: MTS

Deformación	Esfuerzo inicial (Pa)	Tau (s)
5 mm	218613.69 (95% HDI [206324.37, 228365.29])	Tau: 1171.24 (95% HDI [1122.64, 1270.43])
10 mm	397695.79 (95% HDI [376581.84, 416402.32])	1075.34 (95% HDI [965.72, 1180.64])
15 mm	685928.42 (95% HDI: [663839.35, 705095.41])	1106.69 (95% HDI: [990.94, 1223.36])

Nota. Constantes del modelo de Maxwell obtenidas por medio de la inferencia bayesiana superponiendo los ensayos realizados a cada deformación seleccionada. Fuente: autores.

Después de obtener el modelo de referencia, se realizó el mismo proceso con los datos obtenidos por medio del mecanismo y se documentaron en la Tabla 2. Por su parte, la Figura 24 presenta las gráficas del modelo de Maxwell para las tres deformaciones.

Figura 23*Modelo de Maxwell MTS*

Nota. Las gráficas presentadas muestran el modelo de Maxwell obtenido para el material a través de los datos entregados por la MTS a las tres deformaciones consideradas, junto con el intervalo de confianza del modelo. Fuente: autores.

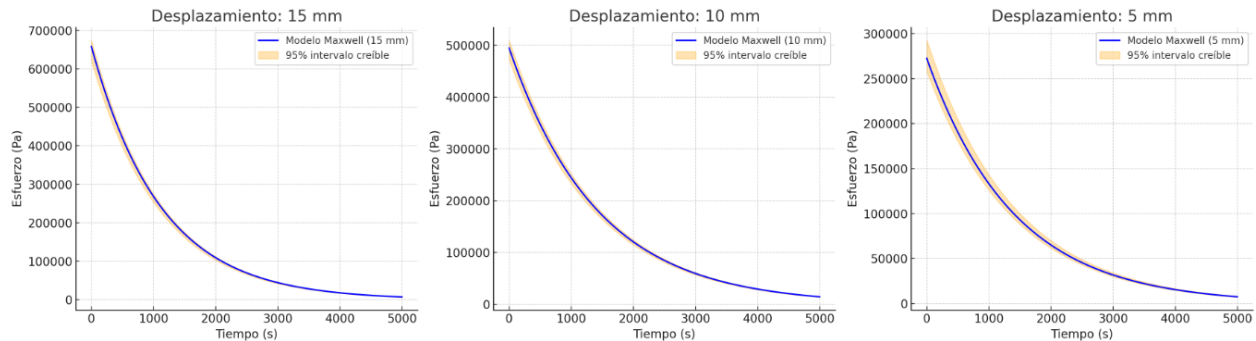
Tabla 2*Modelo de Maxwell: mecanismo.*

Deformación	Esfuerzo inicial (Pa)	Tau (s)
5 mm	272435.24 (95% HDI: [258014.15, 292818.79])	1397.06 (95% HDI: [1289.58, 1489.74])
10 mm	495175.66 (95% HDI: [472659.60, 510330.21])	1416.82 (95% HDI: [1322.63, 1574.11])
15 mm	658025.83 (95% HDI: [621014.99, 674804.07])	1115.27 (95% HDI: [1012.65, 1213.59])

Nota. Modelo de Maxwell obtenido por medio del mecanismo diseñado con un intervalo de confianza del 95%. Fuente: autores.

Figura 24

Modelo de Maxwell: mecanismo



Nota. Gráficas del modelo de Maxwell obtenido para cada una de las deformaciones propuestas por medio del mecanismo diseñado. Fuente: autores.

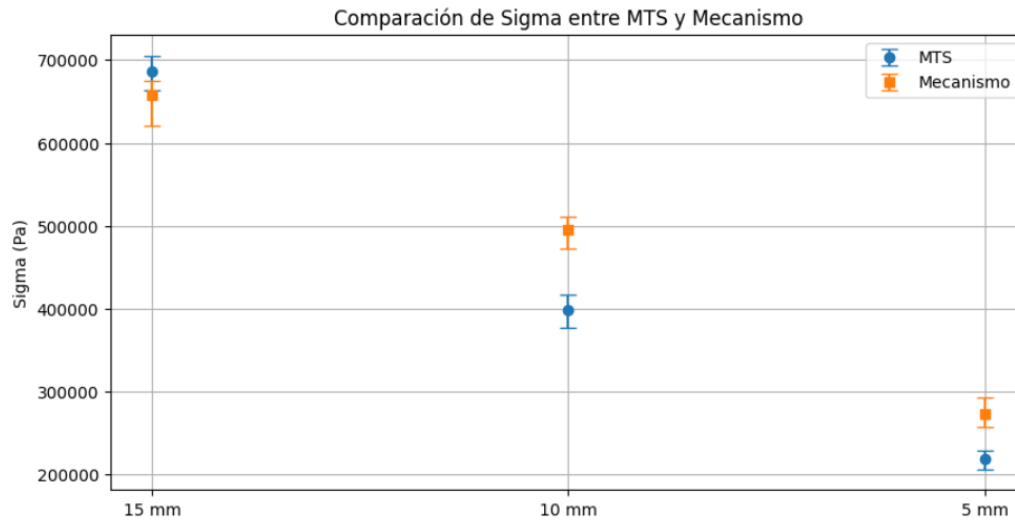
3.2 Validación del modelo

Los rangos del Tau para el modelo de referencia, obtenidos por medio de la Landmark MTS, de las deformaciones de 5 mm, 10 mm y 15 mm se cruzaron entre ellos, dando certeza sobre las características de la relajación del material. Adicionalmente, el esfuerzo inicial presentó la tendencia ascendente esperada, siendo mayor al aumentar la deformación.

Por medio del mecanismo también se encontró la tendencia ascendente esperada para el esfuerzo inicial obtenido a cada una de las deformaciones planteadas, pero su rango no se ajustó al modelo de referencia para las pruebas de 5 mm y 10 mm. Por parte del Tau, fue superior al del modelo de referencia para las pruebas de 5 mm y 10 mm, con un rango para intervalo de confianza que no se cruzó con el del modelo de referencia. En cuanto al ensayo de 15 mm, tanto el Tau como el Sigma coincidieron con el modelo de referencia. La Figura 24 muestra el ajuste del Sigma entre modelos, mientras que la Figura 25 presenta el del Tau.

Figura 25

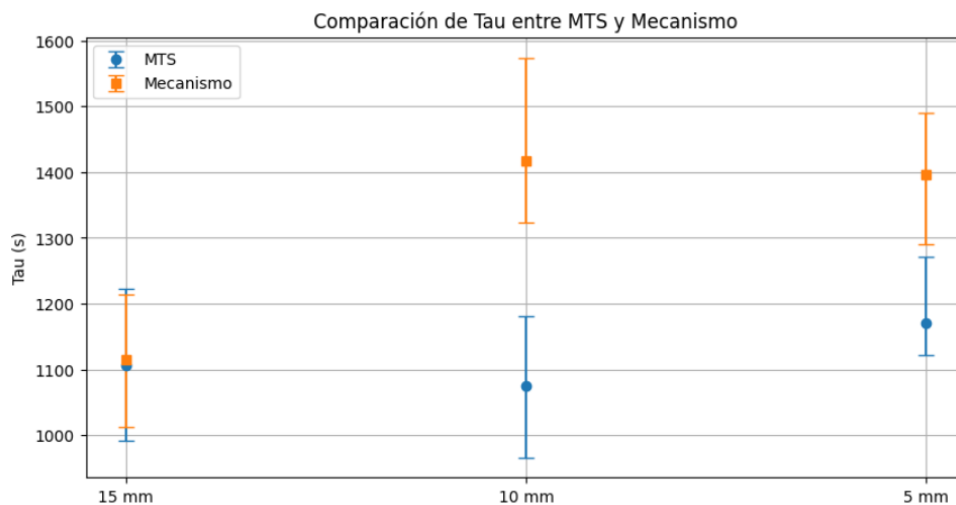
Ajuste del esfuerzo entre el modelo de referencia y el mecanismo experimental



Nota. Comparativa entre el rango de datos obtenidos para el esfuerzo inicial en cada una de las deformaciones. Fuente: autores.

Figura 26

Ajuste del Tau entre el modelo de referencia y el mecanismo experimental



Nota. Comparativa entre el rango de datos obtenidos para el Tau en cada una de las deformaciones.

Fuente: autores.

3.3 Cálculo de Poisson por medio de NCORR

El cálculo del coeficiente de Poisson se realizó utilizando las deformaciones unitarias en los ejes x y y obtenidas a través del software NCORR v1.2 por medio de dos extensómetros virtuales. Posteriormente al aplicar Inferencia Bayesiana para estimar el coeficiente de Poisson con un intervalo de credibilidad del 95% como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Valor hallado del coeficiente de Poisson a partir de Inferencia Bayesiana

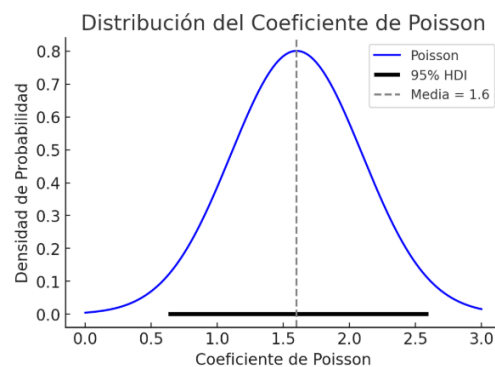
	Valor medio	Intervalo de credibilidad del 95% HDI
Poisson	1.573	[0.63, 2.573]

Nota. Coeficiente de Poisson obtenido por medio de correlación de imágenes con un intervalo de confianza del 95%. Fuente: autores.

La muestra la distribución obtenida para el coeficiente de Poisson. Se observa que la media se encuentra en 1.573, con un rango de incertidumbre adecuado para presentar la variabilidad en los datos obtenidos de las pruebas en correlación de imágenes.

Figura 27

Gráfica de distribución del Coeficiente de Poisson a partir de Inferencia Bayesiana



Nota. Distribución del Coeficiente de Poisson obtenido por medio de correlación de imágenes con un intervalo de confianza del 95%. Fuente: autores.

4. Conclusiones

La metodología planteada permitió caracterizar las propiedades mecánicas de la relajación de la silicona VMQ, entregando información suficiente para determinar las constantes del modelo de Maxwell de forma aproximada.

La máquina Landmark MTS entregó un modelo de referencia para evaluar la precisión del mecanismo desarrollado que se corroboró para las tres deformaciones gracias al ajuste por medio del método de inferencia bayesiana, obteniendo un rango de confiabilidad para cada uno de ellos. Adicionalmente, el rango del valor obtenido para el Tau se cruzó para los tres intervalos de confianza hallados (para cada deformación), asegurando la caracterización aproximada del material.

Por su parte, el mecanismo desarrollado permitió realizar el ensayo de relajación propuesto, gracias a que consiguió garantizar un desplazamiento sostenido a través del tiempo y medir la fuerza ejercida sobre la probeta para mantenerlo. También se consiguió que fuese regulable a diversos valores de deformación, que no se limitaron a los utilizados durante el proyecto de investigación. Sin embargo, presenta oportunidades de mejora en cuanto a su funcionamiento y precisión, entre las que se incluyen las técnicas de manufactura con las que se fabricó, la precisión de la celda de carga seleccionada y la implementación de sistemas mecánicos que consigan realizar la deformación sin accionamiento manual.

El uso del software (NCORR v1.2) permitió obtener campos de desplazamiento y deformación unitarios, lo que generó la obtención del cálculo del coeficiente de Poisson y permitió validar la hipótesis de que los desplazamientos a nivel local durante la relajación eran despreciables en la escala de la medición de esfuerzos.

En cuanto al ajuste del modelo de Maxwell, el método de Inferencia Bayesiana permitió generar valores confiables en las constantes de esfuerzo inicial y tiempo de relajación para cada prueba, estableciendo un rango de incertidumbre adecuado. Se observó que el modelo obtenido el mecanismo coincide en mayor medida con el de la MTS para deformaciones de 15 mm, mientras que para 5mm y 10 mm no hubo coincidencia. Esto puede deberse a una menor estabilidad en la medición de esfuerzos a deformaciones pequeñas o limitaciones en la sensibilidad del sistema al adquirir datos.

Se identificó que los desplazamientos retardados afectan la relajación del material, generando consecuencias en la precisión de los datos obtenidos. Para mitigar dicho efecto, los ensayos deben realizarse asegurando que los desplazamientos se realicen de manera rápida e inmediata, minimizando la pérdida de información durante el proceso de relajación.

A pesar de dichas limitaciones, se confirma la factibilidad de la metodología propuesta como una alternativa viable para la caracterización de materiales viscoelásticos, lo que representa una contribución significativa para aplicaciones experimentales en el campo.

5. Recomendaciones

Para futuros trabajos en la caracterización de materiales viscoelásticos, se recomienda trabajar con una frecuencia de toma de datos en la MTS de entre 2 y 5 datos por segundo, ya que una frecuencia alta puede generar un ruido significativo a la hora de realizar un modelo de referencia. Adicionalmente, se recomienda el uso de sensores de nivel en el mecanismo propio para garantizar la estabilidad de la probeta.

Como ideas para futuras investigaciones, se propone realizar ensayos con duraciones más prolongadas (días) para evaluar la estabilidad de los modelos de relajación y observar si los valores

de Tau presentan variaciones a largo plazo. También se podría adaptar el mecanismo para realizar ensayos tipo creep, evaluando la deformación en función del tiempo ante un esfuerzo constante, donde el uso del software de correlación de imágenes podría contribuir en mayor medida en esta caracterización mediante la medición continua de los desplazamientos.

Referencias Bibliográficas

- Alfrey, T., & Doty, P. (1945). The methods of specifying the properties of viscoelastic materials. *Journal of Applied Physics*, 16(11), 700–713. <https://doi.org/10.1063/1.1707524>
- Amador-González, E., et al. (2021). Medición y obtención de modelo de fluencia lenta en elastómeros. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 108-113.
- Camargo, N. (2022). Caracterización dinámica de materiales viscoelásticos para usos en sistemas de amortiguación pasiva [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
- Bayesian Inference in Statistical Analysis - George E. P. Box, George C. Tiao - Google Books*. (n.d.). Retrieved March 18, 2025, from https://books.google.com.co/books?hl=en&lr=lang_en&id=T8Askeyk1k4C&oi=fnd&pg=PR11&dq=bayesian+inference&ots=jWMZoZdWV2&sig=_KWRAE-7XYEgE-gBt4kHbZEi010&redir_esc=y#v=onepage&q=bayesian%20inference&f=false
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105–1122. <https://doi.org/10.1007/S11340-015-0009-1/FIGURES/14>
- Chu, T. C., Ranson, W. F., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3), 232–244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>
- Elmoghazy, Y. H., et al. (2024). Computational modelling and analysis of effect of viscoelastic materials on damping and vibrational behaviors of composite structures—An extensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-52.

- Fujii, Y., & Yamaguchi, T. (2005). Proposal for material viscoelasticity evaluation method under impact load. *Journal of Materials Science*, 40(18), 4785–4790.
<https://doi.org/10.1007/S10853-005-2004-X>
- Lakes, R. (2009). *Viscoelastic materials*. Cambridge University Press.
- Meneses, S., & Chacón, N. (2022). Análisis de la respuesta dinámica de un material viscoelástico TPU impreso 3D para diferentes llenados hexaédricos [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
- Nežerka, V., Antoš, J., Litoš, J., Tesárek, P., & Zeman, J. (2016). An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading. *Construction and Building Materials*, 114, 913–924.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.013>
- Pei, P., et al. (2024). Novel hyper-viscoelastic approach to modelling elastomer mechanic behaviour with relaxation spectrum. *Polymer Testing*, 133, 108375.
- Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis. *https://doi.org/10.1117/12.7972925*, 21(3), 427–431.
<https://doi.org/10.1117/12.7972925>
- Schapery, R. A. (1969). On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. *Polymer Engineering & Science*, 9(4), 295–310. <https://doi.org/10.1002/PEN.760090410>
- Shu, Z., You, R., & Zhou, Y. (2022). Viscoelastic materials for structural dampers: A review. *Construction and Building Materials*, 342, 127955.
- Silicona (VMQ). (s/f). Recuperado de <https://www.elaplas.es/materiales/cauchos-y-elastomeros/silicona-vmq/>

- Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H. W., & Reu, P. (2012). Introduction to digital image correlation: Best practices and applications. *Experimental Techniques*, 36(1), 3–4.
<https://doi.org/10.1111/J.1747-1567.2011.00798.X>
- Zhou, X. Q., et al. (2016). Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A review. *Composite Structures*, 136, 460-480.

Apéndices

Apéndice A

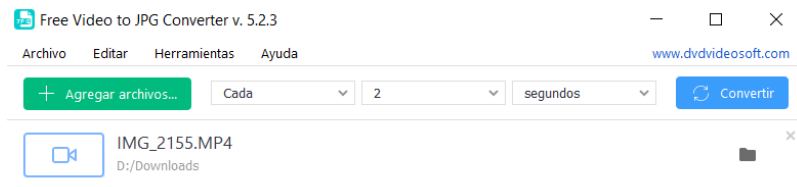
Implementación del software NCORR v1.2

1. Extracción de imágenes

Inicialmente se debe realizar la extracción de imágenes a partir del material audiovisual recopilado en los ensayos de relajación obtenido del mecanismo experimental.

Figura A1

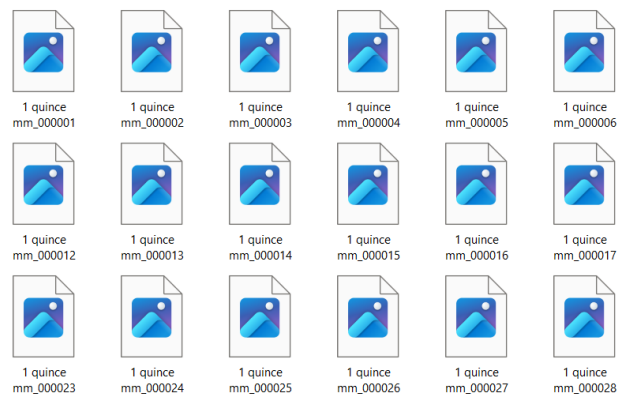
Extracción de imágenes



Se generaron grupos de imágenes, por ensayo realizado se tomó un número de 32 datos aproximadamente, ya que se tomaron imágenes cada dos segundos.

Figura A2

Imágenes separadas por fotograma



Se debió reprogramar el código de escalamiento de la región de interés debido a problemas en la selección de distancias con el siguiente código:

2. Código de interfaz y sistema de escalamiento NCORR posprocesamiento

```
function [X,Y,BUTTON,SCALEMAT] = ginput2(varargin)

%GINPUT2 Graphical input from mouse with zoom, pan, plot and scaling.

% INPUTS CHECK-IN

% -----

% PARAMETERS

X    = [];

Y    = [];

BUTTON = [];

SCALEMAT = [];

N    = Inf;

DoScale = false;

PlotOpt = {'none'};

UnZoom = 'UnZoom';

% Constants KEYS

DOUBLECLICK = 0;

LEFTCLICK   = 1;

MIDDLECLICK = 2;
```

```
RIGHTCLICK = 3;
```

```
BACKSPACE = 8;
```

```
ESCAPE = 27;
```

```
SPACEBAR = 32;
```

```
DELETE = 127;
```

```
SELECTS = [RIGHTCLICK SPACEBAR];
```

```
DELETES = BACKSPACE;
```

```
FINISHES = [];
```

```
ZOOMIN = LEFTCLICK;
```

```
ZOOMRESET = MIDDLECLICK;
```

```
ZOOMOUT = DOUBLECLICK;
```

```
% Comentando el bloque problemático según la sugerencia del desarrollador
```

```
% % Centers the selected point if ZOOM-IN: 29 SEP,2008
```

```
% % if all((lim~=zlim))
```

```
% % lim = [x+diff(lim(1:2))/2*[-1 1] y+diff(lim(3:4))/2*[-1 1]];
```

```
% % axis(lim)
```

```
% % end
```

```
cont = 0;
```

```
while cont<N
```

```
    [x,y,button] = ginput(1);
```

```
ha = gca;

if isempty(button) || ismember(button,FINISHES)

    break

end

if ismember(button,DELETES)

    if ~isempty(X)

        X(end) = [];

        Y(end) = [];

        BUTTON(end) = [];

        cont = cont - 1;

    end

    continue

end

if ismember(button,ZOOMOUT)

    zoom out

    continue

end

if ismember(button,ZOOMRESET)

    zoom reset

    continue

end

lim = axis;

outside = x<lim(1) || x>lim(2) || y<lim(3) || y>lim(4);
```

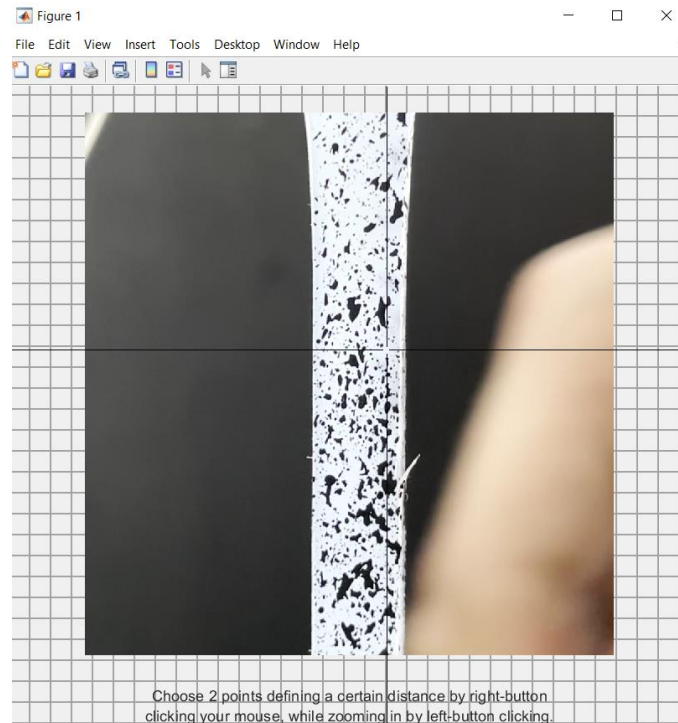
```
if ismember(button,ZOOMIN) && ~outside
    zoom(2)
    continue
end

if ismember(button,SELECTS)
    if ~outside
        X = [X; x];
        Y = [Y; y];
        BUTTON = [BUTTON; button];
        cont = cont + 1;
    end
    continue
end

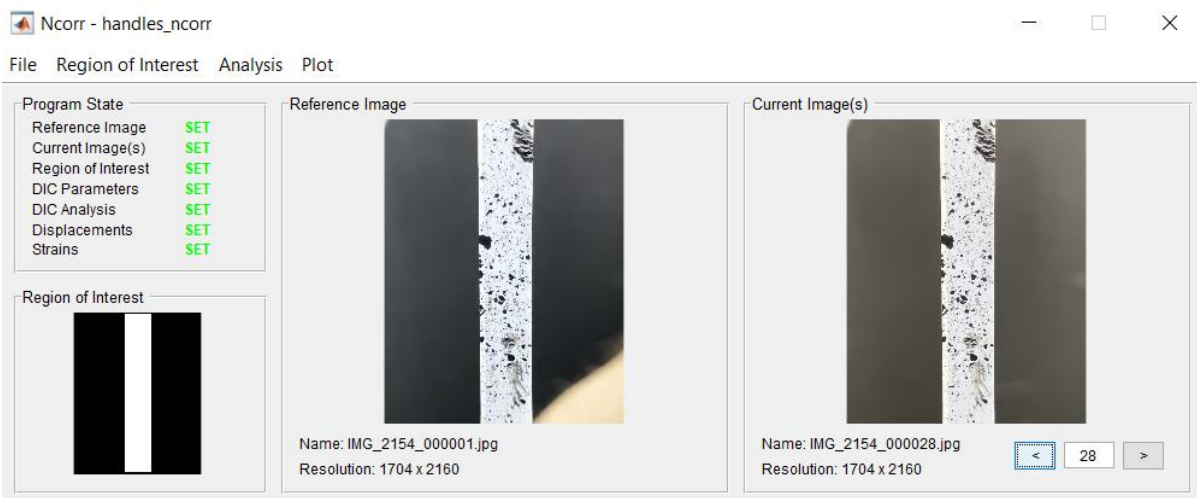
end

if nargout<2
    X = [X Y];
end
```

Una vez solucionada la programación del sistema, se procede a escalar la imagen, generando valores de distancia entre pixeles.

Figura A3*Probeta procesada*

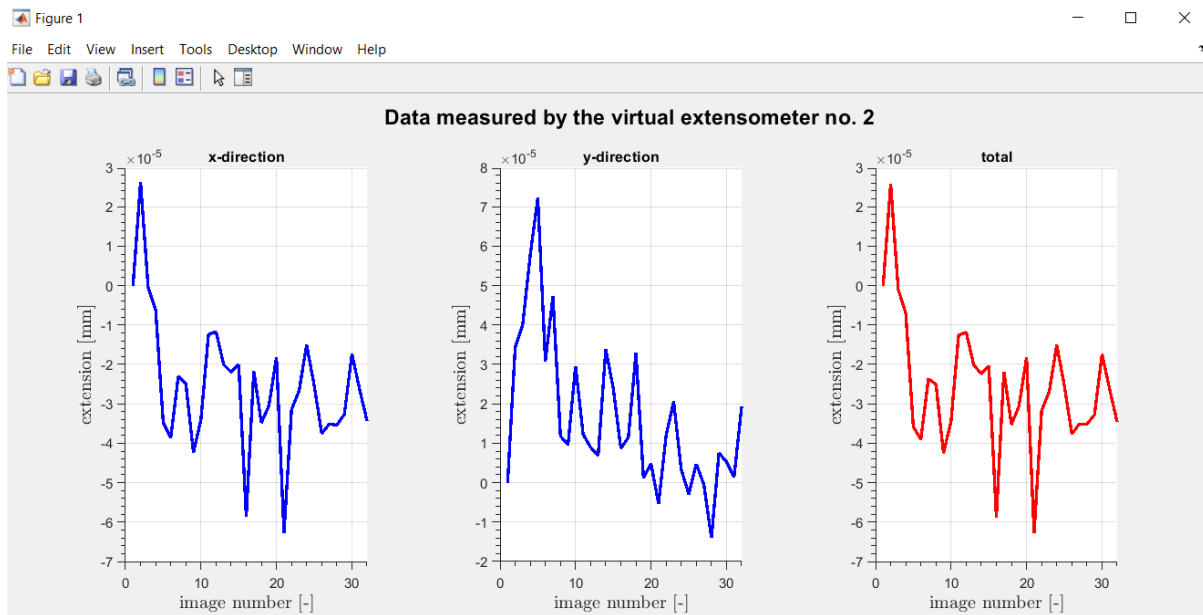
Se seleccionan los parámetros establecidos para todas las pruebas.

Figura A4*Procesamiento de probeta*

A partir del posprocesamiento se visualizan datos de cada prueba que validen una disminución en los desplazamientos a partir de los extensómetros virtuales:

Figura A5

Datos medidos por los extensómetros virtuales



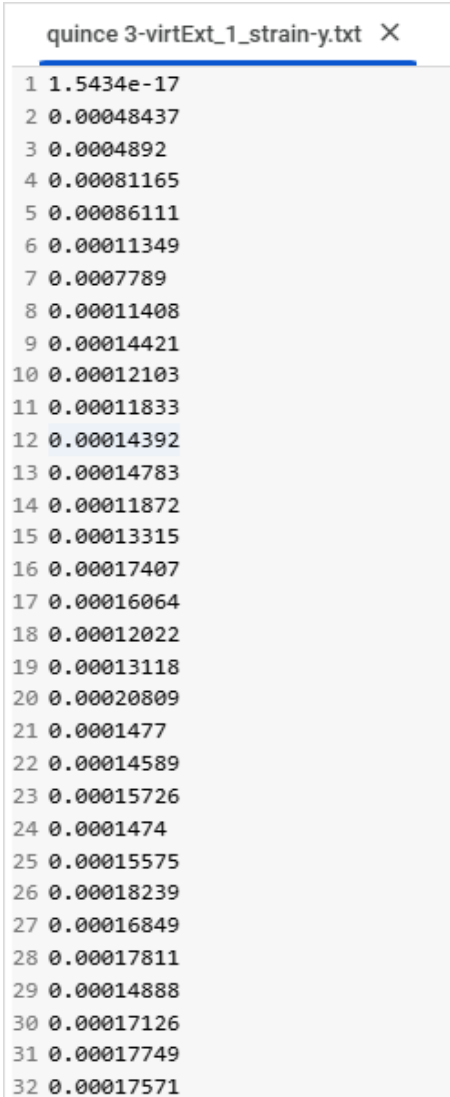
Apéndice B

Datos extraídos del NCORR para el cálculo de Poisson

1. Datos extraídos del NCORR

Figura B1

Deformaciones en y



quince 3-virtExt_1_strain-y.txt X

1	1.5434e-17
2	0.00048437
3	0.0004892
4	0.00081165
5	0.00086111
6	0.00011349
7	0.0007789
8	0.00011408
9	0.00014421
10	0.00012103
11	0.00011833
12	0.00014392
13	0.00014783
14	0.00011872
15	0.00013315
16	0.00017407
17	0.00016064
18	0.00012022
19	0.00013118
20	0.00020809
21	0.0001477
22	0.00014589
23	0.00015726
24	0.0001474
25	0.00015575
26	0.00018239
27	0.00016849
28	0.00017811
29	0.00014888
30	0.00017126
31	0.00017749
32	0.00017571

Figura B2*Deformaciones en x*

quince 3-virtExt_2_strain-x.txt X

1	7.3356e-17
2	-0.00013817
3	-3.0371e-05
4	1.4036e-05
5	0.00022832
6	-8.5002e-05
7	-9.5927e-07
8	0.00021243
9	-0.00010803
10	-8.9566e-05
11	-0.00022366
12	-1.2275e-07
13	-0.0004779
14	-2.3107e-05
15	3.4231e-05
16	-0.00013546
17	-0.00019461
18	-0.0002452
19	-0.00042023
20	-0.00021536
21	-0.00028852
22	-0.00021373
23	-0.00042725
24	-0.00025369
25	-0.00012091
26	-0.00022093
27	5.4833e-05
28	-0.00025148
29	0.00026313
30	0.00018553
31	8.3121e-05
32	-0.00020904

2. Código de Poisson por medio de Inferencia Bayesiana

```
import numpy as np

# Cargar los datos de strain en X e Y (ajusta el nombre del archivo según corresponda)

strain_x = np.loadtxt("quince 1-virtExt_3_strain-x.txt")

strain_y = np.loadtxt("quince 1-virtExt_3_strain-y.txt")

# Filtrar valores no finitos (NaN o inf)

strain_x = strain_x[np.isfinite(strain_x)]

strain_y = strain_y[np.isfinite(strain_y)]

# Calcular la media de cada uno

mean_ex = np.mean(strain_x)

mean_ey = np.mean(strain_y)

# Calcular el coeficiente de Poisson

poisson = - mean_ex / mean_ey

# Opcional: calcular la desviación estándar de la razón en cada punto

ratio = - strain_x / strain_y

poisson_std = np.std(ratio)
```

```
print(f"Coeficiente de Poisson: {poisson:.4f} ± {poisson_std:.4f}")
```

Poisson

2.1124 ± 0.666

0.7761 ± 0.8513

```
import numpy as np
```

```
import pymc as pm
```

```
import arviz as az
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
Poisson = 2.1124 ± 0.666
```

```
Poisson = 0.7761 ± 0.8513
```

```
# Representamos estas mediciones como un vector de valores (y)
```

```
# y otro de desviaciones estándar (sigma).
```

```
y = np.array([2.1124, 0.7761])
```

```
sigma = np.array([0.666, 0.8513])
```

```
# MODELO BAYESIANO
```

```
with pm.Model() as model:
```

```
    # Prior para Poisson: asume un valor inicial (mu=1) y una desviación amplia (sigma=2)
```

```
    # Puedes ajustar estos valores según tu conocimiento previo.
```

```
poisson = pm.Normal("poisson", mu=1, sigma=2)

# Verosimilitud: las mediciones y_i se asumen ~ Normal(poisson, sigma_i)
obs = pm.Normal("obs", mu=poisson, sigma=sigma, observed=y)

# Muestreo MCMC
trace = pm.sample(2000, tune=1000, target_accept=0.9, return_inferencedata=True)

# RESUMEN DE RESULTADOS
summary = az.summary(trace, var_names=["poisson"], hdi_prob=0.95)
print(summary)

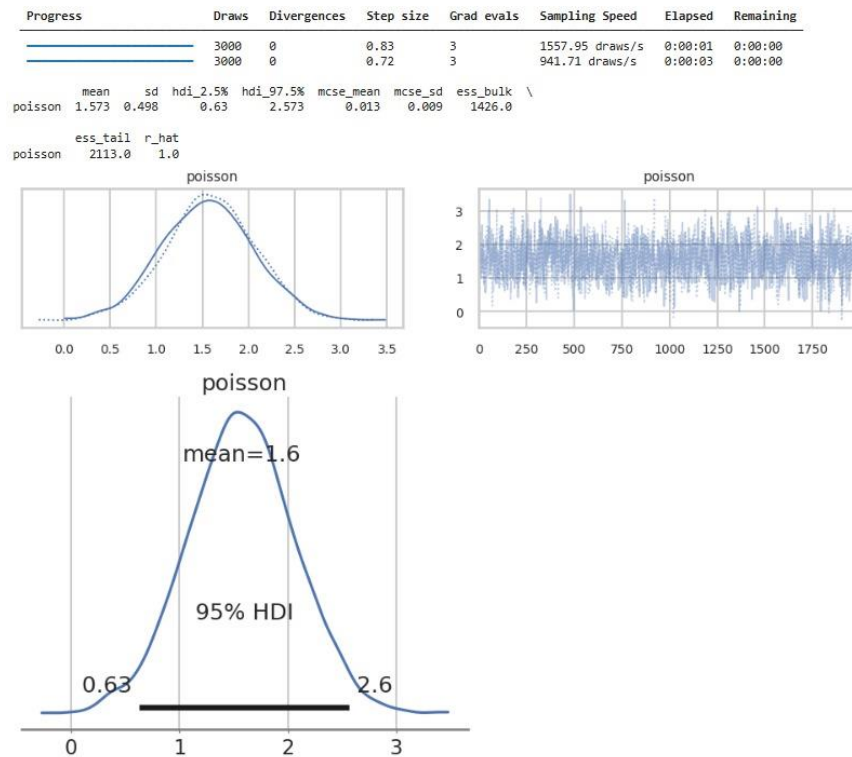
# TRAZAS Y DISTRIBUCIÓN POSTERIOR
az.plot_trace(trace, var_names=["poisson"])
plt.show()

# GRAFICAR LA DISTRIBUCIÓN POSTERIOR
az.plot_posterior(trace, var_names=["poisson"], hdi_prob=0.95)
plt.show()
```

3. Resultados asociados al método por Inferencia Bayesiana para hallar el Poisson

Figura B3

Resultados del Poisson



Apéndice C

Datos y ajuste por medio de Inferencia Bayesiana.

Tabla C1

Datos de esfuerzo del mecanismo

Tiempo (s)	Esfuerzo (Pa)								
	Ensayo 5 mm			Ensayo 10 mm			Ensayo 15 mm		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	246111.	274444.	313888.	462777.	527777.	522222.	638333.	773333.	616666.
	111	444	889	778	778	222	333	333	667
2		272222.	311666.	462777.	522777.		638333.	765555.	615555.
	245000	222	667	778	778	520000	333	556	556
3	241111.	269444.		459444.	520555.	520555.	626666.	757222.	607222.
	111	444	310000	444	556	556	667	222	222
4	240555.	269444.	307777.	457222.	516666.	516111.	623333.	754444.	603333.
	556	444	778	222	667	111	333	444	333
5	236666.	267777.	306111.	454444.	517777.	517222.	621111.	750555.	600555.
	667	778	111	444	778	222	111	556	556
7	237222.	267777.	306666.	453333.	514444.	515555.		748888.	599444.
	222	778	667	333	444	556	620000	889	444
8	236666.	266666.		452777.	515555.	516666.	615555.	745555.	596666.
	667	667	305000	778	556	667	556	556	667
9	237222.	265555.	303888.	449444.	513888.	517222.		743888.	593888.
	222	556	889	444	889	222	615000	889	889
10	235555.	264444.	302222.	448333.	516111.	516111.	612222.	743333.	592777.
	556	444	222	333	111	111	222	333	778
12	234444.	265555.	302222.	447777.	513888.	515555.	614444.	740555.	590555.
	444	556	222	778	889	556	444	556	556
13	236111.	263333.	301666.		511666.	516666.	612777.		587222.
	111	333	667	445000	667	667	778	740000	222
14		262777.	301111.	447222.	512222.	513888.	613888.	737777.	587222.
	235000	778	111	222	222	889	889	778	222
15	233888.	263888.	301666.	445555.	512777.	517222.	610555.	738333.	586666.
	889	889	667	556	778	222	556	333	667
17	233888.	260555.	298333.	446666.	512777.	515555.		737777.	588888.
	889	556	333	667	778	556	610000	778	889
18	233888.	262222.	300555.	446666.	512222.	514444.	607777.	736111.	587222.
	889	222	556	667	222	444	778	111	222
19	235555.	260555.	300555.	445555.	511666.	516111.		736111.	582777.
	556	556	556	556	667	111	610000	111	778

	233333.		297222.	447222.	511666.	514444.	608333.	735555.	584444.
20	333	260000	222	222	667	444	333	556	444
	232777.		298888.	443333.	511666.	514444.	609444.	733333.	
22	778	260000	889	333	667	444	444	333	585000
	233888.	261111.	296666.	443888.	511111.	513888.	609444.	733333.	583333.
23	889	111	667	889	111	889	444	333	333
	233888.		296666.	443888.		513333.	609444.	732777.	581666.
24	889	260000	667	889	510000	333	444	778	667
	232777.	259444.	296666.	442222.	511111.		608333.	732222.	579444.
25	778	444	667	222	111	515000	333	222	444
	231111.	258888.	297777.	442777.	510555.	513888.	606666.	730555.	578888.
27	111	889	778	778	556	889	667	556	889
	234444.	258333.	297222.	442777.	508333.	513333.	607222.	732777.	578333.
28	444	333	222	778	333	333	222	778	333
	233888.	259444.	298333.	442777.	511111.	513888.	606666.	728333.	578888.
29	889	444	333	778	111	889	667	333	889
	232777.	258888.	296666.	441666.	509444.	512222.		728333.	578333.
30	778	889	667	667	444	222	605000	333	333
	233333.	258333.	298333.	442222.	508888.	513333.	607222.	728333.	578333.
32	333	333	333	222	889	333	222	333	333
	233333.	258888.	297222.	440555.	509444.	514444.	607222.	727222.	578888.
33	333	889	222	556	444	444	222	222	889
	232777.	258333.	297222.	439444.	508888.	514444.	606111.	726666.	576111.
34	778	333	222	444	889	444	111	667	111
	232777.	260555.	296666.	442222.	507222.	512777.	606666.	726111.	577777.
36	778	556	667	222	222	778	667	111	778
	233333.	257777.	295555.	440555.	507777.	512777.	603333.	726111.	578333.
37	333	778	556	556	778	778	333	111	333
	232777.	256666.	296666.	438888.	508888.	511666.	604444.	726111.	
38	778	667	667	889	889	667	444	111	575000
		256666.		437222.	509444.	512777.	603888.	727222.	575555.
39	230000	667	295000	222	444	778	889	222	556
	231111.	255555.	292777.	439444.	506666.	512222.	602777.	723888.	
41	111	556	778	444	667	222	778	889	575000
	231111.	257222.			508888.	511666.	602777.	723333.	574444.
42	111	222	295000	440000	889	667	778	333	444
	232222.	255555.	293333.	438333.	507777.	512222.	602222.	723888.	
43	222	556	333	333	778	222	222	889	575000
	230555.	257222.	293333.	437222.	508888.	513333.	604444.	722777.	573888.
44	556	222	333	222	889	333	444	778	889
	232777.	257222.	293333.	438333.	509444.	511666.	603888.	722222.	574444.
46	778	222	333	333	444	667	889	222	444
	230555.	256666.	295555.	438333.	507222.	512222.	606111.	722222.	573888.
47	556	667	556	333	222	222	111	222	889

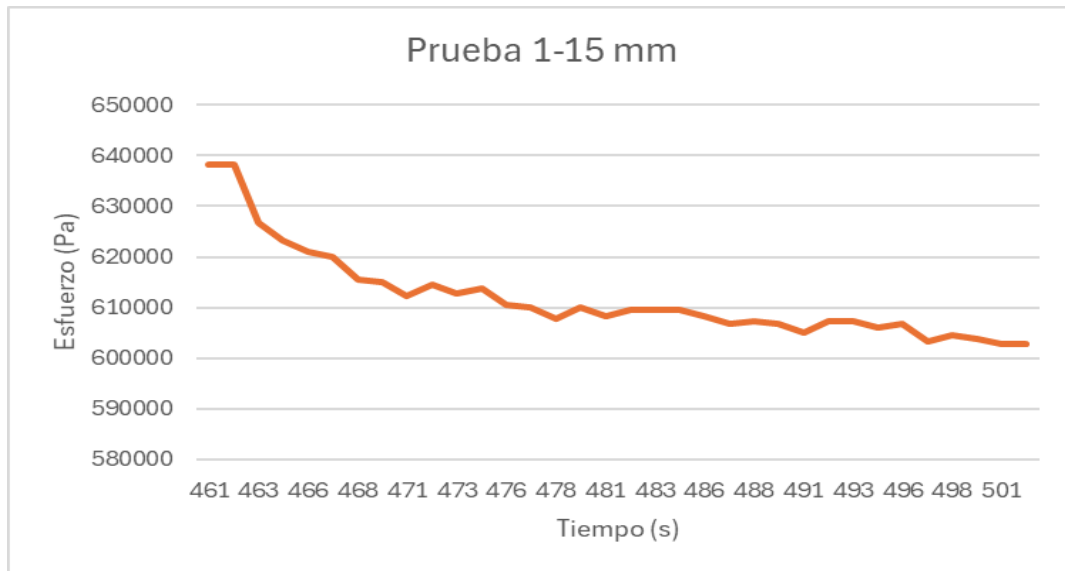
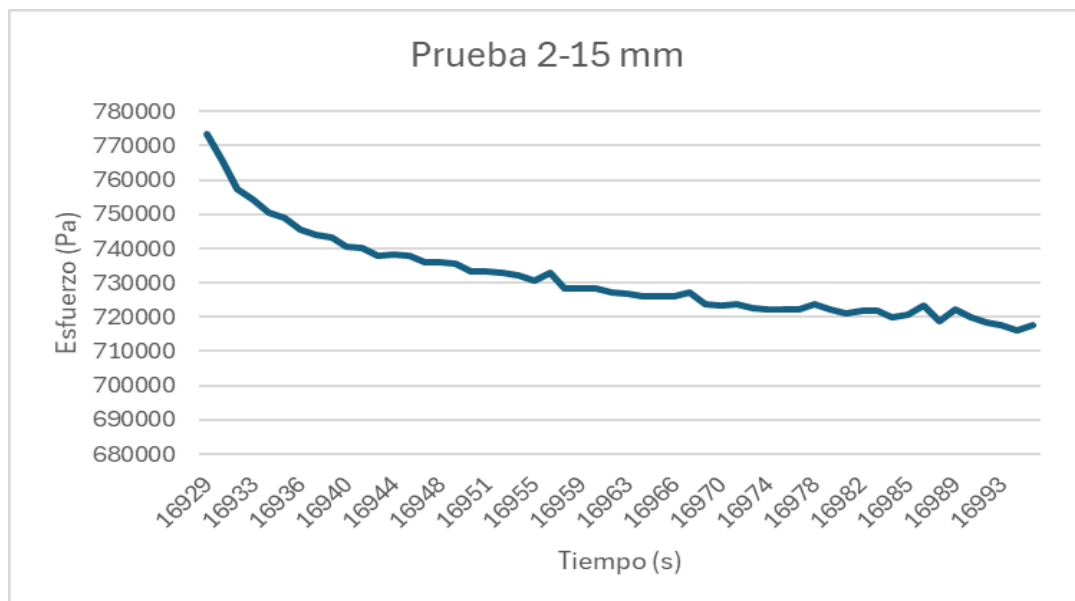
Figura C1*Prueba 1, 15 mm***Figura C2***Prueba 2, 15 mm*

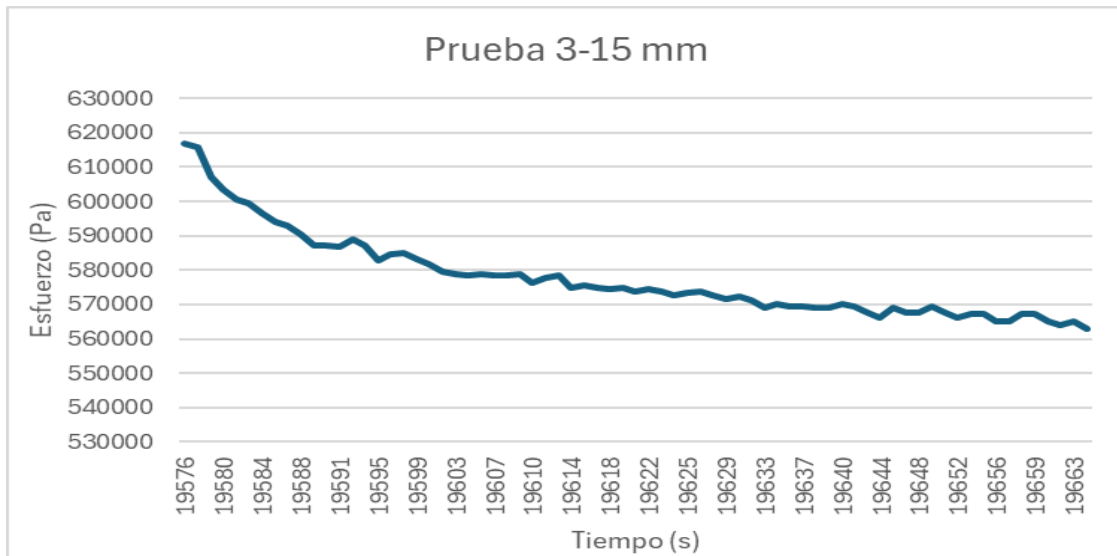
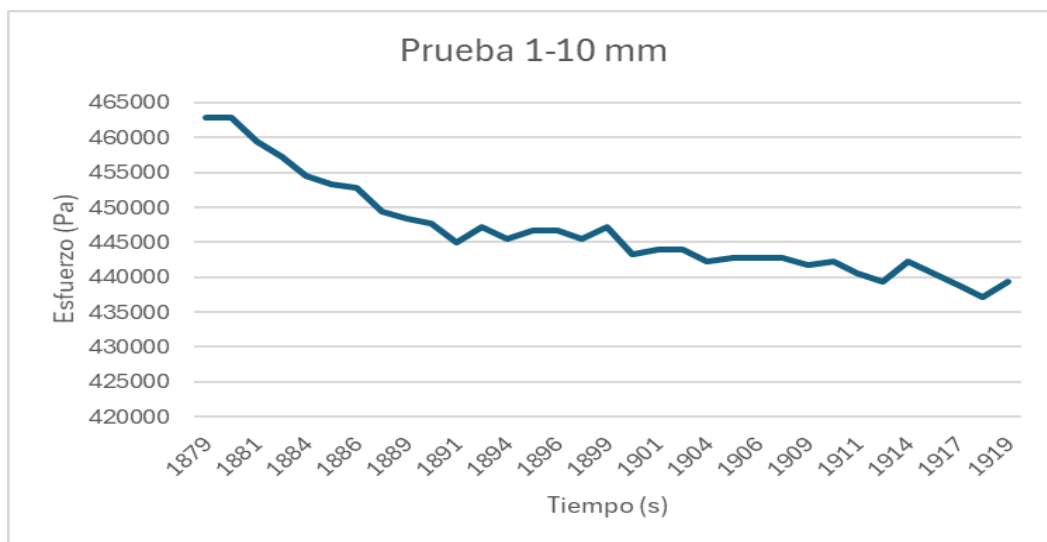
Figura C3*Prueba 3, 15 mm***Figura C4***Prueba 1, 10 mm*

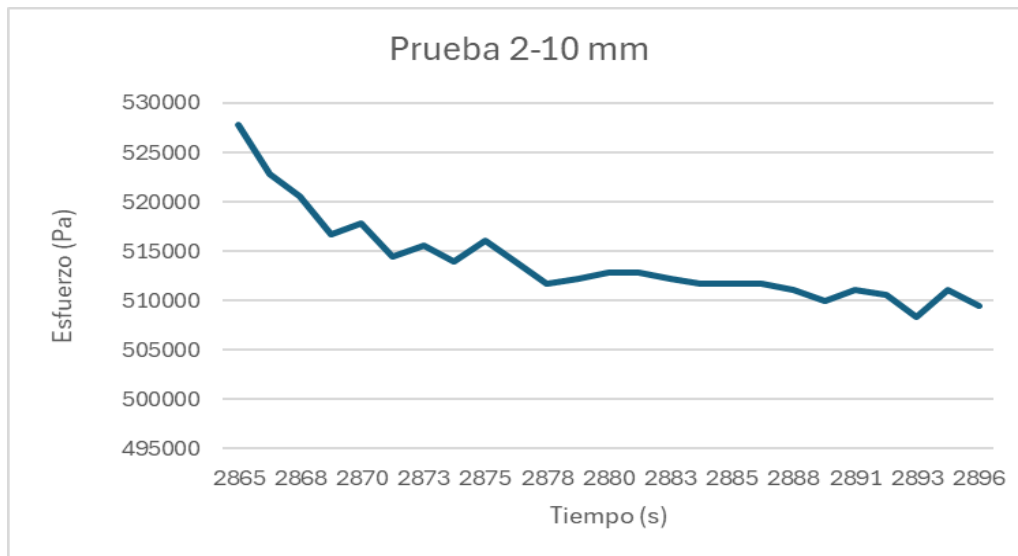
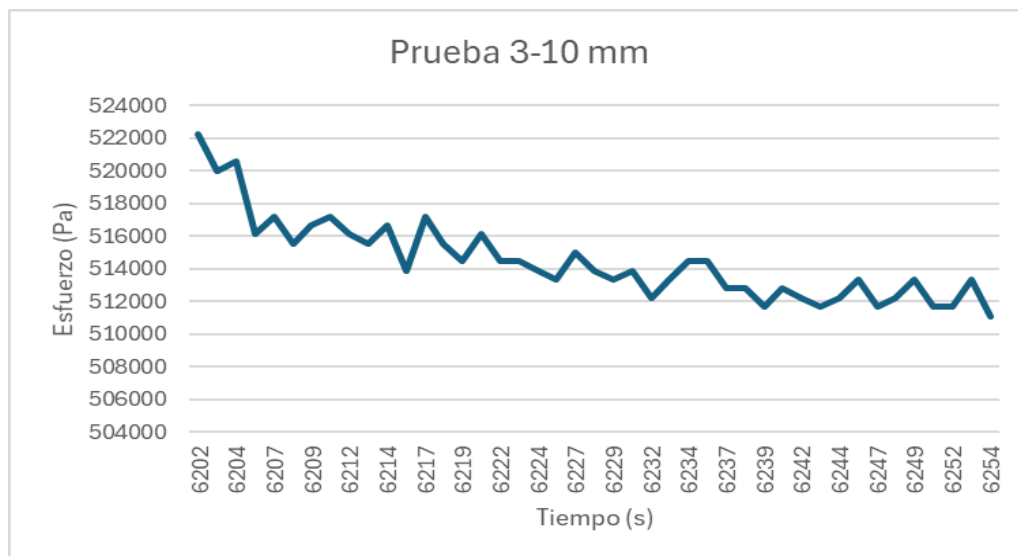
Figura C5*Prueba 2, 10 mm***Figura C6***Prueba 3, 10 mm*

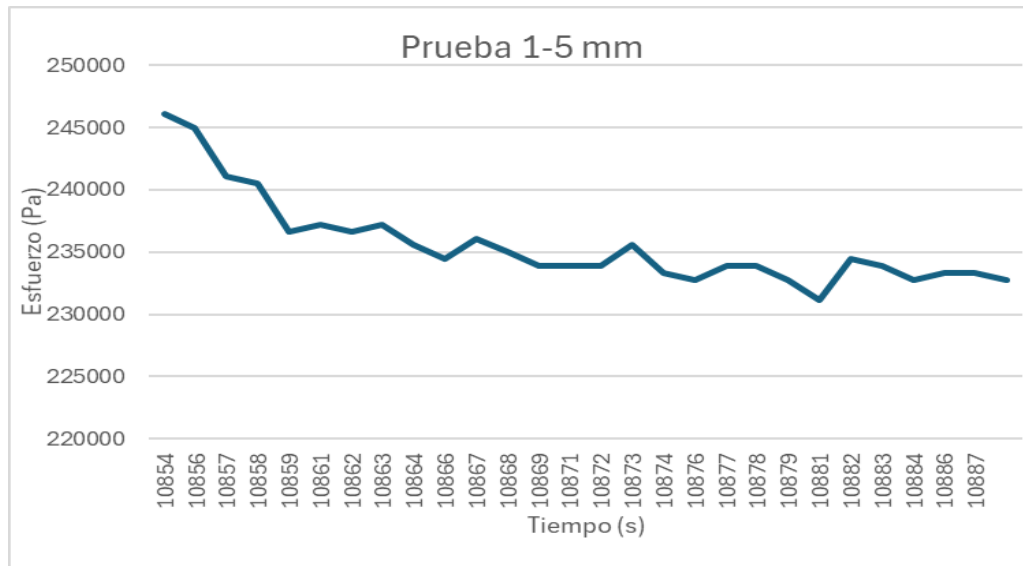
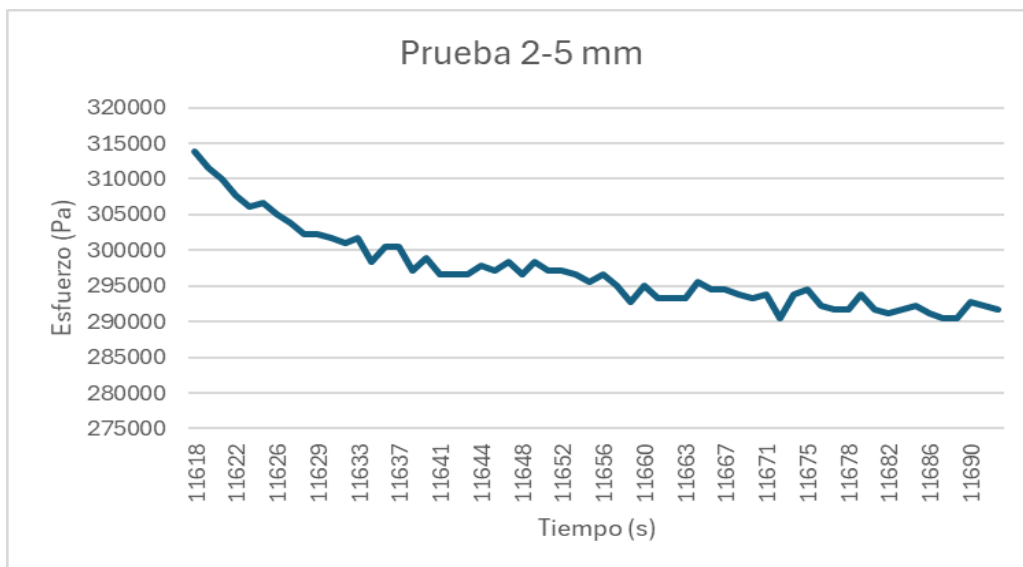
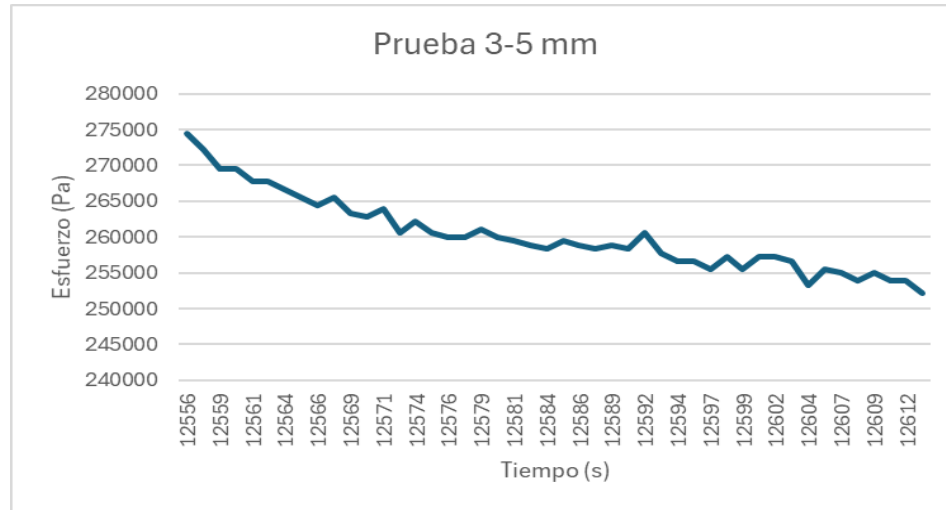
Figura C7*Prueba 1, 5 mm***Figura C8***Prueba 2, 5 mm*

Figura C9*Prueba 3, 5 mm***Tabla C2.***Constantes del modelo de Maxwell obtenidas desde el mecanismo*

Deformación	Ensayo	Esfuerzo inicial (Pa)	Tau
	1	3.03e+05, 95% HDI: [3.02e+05, 3.04e+05]	1991, 95% HDI: [1830, 2176]
5 mm	2	2.39e+05, 95% HDI: [2.38e+05, 2.41e+05]	1153, 95% HDI: [905, 1473]
	3	2.67e+05, 95% HDI: [2.66e+05, 2.68e+05]	1188, 95% HDI: [1061, 1311]
	1	5.18e+05, 95% HDI: [5.17e+05, 5.20e+05]	2018, 95% HDI: [1606, 2461]
10 mm	2	5.05e+05, 95% HDI: [5.03e+05, 5.08e+05]	1221, 95% HDI: [1128, 1458]
	3	4.55e+05, 95% HDI: [4.53e+05, 4.56e+05]	1176, 95% HDI: [1026, 1333]
	1	6.00e+05, 95% HDI: [5.97e+05, 6.03e+05]	1036, 95% HDI: [902, 1179]
15 mm	2	7.52e+05, 95% HDI: [7.49e+05, 7.55e+05]	1146, 95% HDI: [984, 1322]
	3	6.22e+05, 95% HDI: [6.20e+05, 6.25e+05]	1314, 95% HDI: [1079, 1584]

Figura C10

Prueba 1 MTS, 15 mm

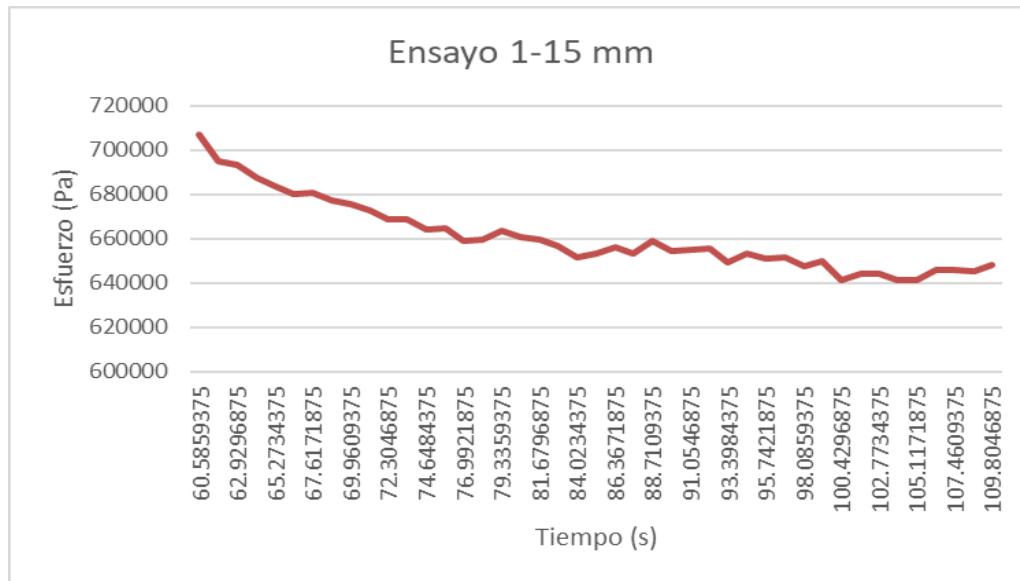


Figura C11

Prueba 2 MTS, 15 mm

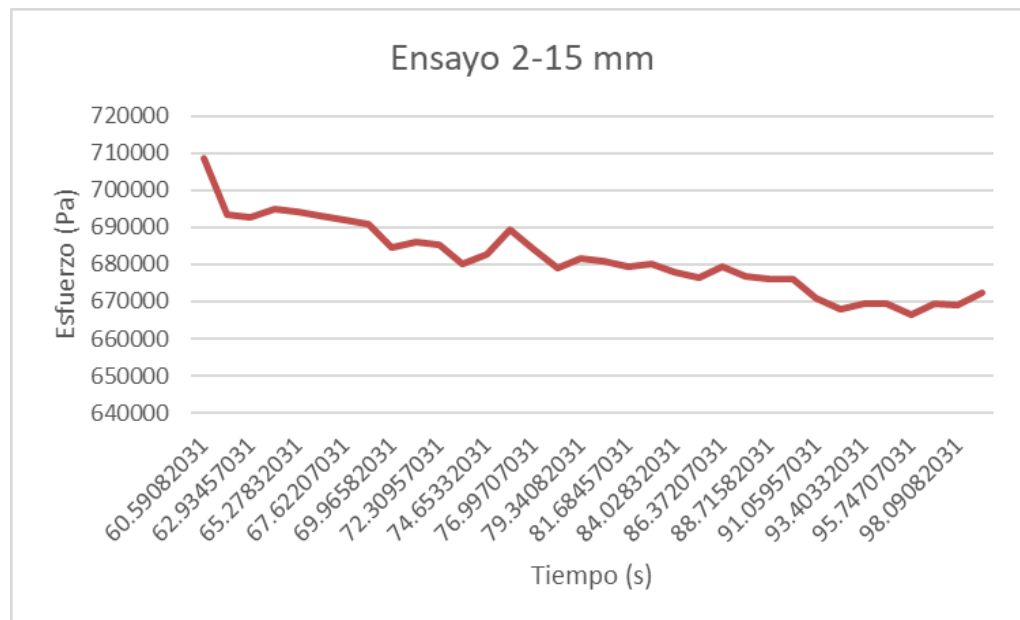


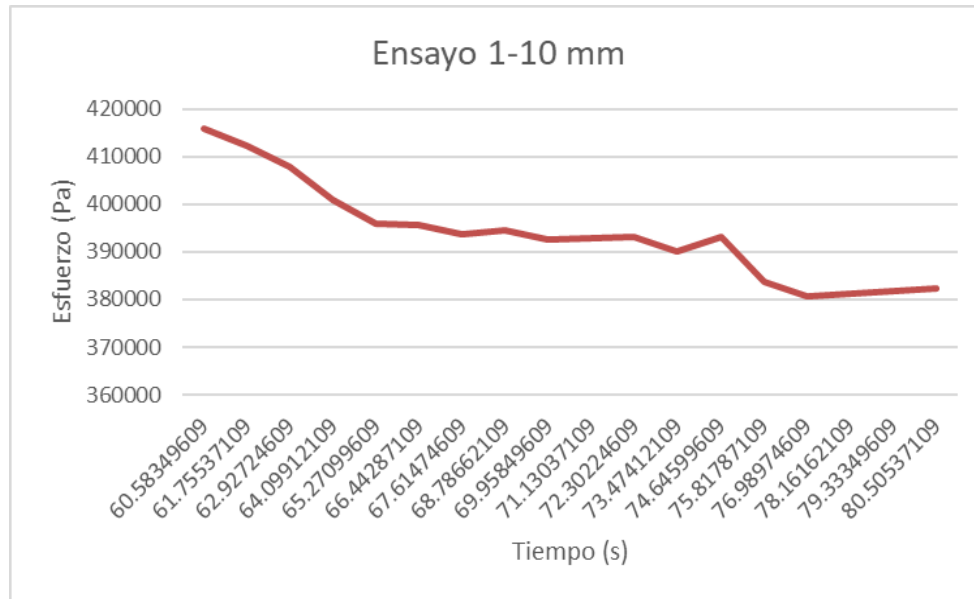
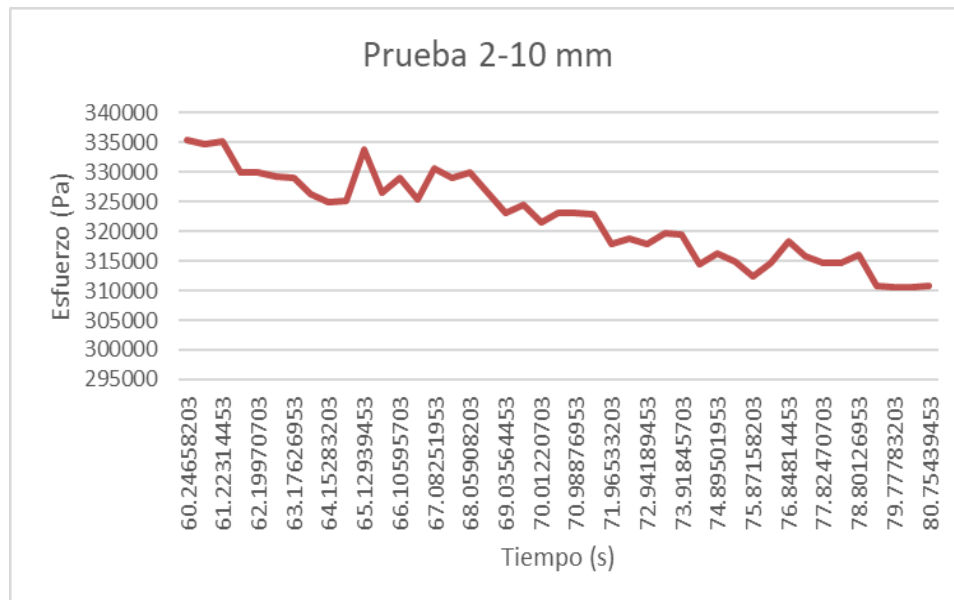
Figura C12*Prueba 1 MTS, 10 mm***Figura C13***Prueba 2 MTS, 10 mm*

Figura C14

Prueba 1 MTS, 5 mm

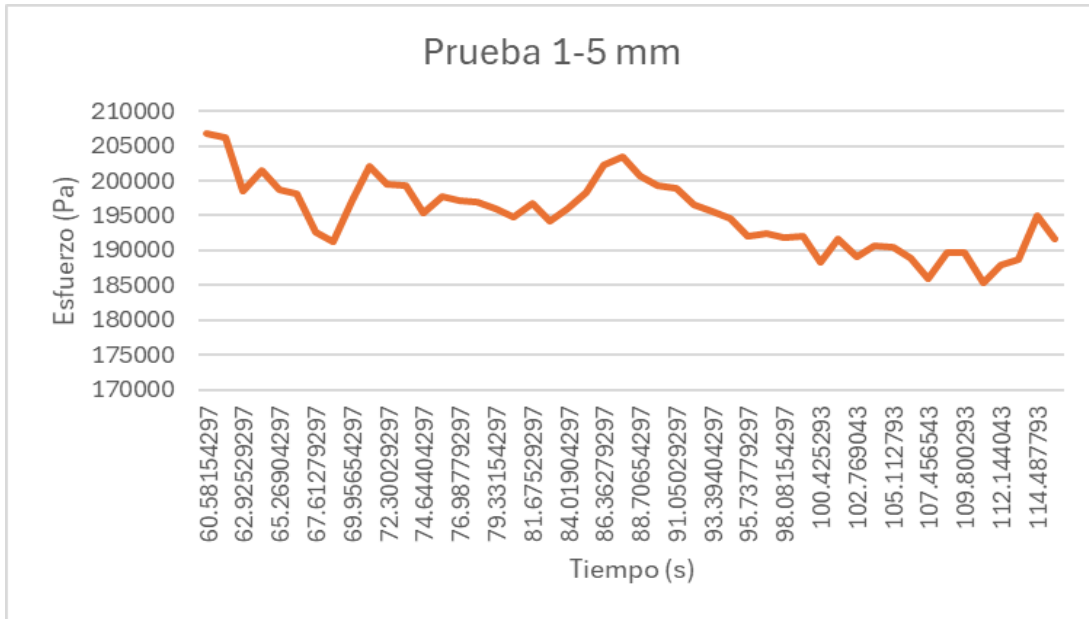


Figura C15

Prueba 2 MTS, 5 mm

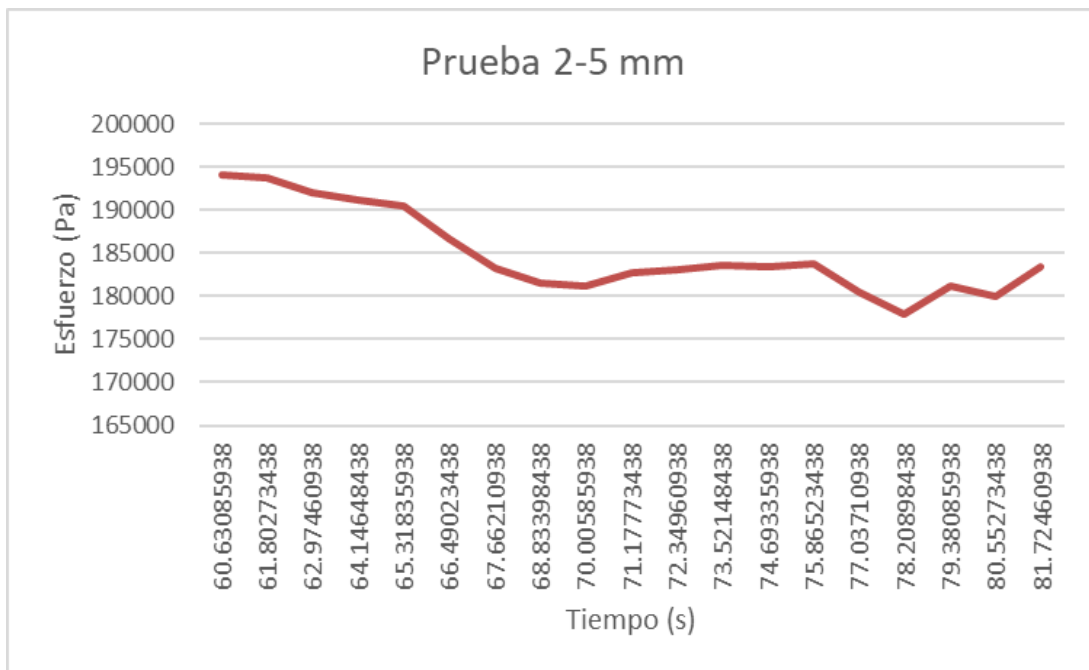


Tabla C3*Constantes del modelo de Maxwell: MTS*

Deformación	Ensayo	Esfuerzo inicial (Pa)	Tau (s)
5 mm	1	1.88e+05, 95% HDI: [1.85e+05, 1.90e+05]	914, 95% HDI: [418, 1674]
	2	2.46e+05, 95% HDI: [2.43e+05, 2.48e+05]	1410, 95% HDI: [923, 2097]
10 mm	1	3.98e+05, 95% HDI: [3.94e+05, 4.02e+05]	1667, 95% HDI: [726, 2154]
	2	3.94e+05, 95% HDI: [3.22e+05, 3.27e+05]	700, 95% HDI: [612, 795]
15 mm	1	6.92e+05, 95% HDI: [6.90e+05, 6.95e+05]	1445, 95% HDI: [1228, 1668]
	2	6.80e+05, 95% HDI: [6.76e+05, 6.83e+05]	970, 95% HDI: [830, 1112]

Tabla C4*Datos obtenidos en los ensayos de la MTS, ajustados por media móvil*

Tiempo (s)	Esfuerzo (Pa)					
	Ensayo 5 mm		Ensayo 10 mm		Ensayo 15 mm	
	1	2	1	2	1	2
61.77	251659.41	206833.10	335408.66	415924.46	707147.00	708543.81
62.94	248086.73	206189.58	334540.54	412333.75	695184.35	693598.69
64.11	247566.99	198512.69	334997.87	407753.21	692984.17	692563.46

65.29	247672.76	201456.39	329827.11	400851.37	687306.12	694911.95
66.46	246340.68	198718.64	329930.83	395804.26	683781.70	694023.88
67.63	244045.98	198125.65	329138.12	395574.56	680287.33	693097.28
68.80	249070.62	192552.20	328899.21	393598.68	680766.04	691842.57
69.97	248496.87	191221.57	326344.54	394476.02	677233.81	690744.32
71.14	247536.27	197210.95	324972.18	392703.92	675474.39	684555.12
72.32	245047.58	202057.67	325141.16	392972.33	672759.43	686220.88
73.49	244698.87	199581.21	333680.67	393015.20	668569.05	685355.31
74.66	243950.15	199313.96	326431.46	390047.36	668818.58	680003.95
75.83	245204.81	195431.74	328951.80	393127.24	663893.61	682722.81
77.00	242859.61	197740.16	325236.37	383800.55	664696.25	689362.24
78.18	242343.38	197232.00	330499.32	380549.01	659032.48	684229.98
79.35	235864.27	197015.56	328951.90	381252.07	659626.33	678973.17
80.52	235673.32	196063.76	329870.09	381901.31	663725.37	681732.36
81.69	234989.96	194829.12	326457.79	382408.36	660507.49	680878.75
82.86	232862.94	196662.20	322979.05	386959.47	659233.33	679409.16
84.04	231437.50	194168.68	324450.54	390026.09	656747.44	680103.46
85.21	234101.90	195996.18	321395.90	391810.84	651683.27	678067.25
86.38	238823.55	198425.15	323100.25	394506.73	653416.63	676424.43
87.55	238958.52	202230.89	323099.52	390460.28	656364.14	679397.55
88.72	240571.54	203385.21	322721.56	391404.11	653220.17	676762.61
89.89	242621.95	200661.39	317782.89	394371.83	658679.69	675982.11
91.07	238953.99	199363.90	318781.09	396276.06	654587.56	676177.28
92.24	242756.12	198973.49	317925.77	395000.03	654881.67	670781.33
93.41	237094.58	196655.36	319743.79	393070.66	655312.41	667844.91
94.58	238085.68	195653.67	319387.94	392848.38	649438.50	669245.01
95.75	235868.51	194674.26	314401.95	388461.88	653254.38	669240.29
96.93	238656.33	192047.18	316215.34	390187.67	651150.58	666282.61
98.10	234414.14	192444.11	314918.81	388125.98	651769.71	669516.90
99.27	235098.19	191809.87	312454.12	392272.82	647605.22	668871.74
100.44	232352.29	192043.92	314643.37	390427.24	649658.41	672530.43
101.61	236150.83	188390.21	318326.03	391776.09	640932.68	673867.98
102.79	239872.53	191708.56	315752.11	391369.19	643945.96	670109.25
103.96	237336.08	189104.83	314711.44	388969.22	643829.74	672437.14
105.13	239432.31	190684.86	314580.61	388408.95	641120.32	672112.64
106.30	233682.65	190533.42	316016.71	389194.52	640951.24	672564.13
107.47	234805.45	188829.31	310884.92	390588.47	645936.71	674321.89

108.64	236999.45	185871.09	310603.99	390649.91	645672.31	674020.91
109.82	237317.36	189698.22	310503.05	388681.81	645025.22	671823.52
110.99	235494.31	189582.91	310811.32	391890.50	648003.86	672949.46
112.16	237321.48	185316.98	303644.68	388659.97	646195.59	675145.15
113.33	238632.36	187944.78	305363.52	390416.84	641470.35	671558.01
114.50	240568.65	188609.32	305887.88	394489.70	645127.05	671552.99
115.68	240253.60	194897.15	307025.05	390462.47	641814.19	666705.71
116.85	238426.18	191732.61	308726.45	393364.67	642035.40	667992.93
118.02	238701.05	191939.46	308520.73	396396.04	640291.66	666554.30
119.19	243677.99	192985.79	305789.58	398771.18	640642.58	666004.65
119.89	243077.24	193931.52	299536.98	397256.53	647544.43	666698.84

Código Inferencia Bayesiana

Procesamiento de datos obtenidos de los ensayos para ajustarlos por medio de Inferencia Bayesiana

```
import numpy as np

import pymc as pm

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

import arviz as az

# 1. Cargar y preprocesar datos

df = pd.read_excel("Prueba 3 5 mm mecanismo.xlsx") # Cambia el nombre del archivo según
corresponda

df.columns = df.columns.str.strip() # Quitar espacios extra en los nombres de columnas
```

```
df['t'] = df['Tiempo (s)'] - df['Tiempo (s)'].iloc[0] # Ajuste para que t=0 sea el inicio real
```

```
t = df['t'].values
```

```
sigma = df['Esfuerzo (Pa)'].values
```

```
# 2. Definir el modelo bayesiano en PyMC
```

```
with pm.Model() as model:
```

```
    # Priors
```

```
    sigma0 = pm.Normal("sigma0", mu=sigma[0], sigma=abs(sigma[0])*0.5)
```

```
    tau = pm.Lognormal("tau", mu=np.log(1000), sigma=1) # Ajustar si esperas  $\tau$  distinto
```

```
    sigma_noise = pm.HalfNormal("sigma_noise", sigma=1e6)
```

```
    # Modelo determinístico de relajación
```

```
    mu_model = sigma0 * pm.math.exp(-t / tau)
```

```
    # Likelihood
```

```
    y_obs = pm.Normal("y_obs", mu=mu_model, sigma=sigma_noise, observed=sigma)
```

```
    # Muestreo MCMC
```

```
    trace = pm.sample(2000, tune=1000, target_accept=0.9, return_inferencedata=True)
```

```
# 3. Visualizar los trazos de los parámetros
```

```
az.plot_trace(trace)
```

```
plt.show()
```

```
# 4. Extraer estadísticos de  $\sigma_0$  y  $\tau$ 
```

```
sigma0_post = trace.posterior["sigma0"].mean().item()
```

```
tau_post = trace.posterior["tau"].mean().item()
```

```
# Aplanar las muestras para calcular el HDI al 95%
```

```
sigma0_samples = trace.posterior["sigma0"].values.flatten()
```

```
tau_samples = trace.posterior["tau"].values.flatten()
```

```
sigma0_low, sigma0_high = az.hdi(sigma0_samples, hdi_prob=0.95)
```

```
tau_low, tau_high = az.hdi(tau_samples, hdi_prob=0.95)
```

```
# 5. Construir la curva media y la banda de credibilidad
```

```
# Curva media (usando la media de  $\sigma_0$  y  $\tau$ )
```

```
sigma_pred = sigma0_post * np.exp(-t / tau_post)
```

```
# Banda de credibilidad: generamos predicciones para todas las muestras
```

```
posterior = trace.posterior.stack(sample=("chain", "draw"))
```

```
sigma0_all = posterior["sigma0"].values # (n_samples,)
```

```
tau_all = posterior["tau"].values # (n_samples,)
```

```
# Matriz de predicciones  $y(t) = \sigma_0 * \exp(-t/\tau)$  para cada muestra
```

```
y_samples = sigma0_all * np.exp(-np.outer(t, 1/tau_all))
```

```
# Calcular percentiles 2.5, 50 y 97.5 para cada instante

lower = np.percentile(y_samples, 2.5, axis=1)

median = np.percentile(y_samples, 50, axis=1)

upper = np.percentile(y_samples, 97.5, axis=1)

# 6. Graficar resultados

plt.figure(figsize=(8,4))

plt.scatter(t, sigma, label="Datos experimentales")

plt.plot(t, median, color="C1", label=f"Modelo Bayesiano:  $\tau={\tau\_post:.0f}$ s")

plt.fill_between(t, lower, upper, color="C1", alpha=0.3, label="95% intervalo creíble")

plt.xlabel("Tiempo (s)")

plt.ylabel("Esfuerzo (Pa)")

plt.legend()

plt.show()

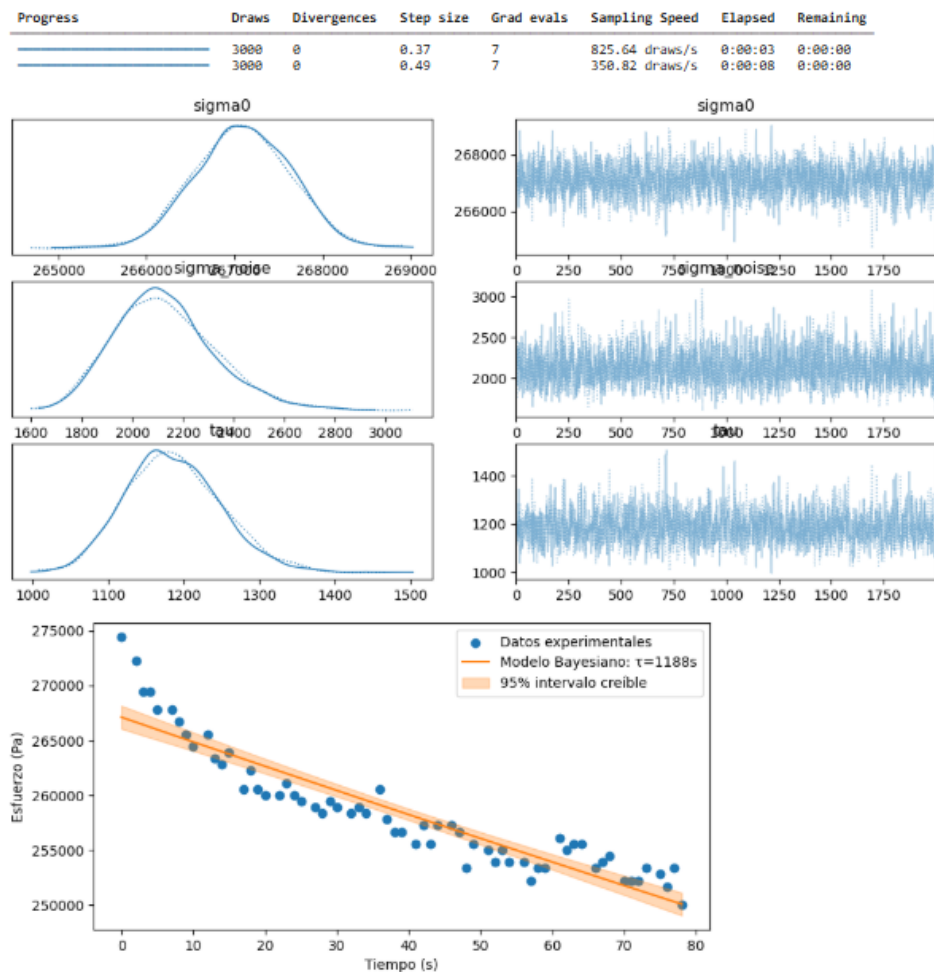
# 7. Imprimir los resultados finales

print(f" $\sigma_0$  ajustado = {sigma0_post:.2e} Pa, 95% HDI: [{sigma0_low:.2e}, {sigma0_high:.2e}]")

print(f" $\tau$  ajustado = {tau_post:.0f} s, 95% HDI: [{tau_low:.0f}, {tau_high:.0f}]")
```

Figura C16

Ajuste de datos, gráficas por Inferencia Bayesiana



Código Compilación datos inferencia bayesiana

Conglomera los datos obtenidos por Inferencia Bayesiana para generar modelos de Maxwell.

```
import numpy as np
```

```
import pymc as pm
```

```
import arviz as az

import matplotlib.pyplot as plt

sigma_10mm_mts = [
    (3.98e5, 3.94e5, 4.02e5), # mean=3.98e+05, HDI=[3.94e+05, 4.02e+05]
    (3.94e5, 3.22e5, 3.27e5), # mean=3.94e+05, HDI=[3.22e+05, 3.27e+05]
]

tau_10mm_mts = [
    (1667, 726, 2300), # mean=1667, HDI=[726, 2154]
    (700, 612, 795), # mean=700, HDI=[612, 795]
]

# 2) Función para convertir HDI a std
def hdi_to_std(mean, lower, upper):
    dist_sup = upper - mean
    std_approx = dist_sup / 1.96
    return mean, std_approx

# 3) Función para pooling bayesiano
def bayesian_pooling(measurements):
    means = []
    sigmas = []
```

```
for (m, l, u) in measurements:
```

```
    mu, std = hdi_to_std(m, l, u)
```

```
    means.append(mu)
```

```
    sigmas.append(std)
```

```
means = np.array(means)
```

```
sigmas = np.array(sigmas)
```

```
with pm.Model() as model:
```

```
    theta = pm.Normal("theta", mu=np.mean(means), sigma=np.std(means)*5 + 1e-6)
```

```
    pm.Normal("obs", mu=theta, sigma=sigmas, observed=means)
```

```
    trace = pm.sample(2000, tune=1000, target_accept=0.9, return_inferencedata=True,  
progressbar=False)
```

```
    return trace
```

```
# 4) Ajustar sigma y tau para 15 mm
```

```
trace_sigma_15 = bayesian_pooling(sigma_15mm)
```

```
trace_tau_15 = bayesian_pooling(tau_15mm)
```

```
res_sigma_15 = az.summary(trace_sigma_15, var_names=["theta"], hdi_prob=0.95)
```

```
res_tau_15 = az.summary(trace_tau_15, var_names=["theta"], hdi_prob=0.95)
```

```
mean_sigma_15 = res_sigma_15.loc["theta", "mean"]
```

```
hdi_sigma_15_lower = res_sigma_15.loc["theta", "hdi_2.5%"]
```

```
hdi_sigma_15_upper = res_sigma_15.loc["theta","hdi_97.5%"]

mean_tau_15 = res_tau_15.loc["theta","mean"]

hdi_tau_15_lower = res_tau_15.loc["theta","hdi_2.5%"]

hdi_tau_15_upper = res_tau_15.loc["theta","hdi_97.5%"]

print(f"\n--- RESULTADOS 15 mm ---")

print(f"Sigma: {mean_sigma_15:.2f}, 95% HDI: [{hdi_sigma_15_lower:.2f},
{hdi_sigma_15_upper:.2f}]")

print(f"Tau: {mean_tau_15:.2f}, 95% HDI: [{hdi_tau_15_lower:.2f},
{hdi_tau_15_upper:.2f}]")

# 5) Repite el mismo procedimiento con sigma_10mm, tau_10mm, sigma_5mm, tau_5mm
```

Código comparación resultados

Código que compara los parámetros procesados ya por Inferencia Bayesiana por desplazamientos (15mm, 10mm, 5mm).

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Datos del mecanismo

sigma_mecanismo = np.array([
```

```
(658025.83, 621014.99, 674804.07),
```

```
(495175.66, 472659.60, 510330.21),
```

```
(272435.24, 258014.15, 292818.79),
```

```
]
```

```
tau_mecanismo = np.array([
```

```
(1115.27, 1012.65, 1213.59),
```

```
(1416.82, 1322.63, 1574.11),
```

```
(1397.06, 1289.58, 1489.74),
```

```
]
```

```
# Datos de la MTS corregidos
```

```
sigma_mts = np.array([
```

```
(685928.42, 663839.35, 705095.41),
```

```
(397695.79, 376581.84, 416402.32),
```

```
(218613.69, 206324.37, 228365.29),
```

```
]
```

```
tau_mts = np.array([
```

```
(1106.69, 990.94, 1223.36),
```

```
(1075.34, 965.72, 1180.64),
```

```
(1171.24, 1122.64, 1270.43),
```

```
]
```

```
# Etiquetas para el eje X
x_labels = ["15 mm", "10 mm", "5 mm"]
x = np.arange(len(x_labels))

# Gráfica comparativa de sigma (Esfuerzo inicial)
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.errorbar(x, sigma_mts[:, 0], yerr=[sigma_mts[:, 0] - sigma_mts[:, 1], sigma_mts[:, 2] -
sigma_mts[:, 0]],
            fmt='o', label="MTS", capsize=5)
plt.errorbar(x, sigma_mecanismo[:, 0], yerr=[sigma_mecanismo[:, 0] - sigma_mecanismo[:, 1],
sigma_mecanismo[:, 2] - sigma_mecanismo[:, 0]],
            fmt='s', label="Mecanismo", capsize=5)

plt.xticks(x, x_labels)
plt.ylabel("Sigma (Pa)")
plt.title("Comparación de Sigma entre MTS y Mecanismo")
plt.legend()
plt.grid()

# Gráfica comparativa de tau (Tiempo de relajación)
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.errorbar(x, tau_mts[:, 0], yerr=[tau_mts[:, 0] - tau_mts[:, 1], tau_mts[:, 2] - tau_mts[:, 0]],
```

```
        fmt='o', label="MTS", capsize=5)

plt.errorbar(x, tau_mecanismo[:, 0], yerr=[tau_mecanismo[:, 0] - tau_mecanismo[:, 1],
tau_mecanismo[:, 2] - tau_mecanismo[:, 0]],

        fmt='s', label="Mecanismo", capsize=5)

plt.xticks(x, x_labels)

plt.ylabel("Tau (s)")

plt.title("Comparación de Tau entre MTS y Mecanismo")

plt.legend()

plt.grid()

# Mostrar gráficos

plt.show()
```

Código Arduino toma de datos

Función de calibración, taraje y recopilación de datos del mecanismo experimental

```
#include "HX711.h"

#define DT_PIN A1 // Pin de datos del HX711

#define SCK_PIN A0 // Pin de reloj del HX711

#define GRAVITY 9.81 // Aceleración gravitatoria en m/s2
```

```
HX711 balanza;
```

```
float factor_escala = 1.0; // Factor de calibración
```

```
bool tomando_datos = false; // Bandera para tomar datos
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    balanza.begin(DT_PIN, SCK_PIN);
```

```
    Serial.println("Sistema iniciado.");
```

```
    Serial.println("Presiona 't' para tarar, 'c' para calibrar, 'd' para iniciar toma de datos y 'f' para  
finalizar.");
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    if (Serial.available()) {
```

```
        char comando = Serial.read();
```

```
        if (comando == 't') {
```

```
            tarar();
```

```
        } else if (comando == 'c') {
```

```
            calibrar();
```

```
        } else if (comando == 'd') {
```

```
            Serial.println("Iniciando toma de datos...");
```

```
            tomando_datos = true;
```

```
} else if (comando == 'f') {  
    Serial.println("Finalizando toma de datos...");  
    tomando_datos = false;  
}  
}  
  
if (tomando_datos && balanza.is_ready()) {  
    float masa = balanza.get_units(10); // Promedio de 10 lecturas  
    float fuerza = (masa/1000) *(GRAVITY); // Convertir a Newtons  
    unsigned long tiempo = millis() / 1000; // Tiempo en segundos  
  
    Serial.print("Tiempo: "); Serial.print(tiempo);  
    Serial.print(" s , Fuerza: "); Serial.print(fuerza);  
    Serial.println(" N");  
}  
  
delay(500);  
}  
  
// Función para tarar la celda de carga  
void tarar() {  
    Serial.println("Tarando... Retira cualquier peso.");  
    delay(3000);  
}
```

```
balanza.tare();

Serial.println("Celda tarada correctamente.");

}

// Función para calibrar la celda de carga con un peso de 219.5 g

void calibrar() {

    Serial.println("Coloca el peso de 320.4 g y presiona ENTER.");

    while (Serial.available() == 0);

    Serial.read();

    Serial.println("Midiendo...");

    delay(3000);

    float masa_real = 320.4; // Convertir de gramos a kg

    float lectura = balanza.get_units(10); // Promedio de 10 lecturas

    factor_escala = lectura / masa_real;

    balanza.set_scale(factor_escala);

    Serial.print("Factor de escala ajustado a: ");

    Serial.println(factor_escala);

    Serial.println("Calibración completada.");

}
```