

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES VISCOELÁSTICOS PARA
USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN PASIVA**

**CARLOS ANDRÉS RINCÓN VELÁSQUEZ
DIEGO FERNANDO CALDERÓN JERÉZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES VISCOELÁSTICOS PARA
USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN PASIVA**

**CARLOS ANDRÉS RINCÓN VELÁSQUEZ
DIEGO FERNANDO CALDERÓN JERÉZ**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DIRECTOR
MSc, DsC WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

Principalmente a Dios por regalarme vida y salud para cumplir cada una de mis metas y por sus innumerables bendiciones que me sigue dando hasta el día de hoy.

A mis padres Ana Isabel Jeréz León y Carlos Alberto Calderón Serrano por el apoyo incondicional que me brindaron en este proceso y a lo largo de toda mi vida, por enseñarme e inculcarme principios y valores para ser una persona correcta y por el inmenso amor que a diario me demuestran, todo lo que soy es gracias a ellos.

A Silvia Juliana Morales por ser mi acompañante en esta vida, y lograr una mejor versión de mí, sobrepasando cada obstáculo y ayudándome a entender que cada sacrificio conlleva a una buena recompensa.

Diego.

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso, que me dio sabiduría e inteligencia para poder alcanzar esta meta.

A mi madre Rosalba, mi padre Carlos y mi hermana Camila, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad. Su esfuerzo, para proporcionarme cada una de las cosas que he necesitado en este proceso, ha sido invaluable para mí. Su amor me motivó día a día para perseguir lo que quería. Me educaron y me formaron con reglas y con algunas libertades, y sus enseñanzas me permitieron alcanzar lo que me proponía.

Andrés

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. JUSTIFICACIÓN	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 VIBRACIONES MECÁNICAS	17
3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS	17
3.2.1 Vibraciones no amortiguadas.....	18
3.2.2 Vibraciones amortiguadas.....	18
3.3 GRADOS DE LIBERTAD DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS.....	18
3.4 MODELAMIENTO DE VIBRACIONES MECÁNICAS	20
3.5 AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS.....	21
3.6 TIPOS DE AMORTIGUACIÓN.....	22
3.6.1 Amortiguación activa.....	22
3.6.2 Amortiguación pasiva.....	22
3.7 MATERIALES USADOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN PASIVA.....	24
3.7.1 Materiales viscoelásticos	24
3.8 MODELOS REOLÓGICOS PARA MATERIALES VISCOELÁSTICOS.....	25

4. MARCO METODOLÓGICO	28
4.1 ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN	28
4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos.	28
4.1.2 Sensor de distancia.....	29
4.2 DIMENSIONES DEL MATERIAL	34
4.3 DIMENSIONES DEL SOPORTE DE PROBETAS	35
4.3.1 Masa	36
4.3.2 Lámina soporte	37
4.3.3 Soporte	37
4.3.4 Lámina inferior	38
4.4 MODELO MATEMÁTICO.....	38
4.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO	41
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
6. CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS	75
ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Representación matemática para las diferentes clases de vibraciones. ...	21
Tabla 2. Principales modelos reológicos para materiales viscoelásticos.	25
Tabla 3. Módulos empleados en el programa para la adquisición de datos	32
Tabla 4. Descripción de los componentes del banco.	33
Tabla 5. Descripción componentes del soporte.	36
Tabla 6. Resumen de la primera respuesta para 1 Hz.	50
Tabla 7. Resumen de la segunda respuesta de 1 Hz.	51
Tabla 8. Resumen de la tercera respuesta de 1 Hz.	53
Tabla 9. Valor promedio de cada parámetro para la frecuencia de 1 Hz.	54
Tabla 10. Resumen de la primera respuesta de 2 Hz.	56
Tabla 11. Resumen segunda respuesta de 2 Hz.	58
Tabla 12. Resumen tercera respuesta de 2 Hz.	59
Tabla 13. Valor promedio de cada parámetro para la frecuencia de 2 Hz.	60
Tabla 14. Resumen primera respuesta 3 Hz.	62
Tabla 15. Resumen segunda respuesta 3 Hz.	64
Tabla 16. Resumen tercera respuesta 3 Hz.	65
Tabla 17. Valor promedio de cada parámetro para 3 Hz.	66
Tabla 18. Resumen valor promedio para cada parámetro en las frecuencias restantes.	67
Tabla 19. Valor promedio de cada parámetro para 4 Hz.	81
Tabla 20. Valor promedio de cada parámetro para 5 Hz.	85
Tabla 21. Valor promedio de cada parámetro para 6 Hz.	89
Tabla 22. Valor promedio de cada parámetro para 7 Hz.	94
Tabla 23. Valor promedio de cada parámetro para 8 Hz.	98
Tabla 24. Valor promedio de cada parámetro para 9 Hz.	101
Tabla 25. Valor promedio de cada parámetro para 10 Hz.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vibraciones mecánicas con un grado de libertad.....	17
Figura 2. Vibraciones mecánicas con dos o más grados de libertad.	19
Figura 3. Viga en voladizo con infinitos grados de libertad.	19
Figura 4. Esquema general de viga tipo sándwich con núcleo viscoelástico.	23
Figura 5. Módulo de adquisición (NI-9234) y chasis (cDAQ-9178).	28
Figura 6. Sensor fotoeléctrico de distancia Wenglor-HN24MGV-P24.....	29
Figura 7. Esquema del circuito acondicionador de señal.	30
Figura 8. Configuración de LabView para la conexión del sensor y la adquisición de datos.	31
Figura 9. Banco de pruebas.....	33
Figura 10. Nomenclatura de las dimensiones de la muestra.	34
Figura 11. Componentes del soporte para las muestras.....	36
Figura 12. Dimensiones del soporte SK8.....	37
Figura 13. Dimensiones lámina inferior.....	38
Figura 14. Ajuste del modelo teórico con los datos experimentales para dos tipos de aceros empleados en la fabricación de rodamientos.	40
Figura 15. Comportamiento del ciclo de histéresis generado por el modelo, a partir de la variación de cada uno de sus parámetros.....	41
Figura 16. Ciclo de histéresis experimental para cada una de las diez frecuencias del ensayo.....	46

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. V_{OUT} vs V_2	31
Gráfica 2. Esfuerzo vs deformación de probeta de neopreno.....	35
Gráfica 3. Cadenas de Markov de la primera respuesta de 1 Hz.....	48
Gráfica 4. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 1 Hz.....	49
Gráfica 5. Cadenas de Markov de la segunda respuesta de 1 Hz.....	50
Gráfica 6. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 1 Hz.....	51
Gráfica 7. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 1 Hz.....	52
Gráfica 8. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 1 Hz.....	53
Gráfica 9. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 1 Hz.....	54
Gráfica 10. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 2 Hz.....	55
Gráfica 11. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 2 Hz.....	55
Gráfica 12. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 2 Hz.....	56
Gráfica 13. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 2 Hz.....	57
Gráfica 14. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 2 Hz.....	58
Gráfica 15. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 2 Hz.....	59
Gráfica 16. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 2 Hz.....	60
Gráfica 17. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 3 Hz.....	60
Gráfica 18. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 3 Hz.....	61
Gráfica 19. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 3 Hz.....	62
Gráfica 20. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 3 Hz.....	63

Gráfica 21. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 3 Hz.	64
Gráfica 22. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 3 Hz.....	65
Gráfica 23. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 3 Hz.....	66
Gráfica 24. Comportamiento de los parámetros promedio en el dominio de la frecuencia.	68
Gráfica 25. Comportamiento de los factores u_0 y u_j en el dominio de la frecuencia.	69
Gráfica 26. Comportamiento de K_b en el dominio de la frecuencia	70
Gráfica 27. Comportamiento de la deformación unitaria (γ) y el esfuerzo cortante (τ) experimentales en el dominio de la frecuencia.	71
Gráfica 28. Comportamiento de K_h y K en el dominio de a frecuencia.....	72
Gráfica 30. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 4 Hz.....	79

LISTA DE ANEXOS

a. Resultados obtenidos para 4 Hz.....	78
b. Resultados obtenidos para 5 Hz.....	82
c. Resultados obtenidos para 6 Hz.....	86
d. Resultados obtenidos para 7 Hz.....	90
e. Resultados obtenidos para 8 Hz.....	94
f. Resultados obtenidos para 9 Hz.....	98
g. Resultados obtenidos para 10 Hz.....	102
h. Data sheet sensor de distancia.....	106
i. Planos del soporte.....	107

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES VISCOELÁSTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN PASIVA

AUTORES: DIEGO FERNANDO CALDERÓN JERÉZ, CARLOS ANDRÉS RINCÓN VELÁSQUEZ.

PALABRAS CLAVES: Viscoelásticos, Neopreno, DMA, Caracterización, Rigidez.

DESCRIPCIÓN: Los materiales viscoelásticos son comúnmente usados en sistemas de amortiguación pasiva, con el fin de reducir la amplitud de las vibraciones mecánicas, o problemas mucho mayores como la resonancia, generada principalmente por fuerzas dinámicas en sistemas mecánicos y estructurales, aumentando así la confiabilidad y la vida útil de estos. De esta forma, el propósito de este trabajo es desarrollar una caracterización dinámica del neopreno, uno de los principales materiales viscoelásticos, en el dominio de la frecuencia, manteniendo las condiciones de temperatura constantes. Para esto se lleva a cabo un ensayo mecánico dinámico, sometiendo un par de probetas de este material a un esfuerzo de tipo cortante y siguiendo los parámetros establecidos en las normas ASTM D5024 y D5026. En la caracterización se emplea un modelo algebraico basado en ciclos de histéresis, el cual fue diseñado para caracterizar materiales reforzados con fibras elastoméricas. En este caso, el modelo algebraico es calibrado a partir del método de Inferencia Bayesiana, implementado a partir del algoritmo Monte Carlo Cadenas de Markov.

Como resultado, a partir de esta caracterización, se obtiene la rigidez del material, en un rango de frecuencia entre 1 y 10 Hz, además, se concluye que el modelo algebraico utilizado puede describir el comportamiento de materiales viscoelásticos a bajas frecuencias.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto Hernández.

ABSTRACT

TITLE: DYNAMIC CHARACTERIZATION OF VISCOELASTIC MATERIALS FOR USES IN PASSIVE DAMPING SYSTEMS.

AUTHORS: DIEGO FERNANDO CALDERÓN JERÉZ, CARLOS ANDRÉS RINCÓN VELÁSQUEZ.

KEY WORDS: Viscoelastic, Neoprene, DMA, Characterization, Stiffness.

DESCRIPCIÓN: Viscoelastic materials are commonly used in passive damping systems to reduce the amplitude of mechanical vibrations in mechanical or structural systems. Therefore, the goal of the present work is to apply an experimental analysis and develop a dynamic characterization of neoprene. Dynamical mechanical analysis is used to determine the behavior of the material in frequency domain and constant temperature, subjecting the specimens to a shear stress and following the parameters established in the ASTM D5024 and D5026 standards. The characterization uses an algebraic model based on hysteresis cycles, which was designed to characterize materials reinforced with elastomeric fibers. In this case, the algebraic model is calibrated from the Bayesian Inference method, implemented from the Monte Carlo Markov Chains algorithm.

As a result, the stiffness of the material is obtained, in a frequency range between 1 and 10 Hz. Furthermore, it is concluded that the algebraic model used can describe the behavior of viscoelastic materials at low frequencies.

* Bachelor thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto Hernández.

INTRODUCCIÓN

Existe en la práctica, un sin número de situaciones, donde la aparición de una fuerza dinámica, es decir, una fuerza que varía con el tiempo genera la excitación de un sistema. La presencia de estas fuerzas puede aumentar la amplitud de la de oscilación en el sistema, dando lugar a un problema de vibraciones o incluso generando resonancia mecánica.

Con el propósito de disminuir la respuesta dinámica del sistema, uno de los métodos implementados en los últimos años es el uso de elementos disipadores de energía. Su principal efecto es la reducción de la amplitud de las vibraciones (lo que conlleva a que el sistema sea más confiable o seguro), y se desarrolla principalmente a partir de dos tecnologías: Amortiguación pasiva y amortiguación activa. La amortiguación activa se desarrolla a partir del uso de fluidos magnéticos o dispositivos piezoeléctricos. Comercialmente, tiene un elevado costo de instalación y mantenimiento.

Por otra parte, la amortiguación pasiva es actualmente uno de los métodos usados para evitar las vibraciones no deseadas en un sistema. La amortiguación pasiva se desarrolla principalmente con el uso de materiales que permitan disipar energía, entre ellos los fluidos viscosos y los materiales viscoelásticos, los cuales son materiales elastoméricos, y que por su comportamiento ayudan a atenuar la respuesta del sistema. Para el diseño de sistemas de amortiguación pasiva, utilizando materiales viscoelásticos, es necesario conocer sus propiedades dinámicas para establecer la respuesta dinámica de un sistema donde son aplicados.

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de caracterizar los materiales viscoelásticos, para obtener información que contribuya al diseño de dispositivos de amortiguación pasiva a nivel regional y nacional. Así, este proyecto está orientado a la caracterización dinámica de estos materiales, con el fin de obtener sus propiedades dinámicas.

1. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en la industria ligera colombiana, se emplea de forma empírica materiales viscoelásticos (principalmente cauchos sintéticos; como el neopreno, polibutadieno, poliacritalo, entre otros) en el diseño de sistemas de amortiguación pasiva.

El conocimiento de las propiedades de estos materiales, a partir de la caracterización dinámica planteada en el desarrollo del proyecto, genera una mayor información para el usuario, acerca de cada uno de los materiales y su implementación en sistemas de amortiguación pasiva a nivel regional y nacional.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al propósito de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, fomentando la investigación y contribuyendo al desarrollo científico y tecnológico, mediante la caracterización dinámica de materiales viscoelásticos con el fin de estudiar su aplicación en sistemas de amortiguación pasiva.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

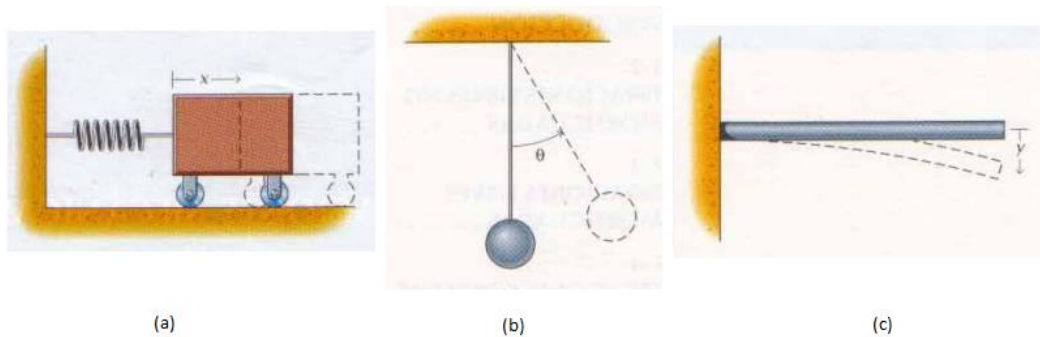
- Modelar el comportamiento dinámico de los materiales viscoelásticos (neopreno) a partir de uno de los modelos reológicos existentes.
- Construir un banco, que permita someter los materiales seleccionados a un esfuerzo dinámico de tipo cortante.
- Calibrar el modelo utilizado, para describir el comportamiento de los materiales, a partir del método de Inferencia Bayesiana.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 VIBRACIONES MECÁNICAS

Las vibraciones mecánicas hacen referencia al movimiento repetitivo que se presenta en cualquier elemento, con relación a un punto o posición de equilibrio, sin que exista desplazamiento. En ciertos casos las vibraciones traen grandes beneficios, mientras que, en algunas aplicaciones, como elementos mecánicos o estructurales no son deseadas, ya que afectan la naturaleza de su diseño o función original.¹

Figura 1. Vibraciones mecánicas con un grado de libertad



Fuente. Ingeniería mecánica: Dinámica. RILEY, William.

Como se aprecia en la figura 1, el sistema alcanzará nuevamente su punto de equilibrio, cuando la fuerza que lo excita sea igual a cero.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS

La clasificación de las vibraciones mecánicas depende de la naturaleza de la fuerza que excita el sistema, ya que si es una fuerza interna, la que hace que éste pierda su equilibrio, se denominan vibraciones libres. Mientras que, si es una fuerza

¹ Kelly S. Graham. Fundamentals of mechanical vibrations. McGraw Hill. (2000).pdf.

externa, se considera como vibraciones forzadas. De igual forma estas clasificaciones se subdividen en dos, vibraciones amortiguadas y no amortiguadas.²

3.2.1 Vibraciones no amortiguadas. Las vibraciones, libres o forzadas, no son amortiguadas cuando no existe en el sistema un mecanismo de disipación de energía, bien sea por fricción, resistencia del aire, amortiguamiento viscoso o cualquier tipo de fuerza, que se oponga a la oscilación del sistema, disminuyendo la amplitud de la respuesta dinámica.³

3.2.2 Vibraciones amortiguadas. Las vibraciones, libres o forzadas, son amortiguadas cuando en el sistema existe un mecanismo de disipación de energía. De forma inherente, todos los sistemas, mecánicos o estructurales, presentan un mecanismo o medio disipador de energía, aunque en algunos casos, por su baja capacidad para atenuar la respuesta del sistema, no son considerados en el análisis, sin tener una mayor alteración de los resultados.⁴

3.3 GRADOS DE LIBERTAD DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS

Los grados de libertad de un sistema son determinados a partir de las direcciones en que éste puede realizar su oscilación. En algunos casos, el movimiento oscilatorio de un sistema puede ser representado por coordenadas independientes, o también llamados grados de libertad ⁵.

Si el sistema puede ser representado por 1 coordenada independiente se estaría considerando entonces un sistema con un grado de libertad. En el caso de la figura 1 se presentan 3 modelos de 1 GDL, en el caso de la figura 1a, se tiene el eje x como coordenada independiente, mientras θ para la figura 1b y el eje y para la figura 1c.

² Ibid., p. 17.

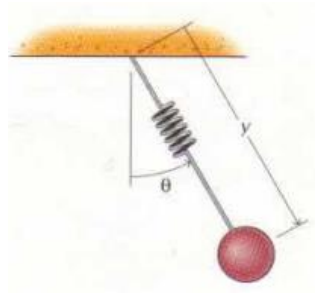
³ Ibid., p. 17.

⁴ Ibid., p. 17.

⁵ Addison Wesley. "Series in mechanical engineering and Mechanical Vibrations". (1990).pdf.

Los sistemas con dos o más grados de libertad pueden oscilar en dos o más direcciones, un ejemplo de esto se puede apreciar en la figura 2, donde el sistema puede oscilar en el eje y y θ ⁶.

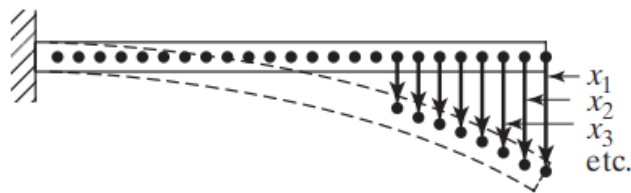
Figura 2. Vibraciones mecánicas con dos o más grados de libertad.



Fuente. Ingeniería mecánica: Dinámica. RILEY, William.

Gran cantidad de sistemas pueden ser descritos con una cantidad finita de grados de libertad (sistemas discretos), mientras otros, especialmente los que contienen elementos elásticos en su composición, tienen un número infinito de grado de libertad (sistemas continuos o distribuidos), como se puede apreciar en la figura 3 ⁷.

Figura 3. Viga en voladizo con infinitos grados de libertad.



Fuente. Mechanical vibrations. RAO, Singiresu.

⁶ Ibid., p. 18.

⁷ Ibid., p. 18.

3.4 MODELAMIENTO DE VIBRACIONES MECÁNICAS

Para el modelamiento de las vibraciones en sistemas mecánicos, se pueden representar a partir de un sistema masa-resorte (en el caso de las vibraciones no amortiguadas) o un sistema masa-resorte-amortiguador (para las vibraciones amortiguadas), el cual es modelado matemáticamente, para predecir su comportamiento en función del tiempo o de la frecuencia de oscilación del sistema⁸.

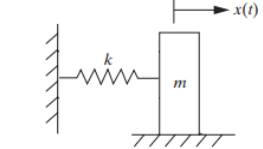
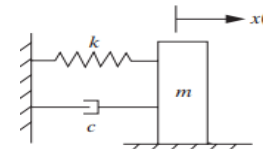
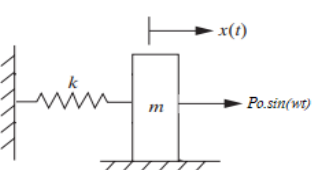
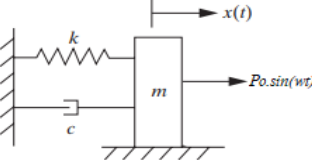
En algunos casos, estos tres componentes se pueden identificar por separado, por ejemplo, en un automóvil, donde la masa es representada por el cuerpo del auto, el resorte en el sistema de suspensión y la amortiguación en el sistema de absorción de impactos. En otras aplicaciones estos componentes se representan de forma inherente dentro del sistema, como es el caso de un ala de avión⁹.

En la tabla 1 se muestra el esquema y modelo matemático correspondiente para cada tipo de vibraciones mecánicas.

⁸ Inmam D. J. Engineering Vibration. 1996. Obtenido en

⁹ Krodkiwski J. M. Mechanical vibration. pp. 436 – 431. (2008).

Tabla 1. Representación matemática para las diferentes clases de vibraciones.

Tipo de vibración	Esquema	Ecuación
Libre no amortiguada		$m\ddot{x} + kx = 0$
Libre amortiguada		$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$
Forzada no amortiguada		$P_o \sin(\omega t) = m\ddot{x} + kx$
Forzada amortiguada		$P_o \sin(\omega t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx$

Fuente. Engineering vibrations. INMAN, Daniel.

Donde: x = deformación del sistema \dot{x} = velocidad de deformación, \ddot{x} = aceleración del sistema, k = constante de rigidez, c = constante de amortiguación, ω = frecuencia de oscilación, P_o = fuerza externa, m = masa del sistema.

3.5 AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS

Como se mencionó anteriormente, el concepto de amortiguación se introduce en el análisis de vibraciones, para tener en cuenta la disipación de energía en sistemas mecánicos o estructurales. El fenómeno de la amortiguación es ocasionado por diferentes mecanismos; rozamiento (fluido, seco o interno), impactos o mecanismos internos o moleculares, como los materiales viscoelásticos ¹⁰.

¹⁰ Inman. Op. cit., p. 20.

3.6 TIPOS DE AMORTIGUACIÓN

La capacidad de amortiguación de un sistema puede ser optimizada a partir de la implementación de dos mecanismos diferentes: amortiguación pasiva y amortiguación activa ¹¹.

3.6.1 Amortiguación activa. La amortiguación activa se desarrolla a partir de la implementación de un material o mecanismo, el cual, mediante un sistema de control, es capaz de modificar sus propiedades, con el fin de reducir la amplitud de oscilación de un sistema que trabaja con condiciones variables.

Es necesario aclarar que, el sistema de control del elemento disipador de energía, trabaja en función de las principales variables del sistema (esfuerzo, velocidad o aceleración), por eso, estas deben ser medidas constantemente ¹².

3.6.2 Amortiguación pasiva. A diferencia de la amortiguación activa, el diseño de sistemas de amortiguación pasiva tiene como objetivo absorber y disipar la energía a partir de principios que no necesitan alguna fuente de alimentación externa. La efectividad de los sistemas de amortiguación pasiva, varía en función de la frecuencia de oscilación del sistema, o de su temperatura ¹³. La implementación de amortiguación pasiva en un elemento estructural o mecánico, puede realizarse mediante dos métodos:

3.6.2.1 Amortiguación discreta. Los amortiguadores discretos son ampliamente utilizados en estructuras flexibles; consiste en la incorporación de un sistema que trabaja bajo el principio de péndulo con el fin de disipar energía. El principal ejemplo son los amortiguadores de masa sintonizada (TMD por sus siglas en inglés), los

¹¹ Inman. Op. cit., p. 20.

¹² Inman. Op. cit., p. 20.

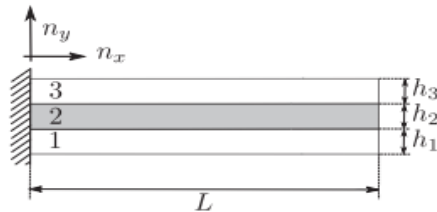
¹³ Inman. Op. cit., p. 20.

cuales se ajustan a la masa y frecuencia natural de la estructura donde son instalados ¹⁴.

3.6.2.2 Amortiguación distribuida. La amortiguación distribuida es un método muy simple, que consiste en agregar a la estructura una capa gruesa con un material de alta capacidad de disipación de energía. Esta capa disipa las vibraciones mecánicas, que se organizan por el esfuerzo al que es sometida la estructura ¹⁵.

Aunque este tipo de amortiguación se puede incorporar de forma inherente en las juntas de cada sección estructural, comúnmente se implementa de forma intercalada entre una estructura base y una capa de restricción, formando lo que se conoce como estructuras compuestas, o estructuras tipo sándwich, como la que se puede ver en la figura 4 ¹⁶.

Figura 4. Esquema general de viga tipo sándwich con núcleo viscoelástico.



Fuente. Uncertainty propagation analysis in laminated structures with viscoelastic core. PINTO, William. CASTELLO, Daniel. RITTO, Thiago.

¹⁴ Lakes R. S. Viscoelastic measurement techniques. *Review of Scientific Instruments*. 75, 797-810. (2004).

¹⁵ Creus G. J. Representación De Materia: Los Viscoelasticos Con Aplicación a Estructuras De Hormigón. Parte I: Viscoelasticidad Lineal. "Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería". pp. 125 – 151. (1989).

¹⁶ Hernández W. P. Castello D. A. and Ritto T. G. "Uncertainty propagation analysis in laminated structures with viscoelastic core". pp. 23 – 37. (2016).

3.7 MATERIALES USADOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACIÓN PASIVA

A pesar de que en la práctica se utiliza un sin número de materiales, para el diseño de sistemas de amortiguación pasiva, por lo anteriormente planteado, el desarrollo de este proyecto únicamente se centrará en los materiales viscoelásticos ¹⁷.

3.7.1 Materiales viscoelásticos. Los materiales viscoelásticos (VEM por sus siglas en inglés), son ampliamente utilizados para la amortiguación pasiva en aplicaciones comerciales y aeroespaciales. Son materiales elastoméricos cuyas moléculas de cadena larga les permite acomodarse ante un estado de esfuerzo, lo cual permite disipar la energía mecánica existente en el sistema, gracias a su comportamiento elástico-viscoso ¹⁸.

La capacidad de almacenamiento y disipación de energía de los VEM se describe comúnmente en términos de un módulo complejo (\tilde{G}), el cual es dependiente de la frecuencia de oscilación y la temperatura del sistema ¹⁹.

$$\tilde{G}(\omega, T) = G^*(\omega, T) + G_0(\omega, T) = G_0(\omega, T)[1 + i\eta(\omega, T)] \quad (1)$$

$$\eta = G^*/G_0 \quad (2)$$

La parte real (G_0) e imaginaria (G^*), son llamados módulo de almacenamiento y módulo de disipación, respectivamente, mientras que η representa el factor de pérdida de energía en el sistema.

¹⁷ Gutierrez Lemini D. Engineering viscoelasticity. 2014.

¹⁸ Ibid., p. 24.

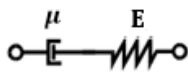
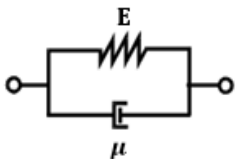
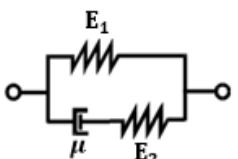
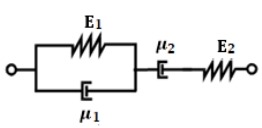
¹⁹ Masterson P. A. Method for the determination of complex shear modulus of viscoelastic adhesives. pp. 276 – 281.pdf

3.8 MODELOS REOLÓGICOS PARA MATERIALES VISCOELÁSTICOS

Los modelos reológicos se usan para describir el comportamiento de los materiales viscoelásticos (medir la capacidad de almacenamiento y disipación de energía), relacionando la deformación del material con el esfuerzo al que son sometidos ²⁰.

Del mismo modo que los modelos usados para describir el comportamiento de sistemas con vibraciones mecánicas, algunos de los modelos reológicos para materiales viscoelásticos se plantean en base a un sistema masa, amortiguador y resorte, variando su configuración, como se aprecia en la tabla 2 ²¹.

Tabla 2. Principales modelos reológicos para materiales viscoelásticos.

Modelo	Esquema	Ecuación
Maxwell		$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\mu}$
Kelvin-Voigt		$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \mu \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$
Zener		$(E_1 + E_2) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{E_2}{\mu} \left(\mu \frac{d\sigma(t)}{dt} + \sigma(t) \right) - E_1 \varepsilon(t)$
Burger		$\begin{aligned} \sigma(t) + \left(\frac{\mu_1}{E_1} + \frac{\mu_1}{E_2} + \frac{\mu_2}{E_2} \right) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \left(\frac{\mu_1 \mu_2}{E_1 E_2} \right) \frac{d^2 \sigma(t)}{dt^2} \\ = \mu_1 \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \left(\frac{\mu_1 \mu_2}{E_2} \right) \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} \end{aligned}$

Fuente. Characterization of vibration damping mount. STORK, Heiner.

²⁰ Mainardi, F. and Spada G. Creep, relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology. Physical Journal: Special Topics. 193(1), pp. 133 – 160. (2011).

²¹ Storck H. and Sumali H. Characterization of a vibration damping mount. 1999. Obtenido en <https://doi.org/10.4271/1999-01-2816>.

Donde: $\varepsilon(t)$: Deformación del material en función del tiempo, $\sigma(t)$: Esfuerzo en función del tiempo, E y η el módulo de elasticidad y la viscosidad del material, respectivamente.

También es posible predecir el comportamiento de los materiales viscoelásticos a partir de modelos de histéresis, los cuales relacionan las variables de entrada con las variables de salida, a las que son sometidas las muestras en un ensayo dinámico. Estos modelos pueden ser desarrollados estableciendo la deformación como variable de entrada, y el esfuerzo como variable de salida, o viceversa ²².

3.9 INFERENCIA BAYESIANA

Como se mencionó en los objetivos, para este trabajo se planteó calibrar los datos teóricos (modelo matemático) y los datos experimentales a partir del modelo estadístico de Inferencia Bayesiana.

Este modelo realiza un análisis de las probabilidades a partir de valores previos de un sistema aleatorio, es decir, el valor previo de un parámetro es una construcción arbitraria utilizada para guiar el análisis del estadístico. Los elementos de la formulación bayesiana de la inferencia establecen una distribución marginal para θ , denominada distribución previa, o probabilidad a priori y un conjunto de distribuciones condicionales para los datos X dado θ , es decir $\{f_{\theta} : \theta \in \Omega$. Por ley de la probabilidad total, estos elementos especifican una distribución conjunta para (x, θ) , es decir:

$$\pi(\theta)f_{\theta}(x)$$

²² Vaiana, N. Sessa, S. Marmo, F. Rosati, L. "An Accurate and Computationally Efficient Uniaxial Phenomenological Model for Steel and Fiber Reinforced Elastomeric Bearings ". pp. 196-212. (2019).

Donde π representa la probabilidad o función de densidad asociada con la probabilidad a priori. Cuando la distribución previa es totalmente continua, la distribución marginal para x viene definida por:

$$m(x) = \int_{\Omega} \pi(\theta) f_{\theta}(x) d\theta$$

y se denomina distribución previa predictiva de los datos.

Naturalmente, cuando la distribución previa de θ es discreta se sustituye la integral por el sumatorio. Si no se ha observado ningún dato, la distribución previa predictiva es la distribución pertinente para establecer probabilidades sobre el valor desconocido de x . De forma análoga, la distribución previa de π es la distribución adecuada para establecer valores de probabilidad sobre θ antes de obtener x ²³.

²³ Evans, M. Seth, J. Probabilidad y estadística. La ciencia de la incertidumbre. 2004.

4. MARCO METODOLÓGICO

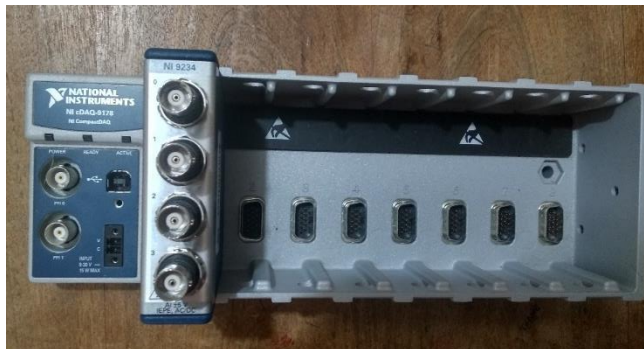
A continuación, se muestra toda la instrumentación empleada para llevar a cabo los ensayos de caracterización, así como el modelo matemático y el procedimiento de calibración para hallar los parámetros que definen el comportamiento del neopreno.

4.1 ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN

La caracterización del material se realizó a partir de un ensayo mecánico-dinámico (DMA), además, se siguieron los parámetros establecidos (dimensiones de los especímenes, condiciones del ensayo y calibración la instrumentación) en las normas ASTM D5024 y ASTM D5026, las cuales hacen referencia a la medición de propiedades mecánicas y dinámicas de materiales plásticos a partir de un ensayo de compresión y de tensión, respectivamente.

4.1.1 Tarjeta de adquisición de datos. Para realizar el proceso de adquisición de datos, se utilizó el módulo de sonidos y vibraciones NI-9234, el cual se conforma de cuatro canales de entrada para la lectura de señales de tipo analógica, que varían desde -5V hasta +5V. Este módulo fue conectado al chasis cDAQ-9178, que permite una conexión con *LabView*, para almacenar los datos tomados en el ensayo. En la figura 5 se muestra la conexión del sensor y el módulo.

Figura 5. Módulo de adquisición (NI-9234) y chasis (cDAQ-9178).



4.1.2 Sensor de distancia. El sensor de distancia empleado para el desarrollo de las pruebas fue el *Wenglor-HN24MGV-P24*, del laboratorio de vibraciones mecánicas, el cual es un sensor fotoeléctrico, de tipo reflectivo, tiene un rango de trabajo entre 55 y 155 mm, con una resolución de 500 μm , una linealidad de 1% y se muestra en la figura 6.

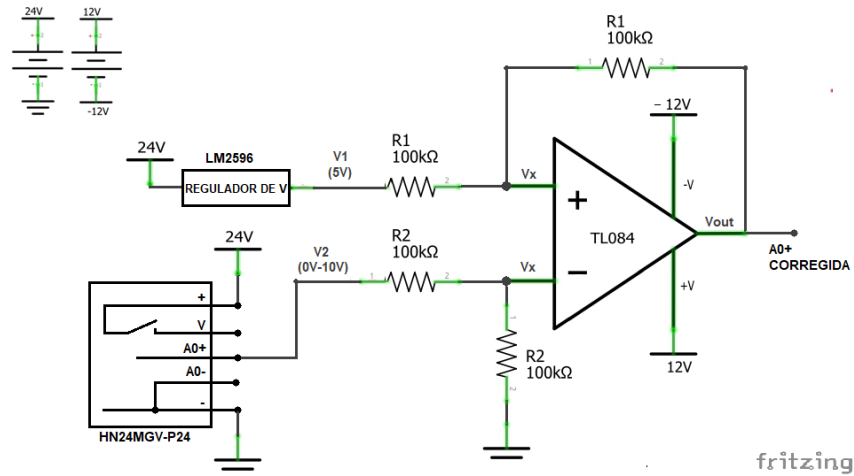
Figura 6. Sensor fotoeléctrico de distancia Wenglor-HN24MGV-P24.



Fuente: Datasheet sensor Wenglor-HN24MGV-P24.

Debido a que la señal de salida analógica de este sensor varía desde 0V a 10V, dependiendo de la distancia entre el objeto y el sensor emisor, fue necesario realizar un proceso de acondicionamiento de señal, para poder realizar una conexión entre éste y el módulo de adquisición de datos. En el esquema plasmado en la figura 7, se muestra la configuración del circuito restador que se diseñó, a partir un amplificador operacional TL084.

Figura 7. Esquema del circuito acondicionador de señal.



La señal de salida de esta configuración (V_{OUT}) depende de la señal analógica variable que genera el sensor, en este caso V_2 , mientras que V_1 corresponde a una tensión constante que se gradúa previamente en el regulador de tensión (LM2596). Además, el TL084 necesita ser alimentado por ± 12 V, por esto, fue necesario agregar un módulo de fuente dual al circuito, que permitiera obtener una tensión negativa de la fuente, ya que ésta va únicamente desde 0V hasta 32V.

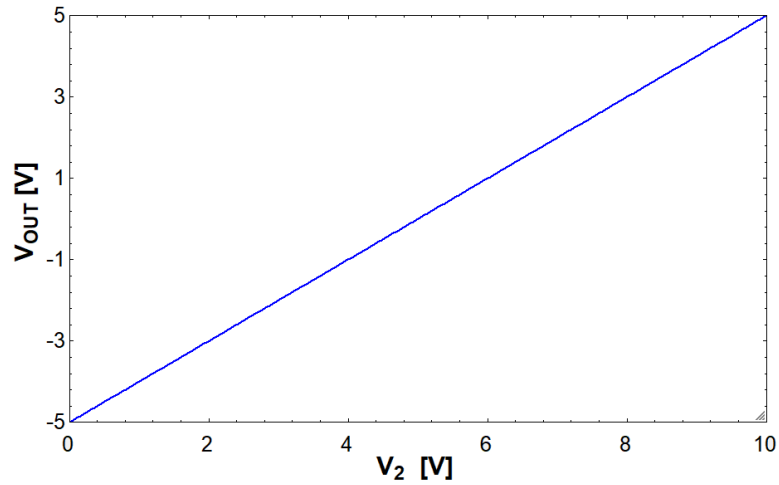
Para esta configuración del amplificador operacional (amplificador restador) se tiene el siguiente planteamiento matemático:

$$\frac{V_1 - V_X}{R_1} = \frac{V_X - V_{OUT}}{R_2} \quad (3)$$

$$V_X = \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

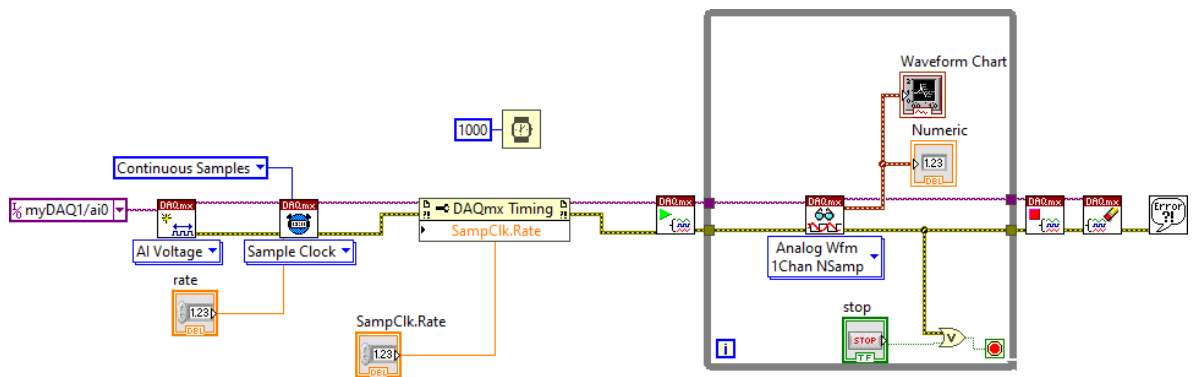
Igualando las ecuaciones 3 y 4, y reemplazando los valores de las constantes del circuito, es decir V_1 (5V), R_1 y R_2 (100kΩ respectivamente), y considerando V_2 desde 0V hasta 10V, obtenemos el valor de V_{OUT} , que como vemos en la gráfica 1, varía desde -5V a 5V.

Gráfica 1. V_{OUT} vs V_2




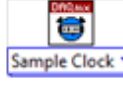

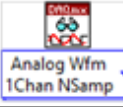


De esta forma, la señal del sensor de distancia (A0- y A0+ corregida), puede ser conectada sin ningún inconveniente al canal de entrada del NI-9234, pues el diferencial de tensión que se genera (desde -5V hasta 5V), ya se encuentra dentro del rango de adquisición de este dispositivo. En la figura 8 se muestra la configuración realizada en *LabView*, para recolectar y almacenar la información de este sensor, por medio de la NI-9234 y el chasis cDAQ-9178.

Figura 8. Configuración de *LabView* para la conexión del sensor y la adquisición de datos.



Los módulos de adquisición y procesamiento de datos empleados en este esquema son los que se muestran en la tabla 3, propios de *ELVIS mx*, controlador gratuito de *National Instruments* para para este tipo de tarjetas de adquisición.

Tabla 3. Módulos empleados en el programa para la adquisición de datos

Nombre del módulo	Icono
Create Virtual Channel	
Timing	
Start	
Read	
Stop	
Clear	

4.1.3 Banco de pruebas. Para llevar a cabo los ensayos de caracterización, se empleó la *MTS Bionix*, del laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Industrial de Santander. En este caso, se emplea el montaje que se muestra en la figura 11 para poder someter las muestras a un esfuerzo de tipo cortante. En la tabla 4 se especifican cada uno de los componentes del montaje, mientras que en el esquema de la figura 9, se muestra de forma detallada el montaje de las muestras y la masa oscilante.

Figura 9. Banco de pruebas.



Tabla 4. Descripción de los componentes del banco.

Elemento	Descripción
1	Soporte superior MTS
2	Masa oscilante
3	Par de muestras
4	Soporte estructural de las muestras
5	Sensor laser de distancia
6	Soporte inferior MTS

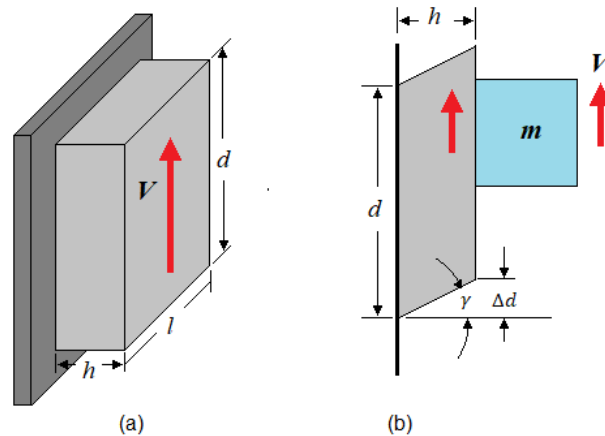
De esta forma, la masa, guiada por el soporte superior, somete al material a una fuerza axial variable. Esta fuerza, que por el montaje empleado se traduce a un esfuerzo cortante ($\tilde{\tau}$), genera en el material una deformación angular ($\tilde{\gamma}$). La relación de estas variables representa la componente experimental del modelo matemático planteado en la ecuación 14, es decir $\tilde{\sigma}/\tilde{\epsilon}$. Este procedimiento se repite

a diferentes niveles de frecuencia (bajas frecuencias más precisamente, desde 1 hasta 10 Hz), y manteniendo constante la temperatura del material (25 °C).

4.2 DIMENSIONES DEL MATERIAL

Considerando la presentación del neopreno a nivel industrial, el rango de dimensiones permisible que se establece en las normas mencionadas anteriormente y el espacio disponible en el banco de pruebas para ubicar los especímenes, se asumen muestras con un área transversal de 20 x 20 mm, y a partir de esto, se calcula su espesor, empleando la ecuación 5 que se muestra a continuación, donde h representa el espesor del material, Δd la mitad del desplazamiento lineal de la masa, y γ la deformación angular del material.

Figura 10. Nomenclatura de las dimensiones de la muestra.

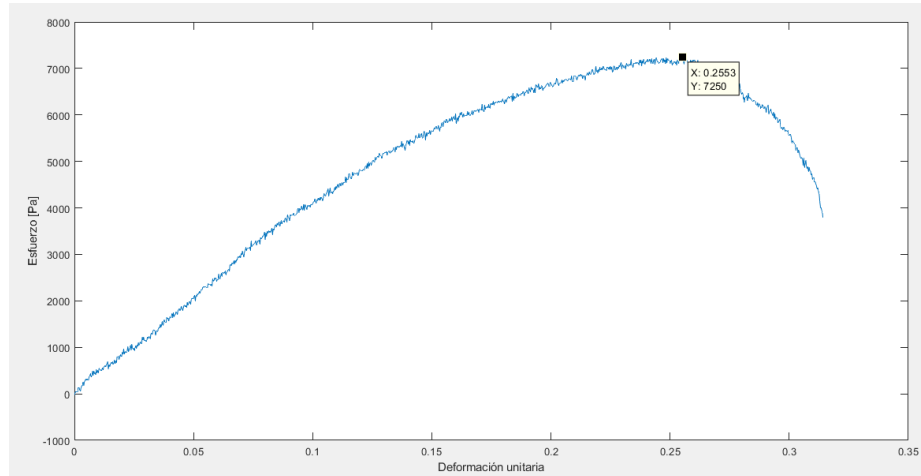


$$h = \Delta d / \tan(\gamma) \approx \Delta d / \gamma \quad (5)$$

El valor de Δd se establece como el triple de la deformación unitaria en el fallo de una probeta del mismo material, con igual área transversal (20 x 20 mm), y 100 mm de longitud inicial, que es sometida a un ensayo de tracción. Además, se plantea que el valor de h no debe superar 10 veces el valor del desplazamiento lineal de la

masa excitadora del sistema ($2 * \Delta d$). En la gráfica 2 se muestra el comportamiento del material en este ensayo.

Gráfica 2. Esfuerzo vs deformación de probeta de neopreno.



En este gráfico se puede apreciar que la deformación unitaria última del material es de 0,2553. A partir de esto se calculan Δd y h :

$$\Delta d = 3(0,2553) = 0,7659 \text{ mm}$$

$$h = 2(0,7695\text{mm}) * 10 = 15,318 \text{ mm} \approx 15\text{mm}$$

Con estas dimensiones, se elaboraron tres pares de probetas para ser sometidas al ensayo mecánico-dinámico.

4.3 DIMENSIONES DEL SOPORTE DE PROBETAS

Para calcular las dimensiones de cada uno de los componentes que se muestran a continuación, se tomó como referencia el espacio permisible de trabajo, y las dimensiones de las dos probetas, las cuales harán parte del sistema. En la figura 11 se muestra cada uno de los componentes del soporte, los cuales se describen posteriormente en la tabla 5.

Figura 11. Componentes del soporte para las muestras.

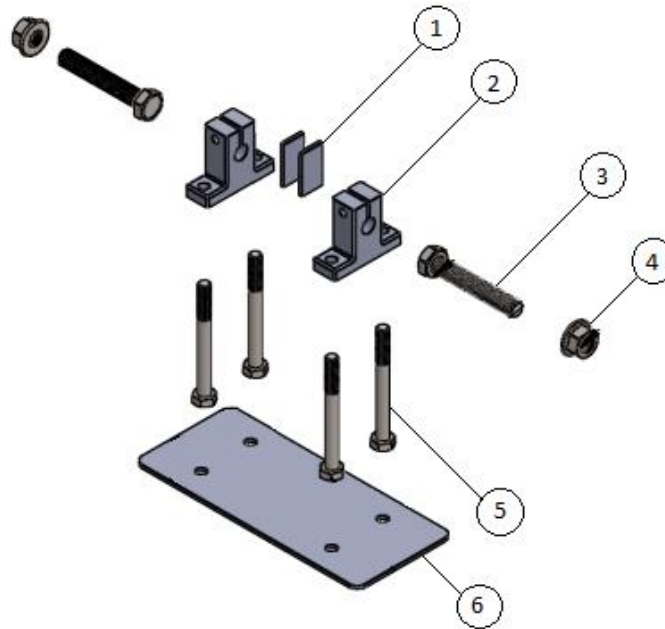


Tabla 5. Descripción componentes del soporte.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA
1	LAMINA SOPORTE
2	SOPORTE SK8
3	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M8 x 1.25 x 60 --18CS
4	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M8 x 1.25 --S
5	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x 1.0 x 50 --50WS
6	LAMINA INFERIOR

4.3.1 Masa

Para la fabricación de la masa excitadora del sistema, o masa oscilante (numeral 2 de la figura 9) se empleó un perfil cuadrado de acero de 1 in, cortado a una profundidad de 1n, soldado a un perfil redondo de acero con diámetro de 8 mm.

4.3.2 Lámina soporte

Fabricadas en lámina de acero cold rolled de calibre 20, y sus dimensiones se calcularon en función del área transversal de las muestras, agregando una tolerancia de 5 mm en cada uno de los extremos de esta, de esta forma cada uno de los lados de esta lámina tiene la siguiente dimensión:

$$L = L_{st_{probeta}} + 5 \text{ mm} = 20 \text{ mm} + 10 \text{ mm}$$

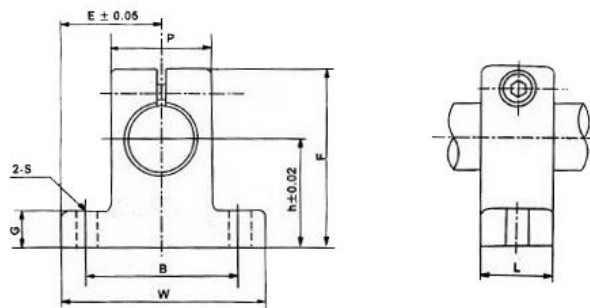
$$L = 30 \text{ mm}$$

Estas láminas permiten ajustar las probetas a la masa para garantizar un esfuerzo cortante sobre éstas.

4.3.3 Soporte

Se emplearon soportes de aluminio SK8 para poder sostener el eje soldado a las láminas soporte. A continuación, en la figura 12, se muestran las dimensiones (estándar) de este soporte.

Figura 12. Dimensiones del soporte SK8.



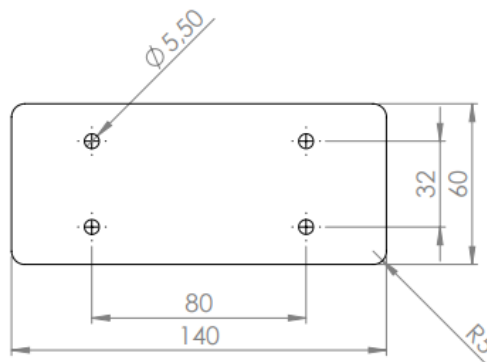
	Rod Dia.	h	E	W	L	F	G	P	B	S	Set Screw	Attach Screws	Weight (kg)
SK8	8	20	21	42	14	32.8	6	18	32	5.5	M4	M5	0.024

Fuente. Naylamp Mechatronics.

4.3.4 Lámina inferior

Construida en lámina de acero cold rolled de calibre 20, con una longitud lateral de 60 mm, en función de B (dimensión del soporte SK8 descrita en la figura 12), y una longitud frontal de 140 mm, dimensión que se estableció con el fin de dar un margen de tolerancia para realizar el ajuste de futuras muestras, con un mayor espesor. En la figura 13 se muestran las dimensiones de esta lámina.

Figura 13. Dimensiones lámina inferior.



4.4 MODELO MATEMÁTICO

De esta forma, para la caracterización del material, se utilizará como referencia el trabajo desarrollado por Vaiana et. al., en el cual, se desarrolla un modelo matemático en el que se determina la rigidez y la rigidez a cortante del material, a partir de varios ciclos de histéresis, obtenidos en un ensayo dinámico.

Estos ciclos se generan a partir de dos variables: deformación generalizada (u) y esfuerzo generalizado (f). El cálculo de estas variables se hace en un ciclo *for*, pero para esto, es necesario definir sus valores iniciales, tal y como se muestra a continuación:

$$u_0 = 1 / 2 \cdot \left[\left(\left[\frac{ka_1 - kb_1}{10} \right]^{-20} \right)^{\left(\frac{1}{\alpha} \right)} - 1 \right] \quad (6)$$

$$f_0 = \frac{\left[\frac{ka_1 - kb_1}{2} \right] \cdot [(1 + 2 \cdot u_0)^{(1 - \alpha)} - 1]}{1 - \alpha} \quad (7)$$

Donde u_0 y f_0 son los valores iniciales de deformación y esfuerzo generalizado, respectivamente, ka_1 , kb_1 , son factores relacionados con la rigidez y α representa la velocidad de cambio de rigidez del material.

Además, se asume que:

$$u = \gamma_{Exp} \quad dt = 1/512 \quad v = du/dt$$

Donde γ_{Exp} son los datos experimentales de deformación unitaria del material, dt tiene una relación inversamente proporcional con la frecuencia de muestreo del ensayo (512 Hz) y v es la velocidad de deformación unitaria. Por último, para comenzar el ciclo for en MATLAB, se asume un vector n , que tiene el mismo tamaño de u , es decir, $n = \text{length}(u)$, y un vector $f = \text{zeros}(1,n)$.

```
for i = 2:n-1

    uj = u(i-1)+sign(v(i))*(1+2*u0)-sign(v(i))*(((sign(v(i))*(1-
    alfa1))/(ka1-kb1))*(f(i-1)-beta1*u(i-1)^3-beta2*u(i-1)^5-kb1*u(i-1)-
    sign(v(i))*f0+(ka1-kb1)*((1+2*u0)^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-
    alfa))))^(1/(1-alfa)));

    if (sign(v(i)*uj)-2*u0 < sign(v(i)*u(i) || sign(v(i))*u(i) <
    sign(v(i))*uj

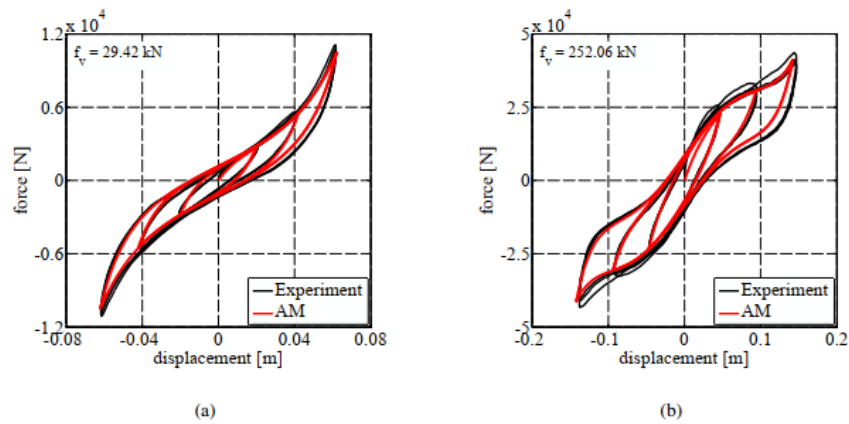
        f(i) = beta1*u(i)^3+beta2*u(i)^5+kb1*u(i)+(ka1-
        kb1*((1+2*u0+sign(v(i))*(u(i)-uj))^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-
        alfa)))-((1+2*u0)^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-
        alfa)))+sign(v(i))*f0;

    else
        f(i) = beta1*u(i)^3+beta2*u(i)^5+kb1*u(i)+sign(v(i))*f0;
    end
end
```

Donde β_1 y β_2 son factores relacionado con la rigidez a cortante del material. Con el fin de obtener un porcentaje de error mínimo entre el modelo teórico con los datos

experimentales, se genera una cadena de Markov para cada uno de los parámetros (ka_1 , kb_1 , α , β_1 y β_2), y a partir del método de inferencia Bayesiana, se evalúa la probabilidad de que estos generen un ajuste adecuado, como el que se muestra en la figura 14, donde la función en negro representa los datos experimentales, y la roja, los datos obtenidos a partir del modelo teórico.

Figura 14. Ajuste del modelo teórico con los datos experimentales para dos tipos de aceros empleados en la fabricación de rodamientos.



Fuente: An Accurate and Computationally Efficient Uniaxial Phenomenological Model for Steel and Fiber Reinforced Elastomeric Bearings. VAIANA, Nicolo. SESSA, Salvatore. MARMO, Francesco. ROSATI, Luciano.

Una vez calculados estos parámetros, es posible hallar la rigidez (K_h) y rigidez cortante (K_c), a partir de las siguientes ecuaciones:

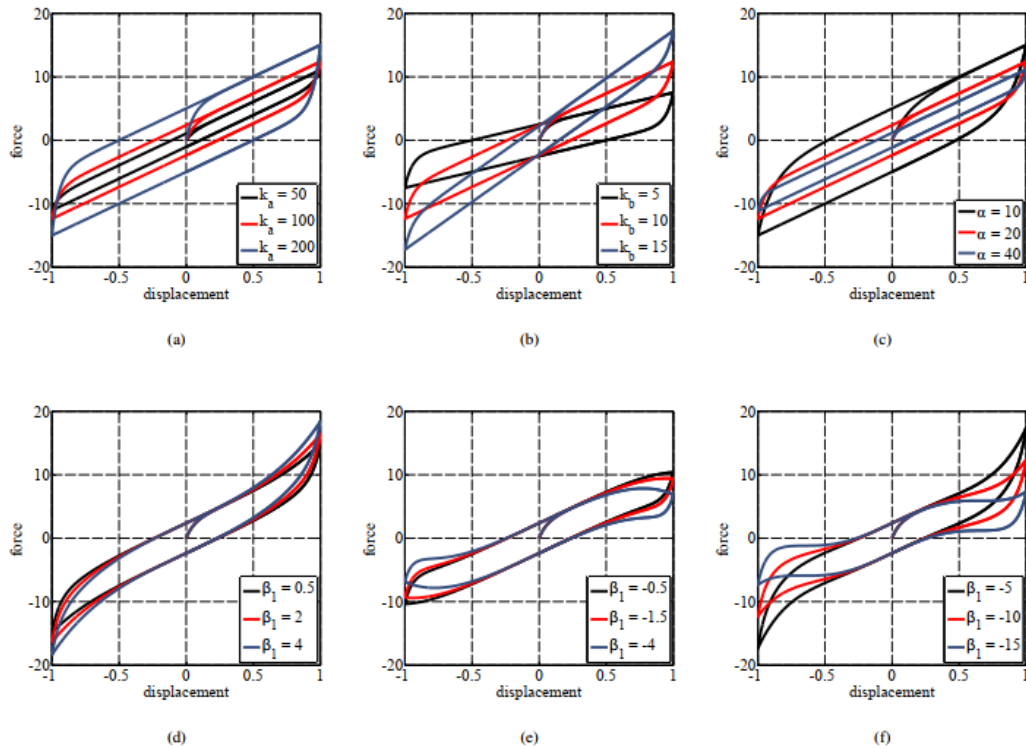
$$K_h = K_b + \frac{K_a - K_b}{[1 + u_p^{-1} \cdot (-u_p + u_j + 2 \cdot u_0)]^\alpha} \quad (8)$$

$$K_c = \beta_1 \cdot u_p^3 + \beta_2 \cdot u_p^5 \quad (9)$$

Donde u_j y u_0 son factores calculados anteriormente, y u_p es un parámetro que el autor recomienda asumir como 1. En la figura 15 se muestra como varía la respuesta

del modelo teórico, a partir de la variación, de forma independiente, de cada uno de los parámetros (ka_1 , kb_1 , α , β_1 y β_2).

Figura 15. Comportamiento del ciclo de histéresis generado por el modelo, a partir de la variación de cada uno de sus parámetros.



Fuente: An Accurate and Computationally Efficient Uniaxial Phenomenological Model for Steel and Fiber Reinforced Elastomeric Bearings. VAIANA, Nicolo. SESSA, Salvatore. MARMO, Francesco. ROSATI, Luciano.

4.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La implementación del modelo estadístico, Inferencia Bayesiana, se realizó a partir del algoritmo Monte Carlo Cadena de Markov (MCMC), para el cual, en primer lugar, se definieron las variables de orden experimental que se muestran a continuación.

Load data se encarga de cargar al código los valores obtenidos del ensayo, como lo es la matriz A, que se menciona a continuación y hace referencia a los datos

experimentales de esfuerzo cortante y deformación unitaria para cada una de las frecuencias trabajadas. Además, los datos experimentales cargados al programa, contiene la desviación estándar (std) de los ciclos de histéresis considerados para el análisis de cada frecuencia.

```
load data
a = 512; %Total de datos para cada frecuencia
b = a/2;
TauE = A(b+1:end, :)/1000; %./1000 pasa de Kpa a Mpa
GammaE = A(1:b, :)/1000; %./1000 pasa de Kpa a Mpa
Yexp = [TauE(:,2),GammaE(:,2)]; % Creación de la matriz experimental
MC = std.^2; % Vector covarianza a partir de la
desviación estandar de los ciclos de cada frecuencia

t = (1:size(GammaE,1))*dt;
Mcovar = diag(MC(1:a)); % Matriz de covarianza
```

Con estos datos se comienza la simulación del algoritmo MCMC, el cual realiza una variación de los parámetros del modelo, en función de la matriz de covarianza, la cual se calculó con anterioridad a partir de la desviación estándar de los datos experimentales. De esta forma se compara el comportamiento de estos parámetros, con el comportamiento experimental del material.

```
% Identificacion del modelo utilizando MCMC

nsimu = 1000; % Número de simulaciones
aceptadas = 1;
oldpar = [kai,kbi,alphai,beta1i,beta2i]; % Valor inicial de los
parámetros

npar = length(oldpar);
W0 = [ka,kb,alpha,b1,b2]; % Variación de los
parámetros

W = diag(W0);
x_certos = oldpar; % Datos aceptados
LogPost=[];
Sigma = inv(Mcovar); % Desviación estandar
erro = Erro_Hysteretic_model(oldpar,Yexp,t); % Función error
LogPDF_post = -0.5 .* erro' .* Sigma .* erro;
```

El comportamiento de estos datos se evalúa en la función error, que se muestra a continuación:

```

function erro = Erro_Hysteretic_model(P,Yexp,t)

    ka    = P(1); %model parameter
    kb    = P(2); %model parameter
    alfa  = P(3); %model parameter
    beta1 = P(4); %model parameter
    beta2 = P(5); %model parameter

    dt=1/512; % Frecuencia de adquisición de datos en el ensayo
    u = Yexp(:,2); % Deformación unitaria experimental
    v = diff(u/dt); % Velocidad de deformación
    n = length(u);

    %1.2 Compute the internal model parameters
    u0    = (1/2)*(((ka-kb)/10^-20)^(1/alfa))-1);
%internal model parameter
    tau0   = ((ka-kb)/2)*(((1+2*u0)^(1-alfa))-1)/(1-alfa));
%internal model parameter
    %1.3 Initialize the generalized force vector
    tau    = zeros(1, n);

    %% 2. CALCULATIONS AT EACH TIME STEP

    for i = 2:n-1 % el (-1) es a causa que estoy
escogiendo diff, se reduce en uno la dimension
        %2.1 Update the history variable
        uj = u(i-1)+sign(v(i))*(1+2*u0)-sign(v(i))*(((sign(v(i))*(1-
alfa)/(ka-kb))*(tau(i-1)-beta1*u(i-1)^3-beta2*u(i-1)^5-kb*u(i-1)-
sign(v(i))*tau0+(ka-kb)*(((1+2*u0)^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-
alfa))))^(1/(1-alfa)))));

        %2.2 Evaluate the generalized force at time t
        if (sign(v(i))*uj)-2*u0 < sign(v(i))*u(i) || sign(v(i))*u(i) <
sign(v(i))*uj
            tau(i) = beta1*u(i)^3+beta2*u(i)^5+kb*u(i)+(ka-
kb)*(((1+2*u0+sign(v(i))*(u(i)-uj))^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-alfa)))-
(((1+2*u0)^(1-alfa))/(sign(v(i))*(1-alfa))))+sign(v(i))*tau0;
        else
            tau(i) = beta1*u(i)^3+beta2*u(i)^5+kb*u(i)+sign(v(i))*tau0;
        end
    end
end
Ye = Yexp(1:512);
erro = Ye(:,1)-tau(1:512)';

```

A continuación, se genera la función PDF, la función CDF y se calcula el porcentaje de datos aceptados a partir de la simulación. Estos valores son importantes para el posterior análisis de los resultados obtenidos.

```

for i = 2:nsimu
    % inicio grafico

```

```

if mod(i, round(nsimu/10)) == 0 & i==nsimu
    time=toc;
    disp(['Va el [%]: ',num2str(i/nsimu*100)]);
    fprintf('tiempo: %.2f segundos \n', time);

    Es = ['P1';'P2';'P3'];
    for k = 1:npar
        %figure(2)
        subplot(npar,1,k);
        plot(x_certos(:,k));grid on
    end
    pause(1)
end
% end grafico

newpar = (oldpar + randn(1,npar)*W);
erro = Erro_Hysteretic_model(newpar,Yexp,t);
loglike = -0.5 .* erro' .* Sigma .* erro;
u = rand;

if (loglike - LogPDF_post) > log(u);
    oldpar = newpar;
    LogPDF_post = loglike;
    LogPost = [LogPost; LogPDF_post];
    x_certos = [x_certos; oldpar];
    aceptadas = aceptadas + 1;
end
end

fprintf('La taxa de aceitação e: %.2f %% \n', aceptadas/nsimu*100);

theta_M1=x_certos;
burning = fix(size(theta_M1,1)/2);
%theta_M1=theta_M1(1:end,:);

TM1 = theta_M1(end-burning:end,:);

Parametros = mean(TM1)
Standard_d = std(TM1)
Coef_varia = Standard_d./Parametros*100

%% PDFs and CDFs

figure()
[S1,S2,S3]=PDF_CDF(TM1);
set(gcf, 'Name', 'CDF Modelo Ogden 2P')

function [S1,S2,S3] = PDF_CDF( TM )

np = size(TM,2); % numero deparametros

for ii=1:np

```

```
%Impar, plotar PDF
subplot(np,2,2*ii-1)
[a,b]=ksdensity(TM(:,ii));%,'Support','positive');%

plot(b,a); grid on
xlabel(['Parametro ',num2str(ii)])
ylabel('PDF')

% Par, plotar CDF
subplot(np,2,2*ii)

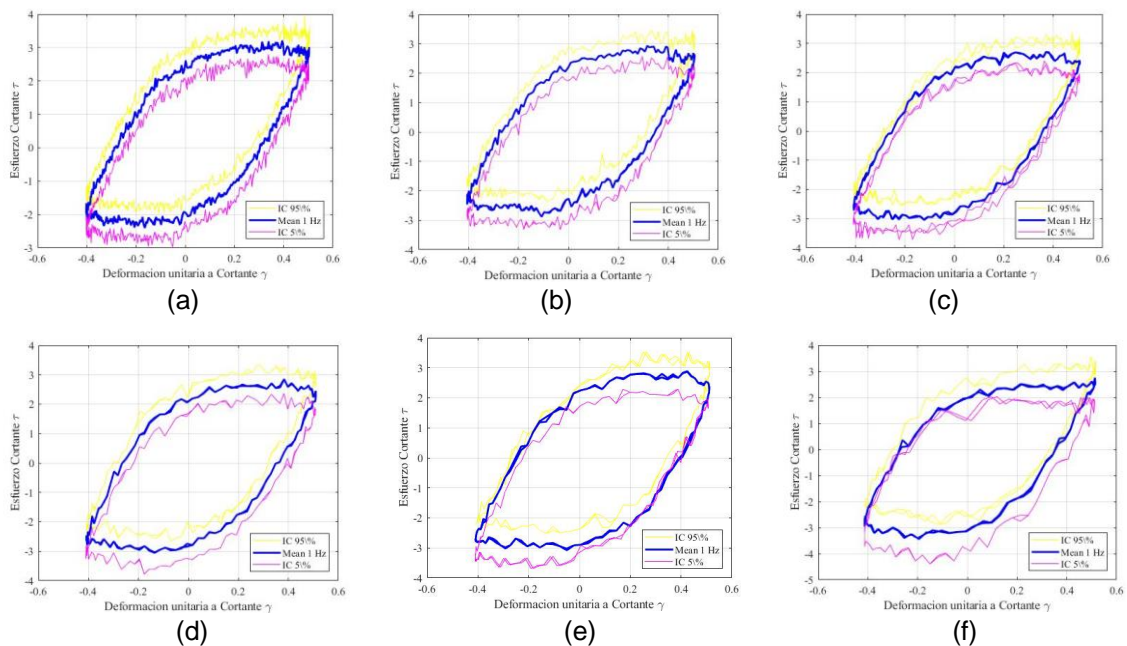
f = ksdensity(TM(:,ii),b,'function','cdf');%,'Support','positive');%
plot(b,f); grid on
xlabel(['Parametro ',num2str(ii)])
ylabel('cumulative density function')
S1(:,ii)=a;
S2(:,ii)=b;
S3(:,ii)=f;
end
```

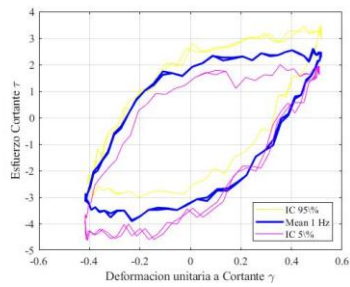
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el cálculo del ciclo de histéresis experimental, se consideraron los primeros 20 ciclos de deformación de las muestras en cada frecuencia, y a partir de la función percentil se obtiene la respuesta media de estos valores, tal y como se muestra en la figura 16, para cada una de las diez frecuencias en su orden correspondiente. Esta respuesta se usa como referencia para generar el modelo teórico, y obtener así cada uno de los parámetros involucrados con éste.

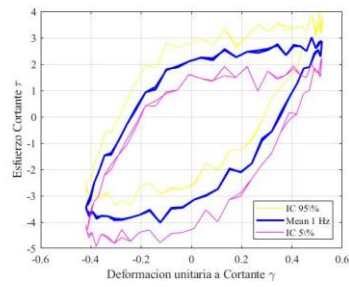
En esta figura se muestra en azul el ciclo correspondiente al 50% de la función percentil, en amarillo el ciclo superior, es decir el del 95% y en fucsia el ciclo inferior, es decir, el del 5%, para cada una de las diez frecuencias de ensayo.

Figura 16. Ciclo de histéresis experimental para cada una de las diez frecuencias del ensayo.

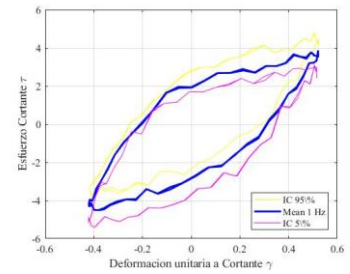




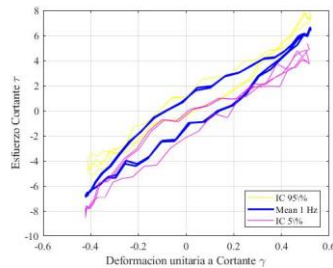
(g)



(h)



(i)



(j)

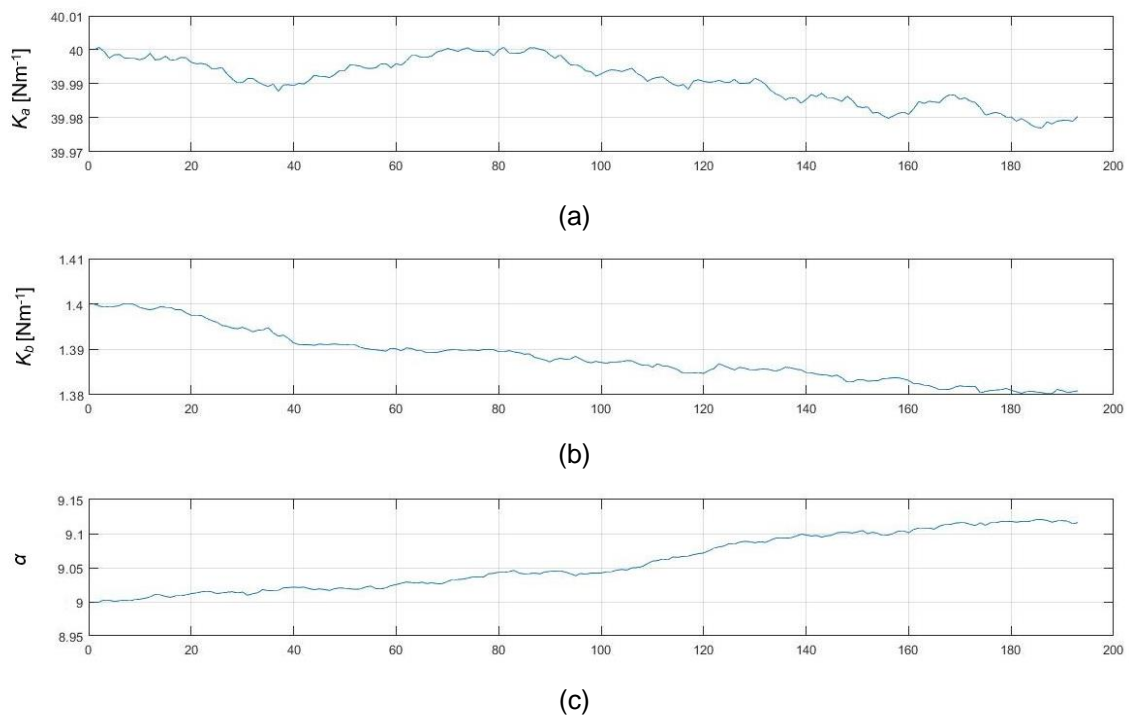
En esta figura se puede observar que, mientras los límites de deformación se mantienen aproximadamente constantes en cada una de las frecuencias, el esfuerzo cortante presenta una variación mínima desde 1 hasta 8 Hz, y un aumento considerable en 9 y 10 Hz.

Por otra parte, observando los ciclos de histéresis experimentales de este ensayo, y comparándolos con los desarrollados por Vaiana, en la generación del modelo (figura 14), se puede deducir que la variación de los parámetros β_1 y β_2 no influye en el comportamiento de los datos experimentales de cada frecuencia, por esta razón, éstos son despreciados del cálculo teórico, para así, reducir el tiempo de procesamiento.

Para el cálculo de los parámetros ka_1 , kb_1 y α , se realiza un proceso de iteración, hasta obtener tres respuestas del modelo teórico para cada frecuencia, en las cuales el porcentaje de valores aceptados de las cadenas de Markov oscile entre el 20 y el 30% del número total de valores procesados.

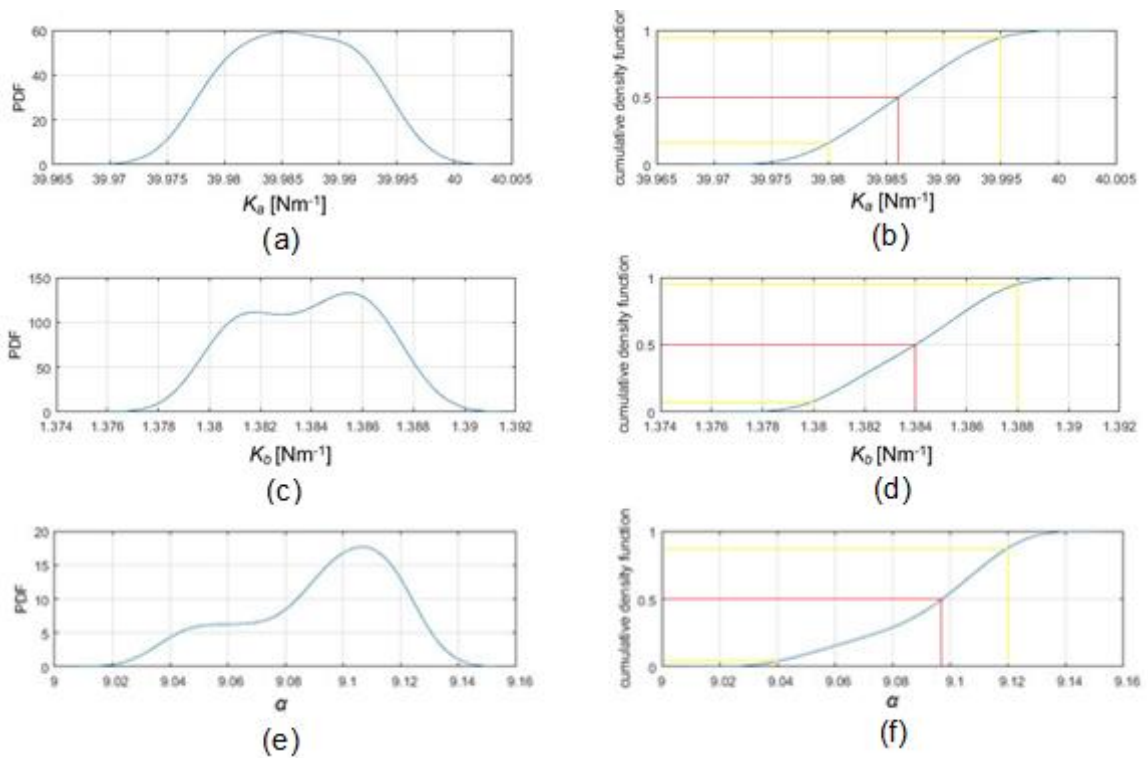
En la gráfica 3 se muestran las respectivas cadenas de Markov de la primera respuesta del modelo en 1 Hz. En esta gráfica, el eje Y representa el valor de cada parámetro, que varía en función del número de valores procesados hasta que logra estabilizar. En este caso, se procesaron 800 valores para cada uno de estos parámetros, y el modelo logró estabilizar a partir de los 180 datos aproximadamente, teniendo un porcentaje de 23,2% de datos aceptados.

Gráfica 3. Cadenas de Markov de la primera respuesta de 1 Hz.



En la gráfica 4 se muestra la función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD), para cada uno de estos parámetros.

Gráfica 4. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 1 Hz.



Como se puede apreciar en las gráficas 4b, 4d y 4e, el valor de cada uno de los parámetros varía dentro de un rango muy pequeño. Por ejemplo, el valor de K_a , como se puede observar en la gráfica 4b, se encuentra entre 39,98 y 39,995 [Nm^{-1}], es decir, existe una variación entre el límite inferior y el superior (límites delimitados por las líneas amarillas en las gráficas de la CDF) de tan solo de 0,015 unidades. Los valores que se encuentran dentro de este rango, tienen un 83% de probabilidad de generar una respuesta acertada del modelo experimental, respecto a los datos teóricos.

Para seleccionar un valor exacto, dentro de estos rangos, de ahora en adelante se va a considerar el valor correspondiente al 50% de distribución acumulada de cada parámetro (valor señalado por la línea roja en las gráficas de CDF), en este caso 39,986 [Nm^{-1}], para generar el ciclo de histéresis con cada una de las respuestas.

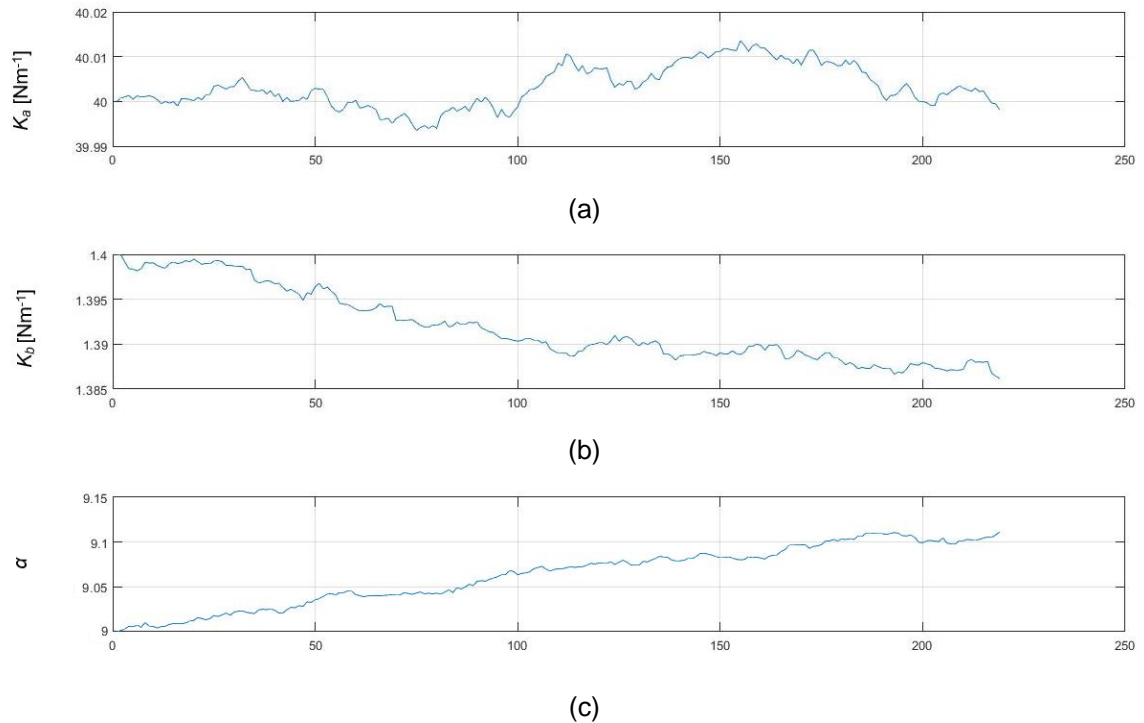
En la tabla 6, se muestra el rango en el que puede estar cada uno de los parámetros de esta respuesta, así como la probabilidad de que los valores existentes entre ese rango generen un error bajo entre el modelo teórico y los datos experimentales. Por último, se encuentra el valor seleccionado de cada parámetro, que es el 50% de la distribución acumulada, para cada uno de los parámetros.

Tabla 6. Resumen de la primera respuesta para 1 Hz.

Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Rango	39,98-39,995	1,38-1,388	9,04-9,12
Aceptación del rango	83%	94%	79%
50%	39,986	1,384	9,096

La gráfica 5 muestran las cadenas correspondientes a la segunda respuesta de 1 Hz. En este caso, con los mismos 800 datos, el porcentaje de aceptación es 27%

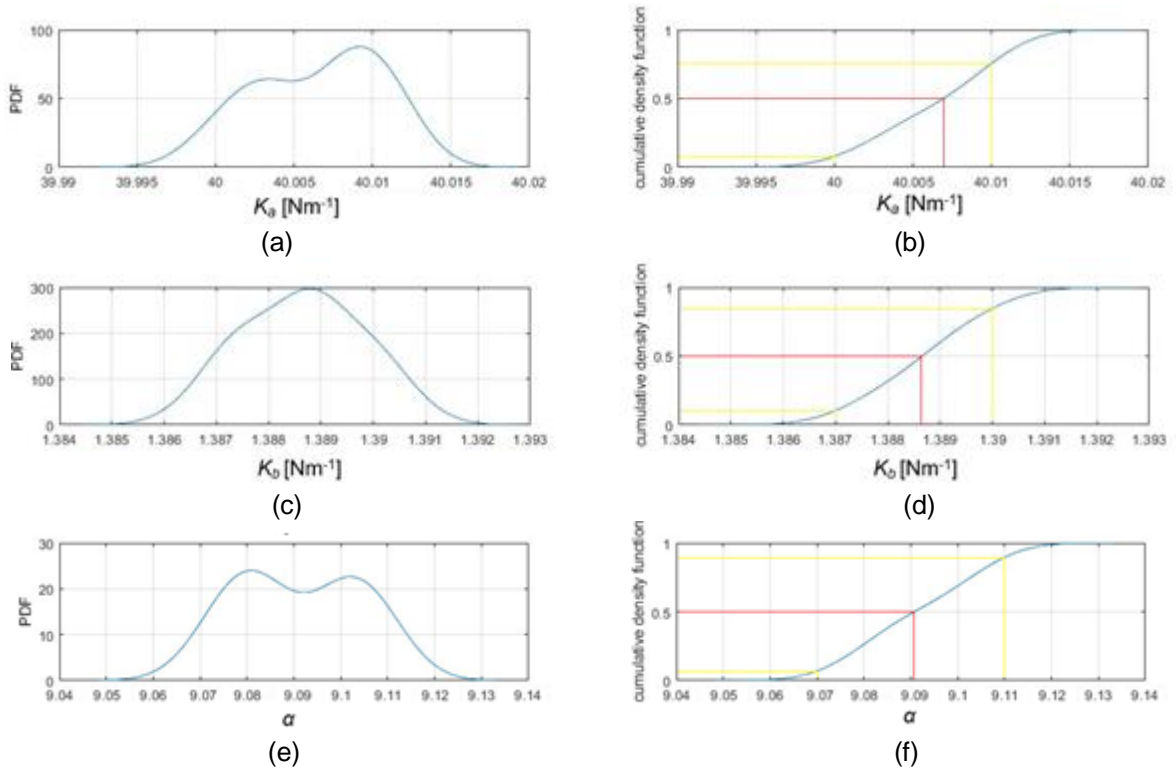
Gráfica 5. Cadenas de Markov de la segunda respuesta de 1 Hz.



En la gráfica 6 se muestra la función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD). En las gráficas 6b, 6d y 6e, se puede apreciar que

nuevamente, el rango de en el que se encuentran los valores de cada uno de los parámetros tiene una variación mínima.

Gráfica 6. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 1 Hz.



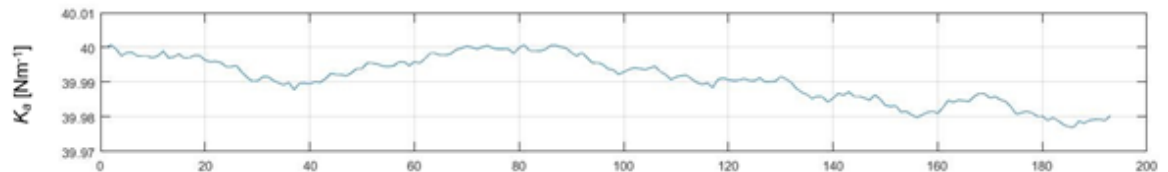
En la tabla 7 se muestra el rango en el que se puede encontrar un valor aceptado de cada uno de los parámetros, la probabilidad de que estos valores generen una respuesta acertada del modelo, y el valor correspondiente al 50% de la distribución acumulada para K_a , K_b y α .

Tabla 7. Resumen de la segunda respuesta de 1 Hz.

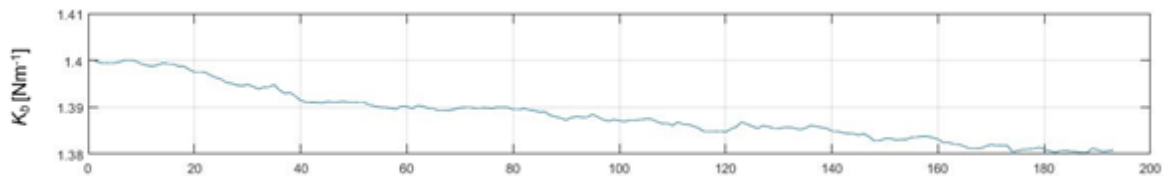
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	40-40,01	1,387-1,39	9,07-9,11
Aceptación del rango	65%	78%	85%
50%	40,007	1,3886	9,09

La última respuesta de esta frecuencia, se representa en la gráfica 7, en la cual se puede apreciar que cada uno de los parámetros alcanza la estabilidad, y que, de los 800 datos procesados en la iteración, el 23,75% de estos fueron aceptados.

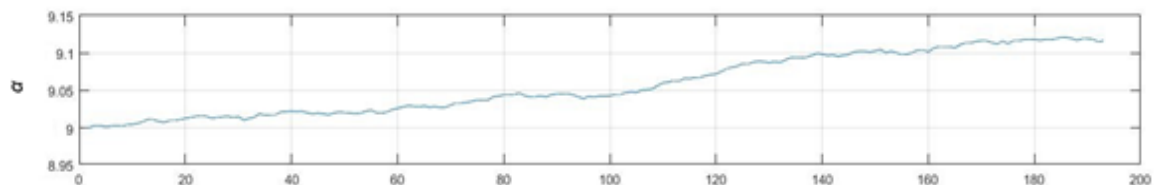
Gráfica 7. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 1 Hz.



(a)



(b)



(c)

Con la información existente en la gráfica 7, se construye la gráfica 8, que representa la función PDF y la CDF de cada parámetro en esta respuesta. En cada una de las gráficas CDF se encuentra delimitado el rango al que pertenece el valor que más veces se repitió en cada parámetro, es decir, el 50% de la función acumulada. Estos valores, junto al porcentaje de aceptación de este rango de valores, se muestra en la tabla 8.

Gráfica 8. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 1 Hz.

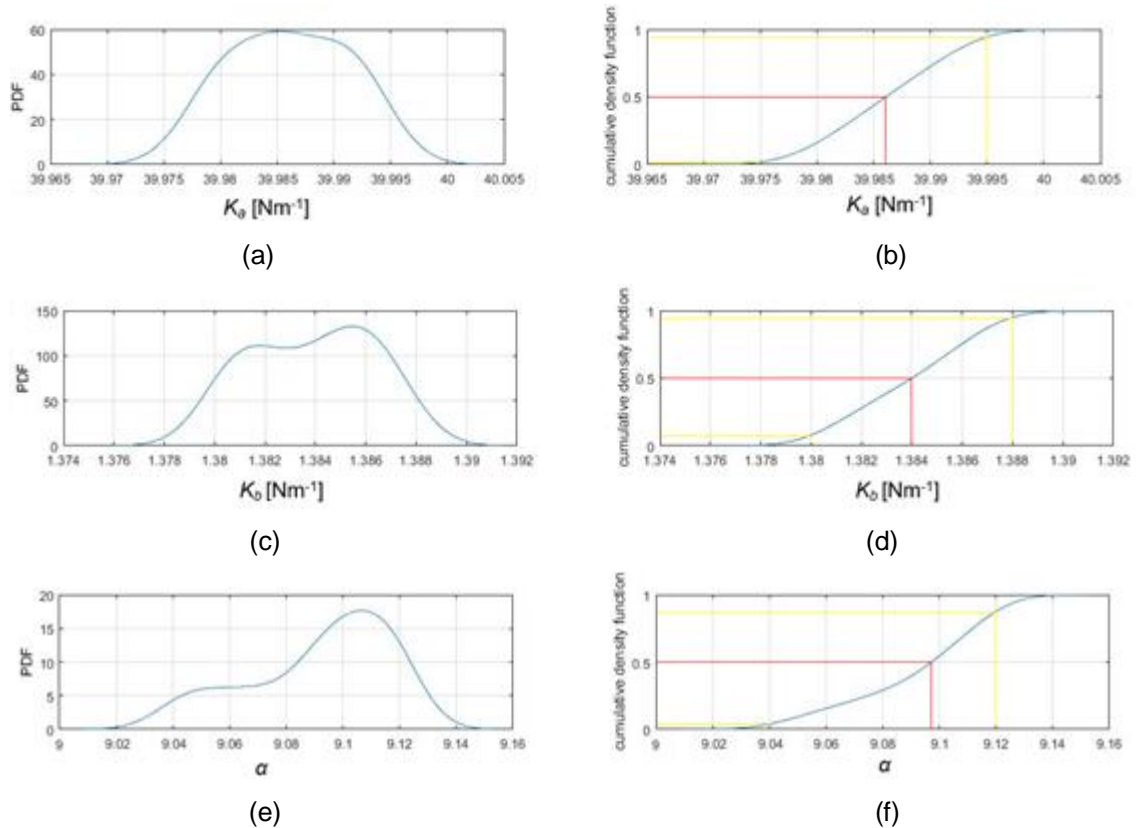


Tabla 8. Resumen de la tercera respuesta de 1 Hz.

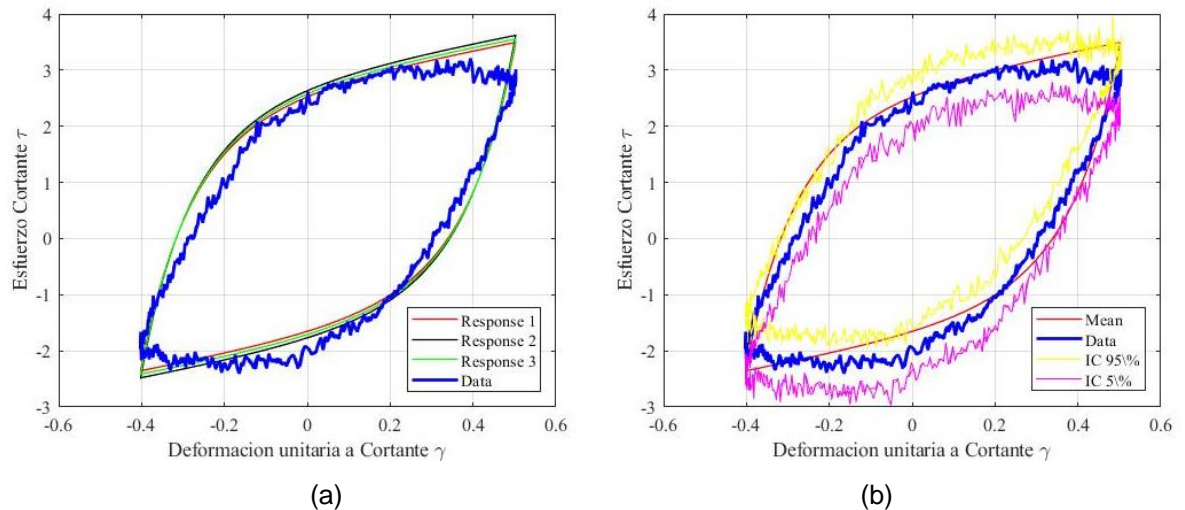
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	37,89-37,91	1,16-1,7125	8,54-8,59
Aceptación del rango	89%	85%	83%
50%	37,9	1,116	8,56

Con la información de las tablas 6, 7, y 8, en donde se reúne el valor del 50% de la función acumulada para cada parámetro, se construye la gráfica 9a, en la cual se imprimen las tres respuestas de 1 Hz y se compara con el ciclo obtenido experimentalmente, para esta frecuencia, en el ensayo previo. Con el valor de cada una de las tres respuestas, para cada parámetro, se construye la tabla 9, en la cual está el valor promedio *para* K_a , K_b y α .

Tabla 9. Valor promedio de cada parámetro para la frecuencia de 1 Hz.

Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	39,993	1,386	9,092

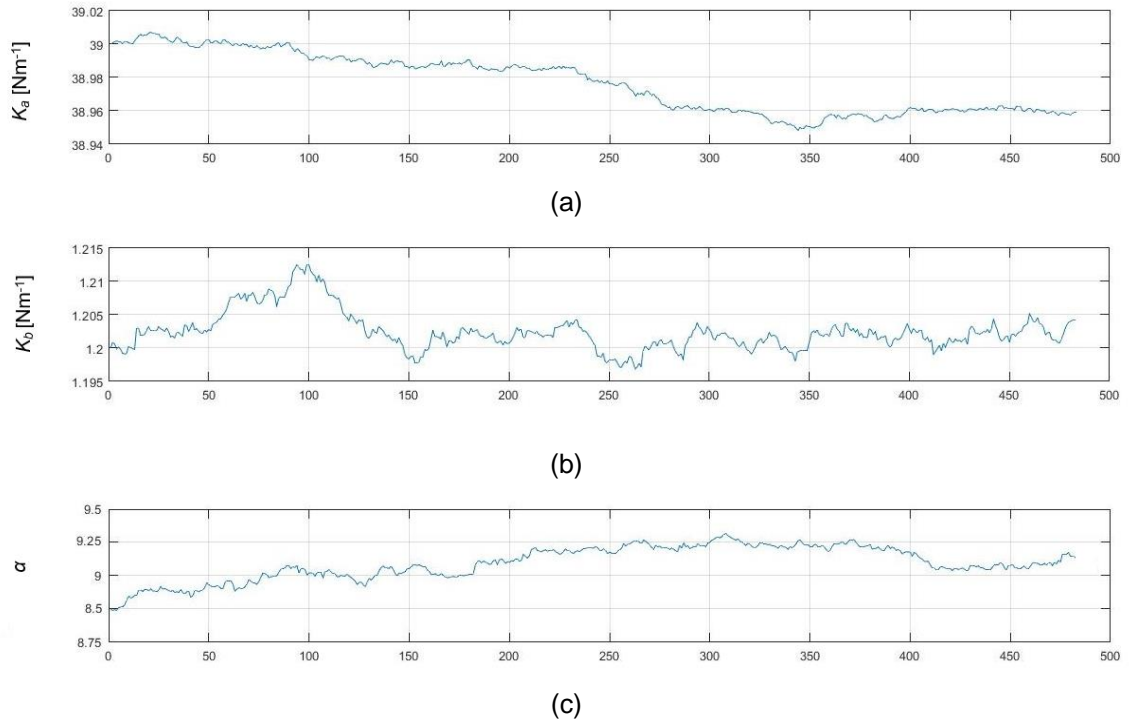
Gráfica 9. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 1 Hz.



A partir de la gráfica 9b, es posible deducir que se generó una respuesta aceptable, ya que el ciclo promedio generado a partir de las tres respuestas (función representada por la curva roja), se encuentra dentro de los límites superiores, es decir, el percentil de 95% (función amarilla) e inferiores (función fucsia), o el percentil del 5%, de los datos experimentales.

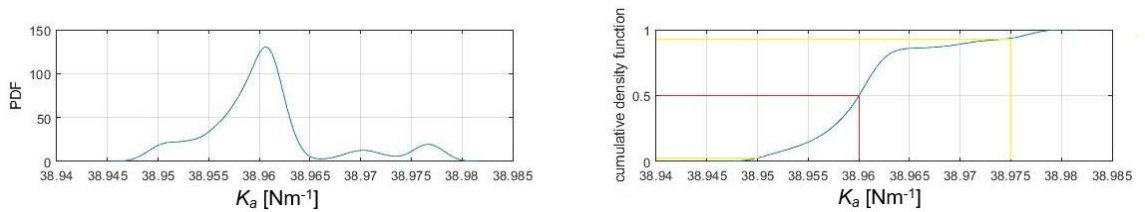
Para la primera respuesta de la segunda frecuencia, es decir, 2 Hz, se aumentó a 2000 el número de valores procesados de cada parámetro. El comportamiento de los parámetros que se muestra en la gráfica 10, tuvo un 23.5% de valores aceptados.

Gráfica 10. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 2 Hz.



En la gráfica 11 se muestran la función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD), así como los rangos en el que puede estar cada parámetro de esta respuesta. Con el 50% de la distribución acumulada, en cada una de estas gráficas, se obtienen los valores de los parámetros para generar el ciclo de histéresis de esta respuesta. Estos valores, los rangos a los cuales pueden pertenecer, y la probabilidad de estar entre estos límites, se muestran en la tabla 10.

Gráfica 11. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 2 Hz.



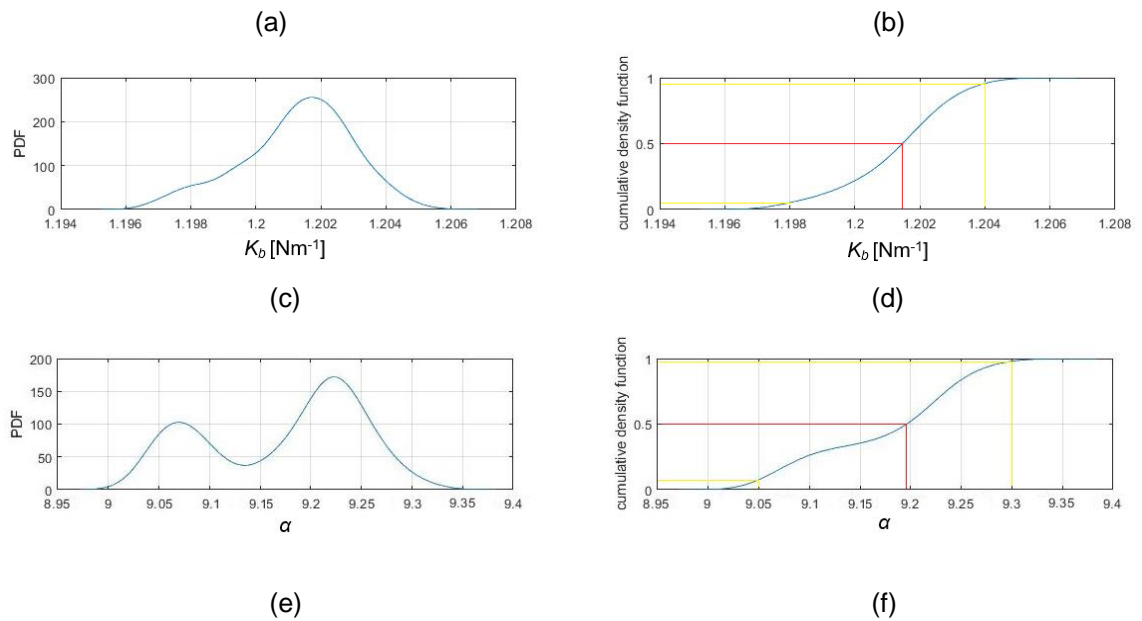
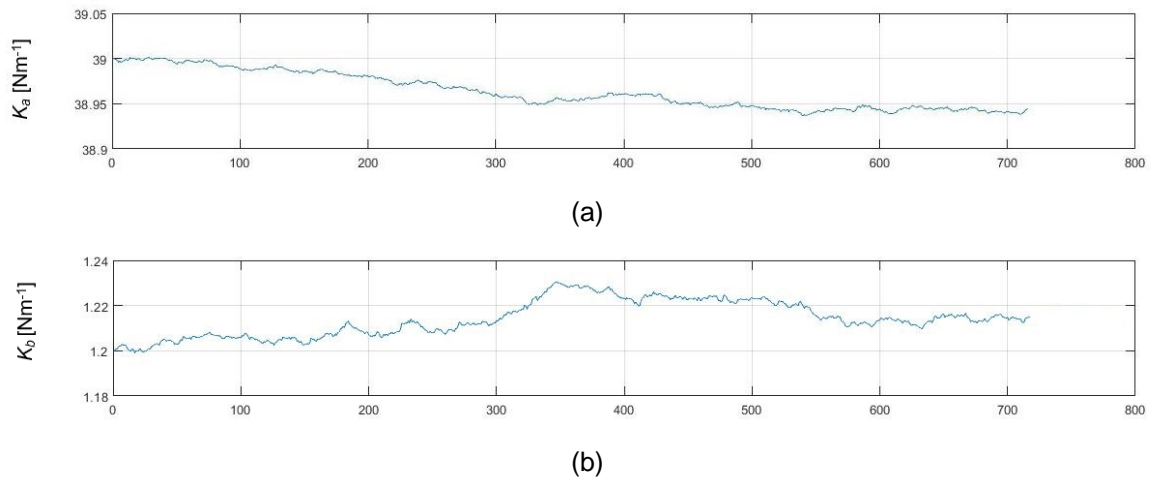


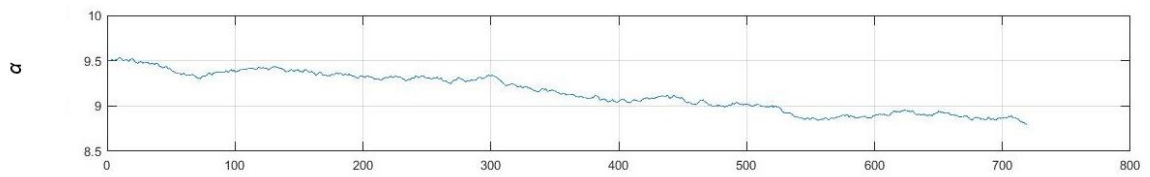
Tabla 10. Resumen de la primera respuesta de 2 Hz.

Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Rango	38,95-38,975	1,198-1,204	9,05-9,3
Aceptación del rango	94%	90%	94%
50%	38,96	1,2015	9,2

En la segunda respuesta de esta frecuencia se procesaron 3000 valores, y se obtuvo un porcentaje de aceptación de 24%, hasta que el valor de los parámetros pudo estabilizar, como se puede apreciar en la gráfica 12.

Gráfica 12. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 2 Hz.

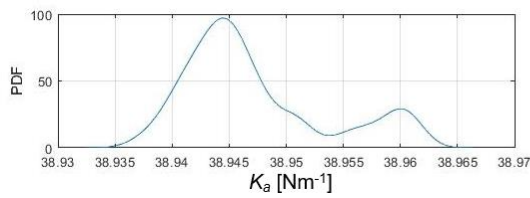




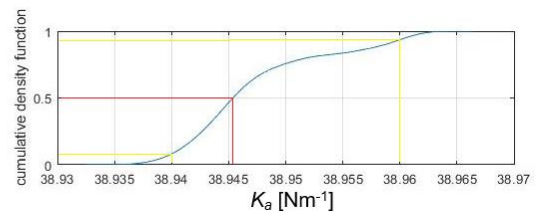
(c)

En la gráfica 13 se aprecia función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD). Con la información de estas gráficas, es posible calcular el valor de cada uno de estos parámetros en esta respuesta, el cual corresponde al 50% de la distribución acumulada, además del rango al que éstos pertenecen, tal y como se muestra en la tabla 11.

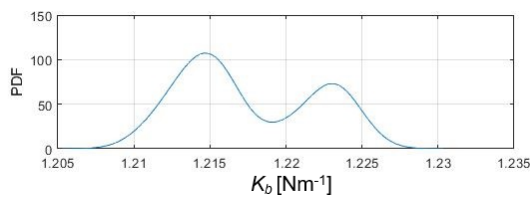
Gráfica 13. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 2 Hz.



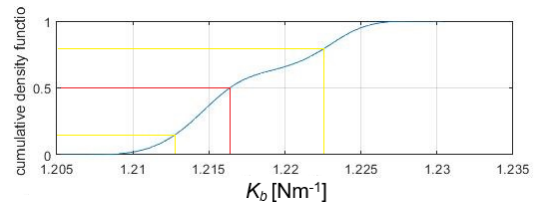
(a)



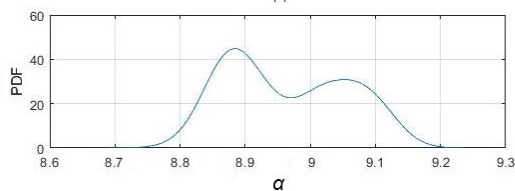
(b)



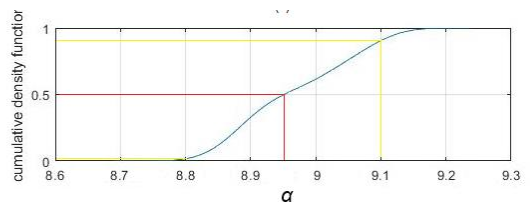
(c)



(d)



(e)



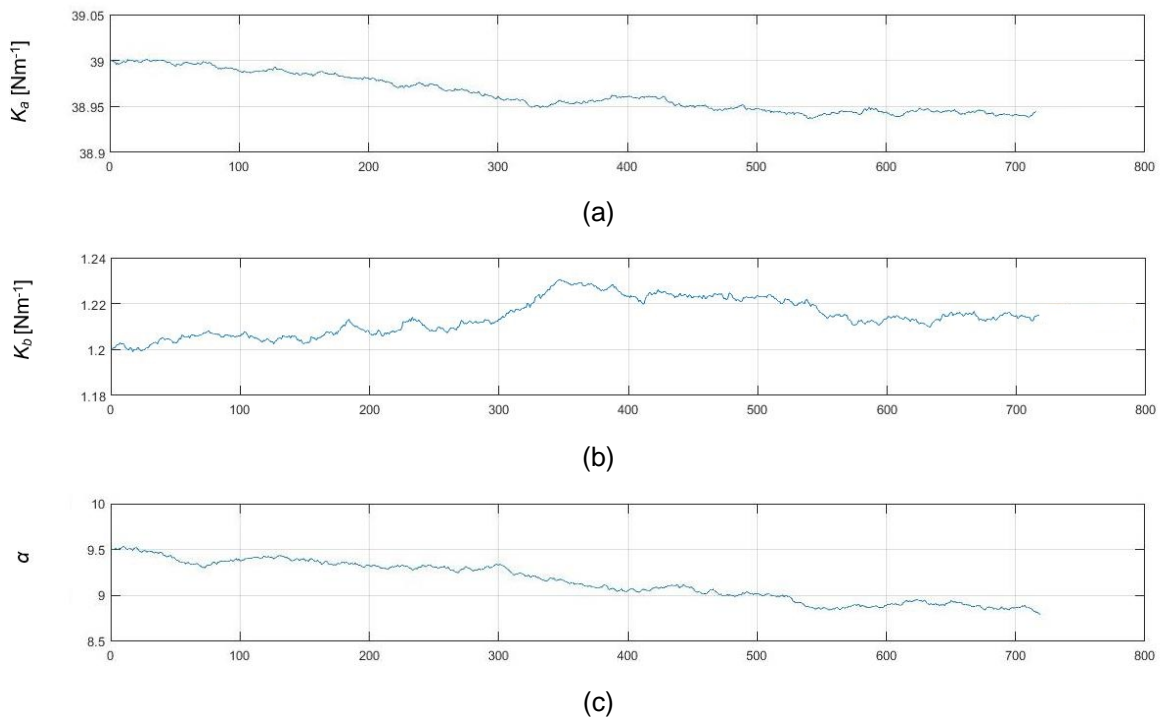
(f)

Tabla 11. Resumen segunda respuesta de 2 Hz.

Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	38,94-38,96	1,2125-1,22125	8,8-9,1
Aceptación del rango	88%	65%	90%
50%	38,945	1,217	8,95

La última respuesta de esta frecuencia se muestra en la gráfica 14. En este caso se conservaron los 3000 datos procesados se obtuvo un 23% aceptados, mientras que el valor de los parámetros alcanza a estabilizar.

Gráfica 14. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 2 Hz.



En la gráfica 15 se puede función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD) para esta respuesta. De esta forma, es posible calcular el valor de K_a , K_b y α , que corresponden al 50% de la distribución acumulada de la gráfica 16b, 16d y 16e respectivamente. Estos valores, el rango al que pertenecen, y la probabilidad de que generen una respuesta teórica con bajo

porcentaje de error, respecto a los datos experimentales, se encuentran en la tabla 12.

Gráfica 15. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 2 Hz.

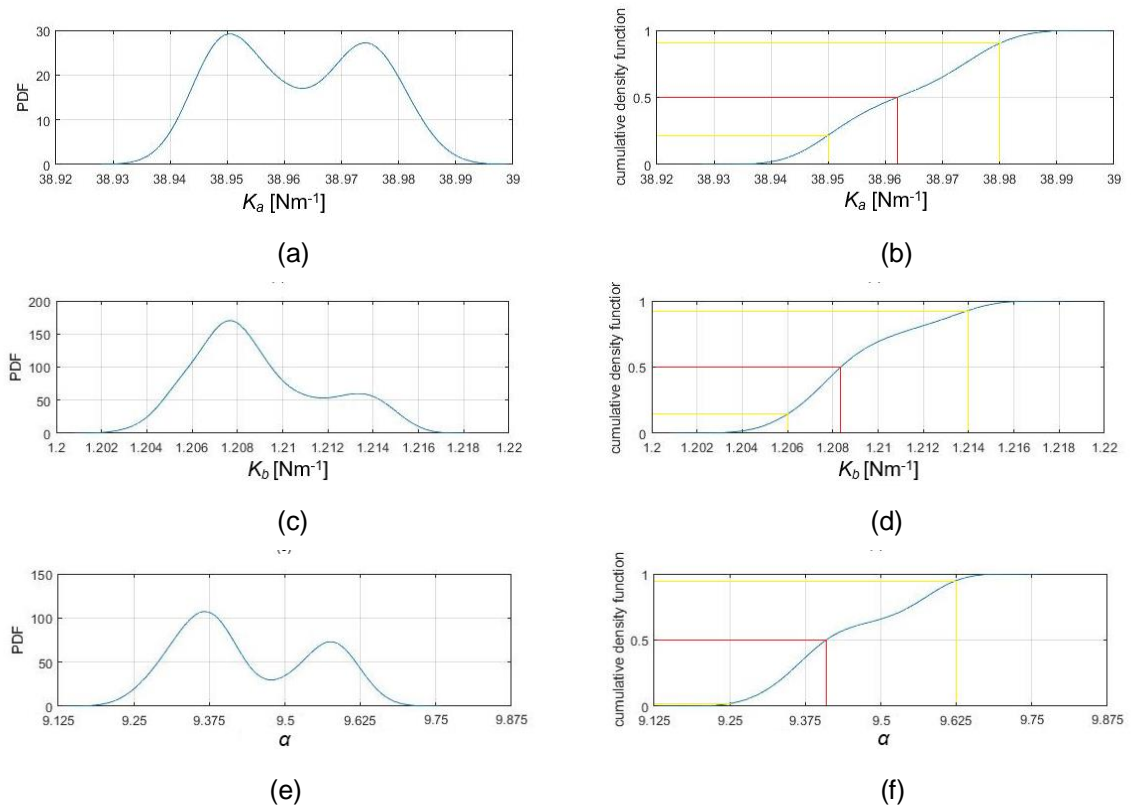


Tabla 12. Resumen tercera respuesta de 2 Hz.

Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	38,95-38,98	1,206-1,214	9,25-9,625
Aceptación del rango	73%	85%	94%
50%	38,962	1,2082	9,4

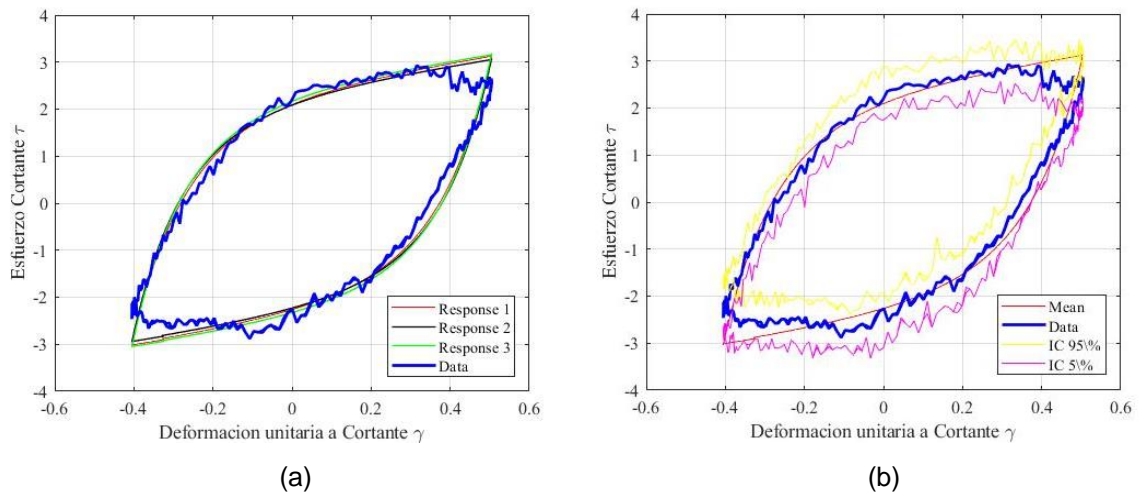
La gráfica 16a resume las tres respuestas para la frecuencia de 2 Hz, y las compara con el ciclo de histéresis de esta frecuencia obtenido experimentalmente. La gráfica 16b muestra el ciclo de histéresis experimental promedio, obtenido a partir de las tres frecuencias, y lo compara con el ciclo experimental. Este promedio se encuentra dentro del rango determinado por el percentil superior e inferior, lo que indica que

se generó un ajuste como el esperado. Los valores promedio de los parámetros para esta frecuencia, se encuentran en la tabla 13.

Tabla 13. Valor promedio de cada parámetro para la frecuencia de 2 Hz.

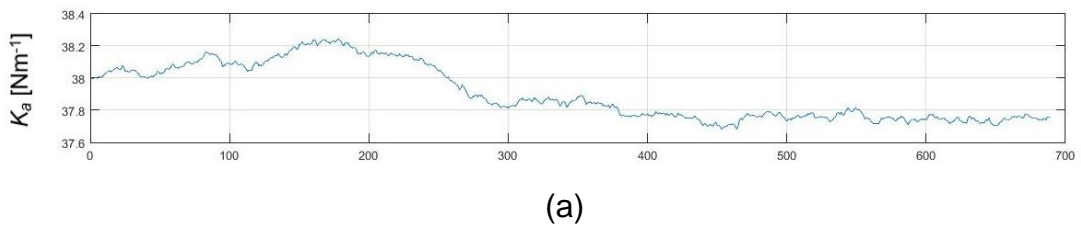
Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	38,956	1,209	9,183

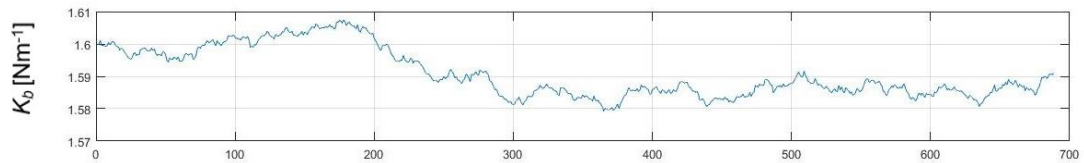
Gráfica 16. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 2 Hz.



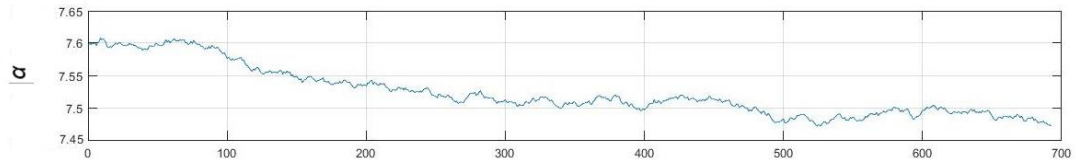
Para la tercera frecuencia, es decir, 3 Hz, se procesaron inicialmente 3000 datos. En esta primera respuesta, plasmada en la gráfica 18, se obtuvo un 23% de datos aceptados, y se puede apreciar que cada parámetro alcanzó la estabilidad.

Gráfica 17. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 3 Hz.





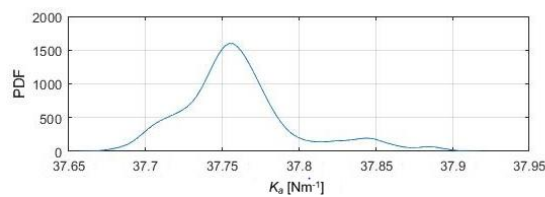
(b)



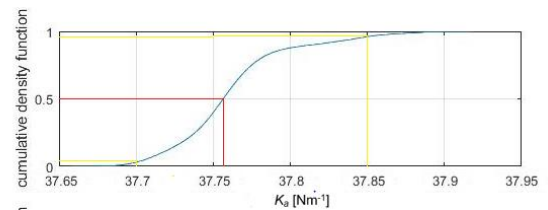
(c)

A continuación, en la gráfica 18 se muestra la función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD) para cada uno de los parámetros de esta respuesta. En las gráficas 18a, 18c y 18d, que son las gráficas de densidad de probabilidad, se muestra el valor que más se repitió de cada uno de los parámetros en este proceso de iteración.

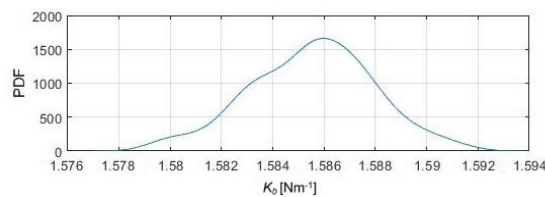
Gráfica 18. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 3 Hz.



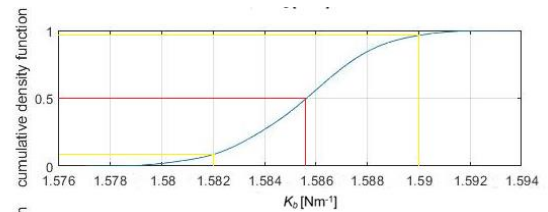
(a)



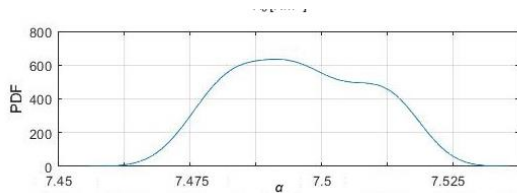
(b)



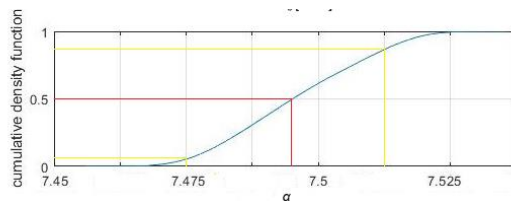
(c)



(d)



(e)



(f)

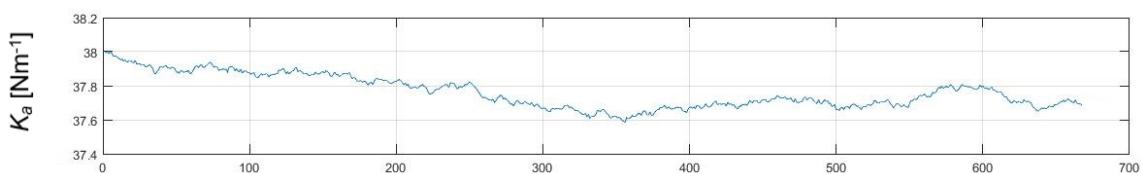
Con la información de estas gráficas, se construye la tabla 14, en la cual se muestra el rango al que pertenece cada parámetro, el porcentaje de aceptación de estos valores, para generar una respuesta aceptable del modelo, y el valor seleccionado para generar el ciclo de histéresis de esta respuesta (50% de la distribución acumulada).

Tabla 14. Resumen primera respuesta 3 Hz.

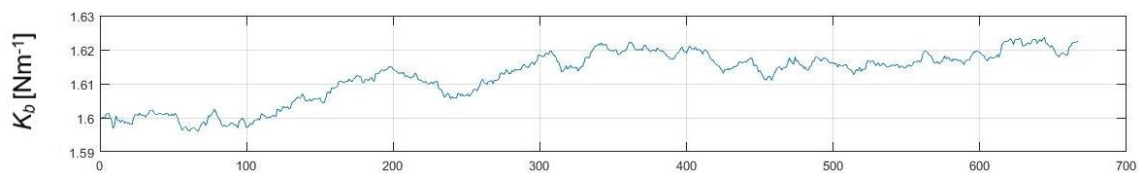
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	37,7-37,85	1,582-1,9	7,475-7,515
Aceptación del rango	94%	90%	89%
50%	37,754	1,5857	7,495

La gráfica 19 muestra el comportamiento de las cadenas de la segunda respuesta de 3 Hz. En este caso, se siguieron procesando 3000 datos, y se obtuvo un porcentaje de aceptación del 22,5%.

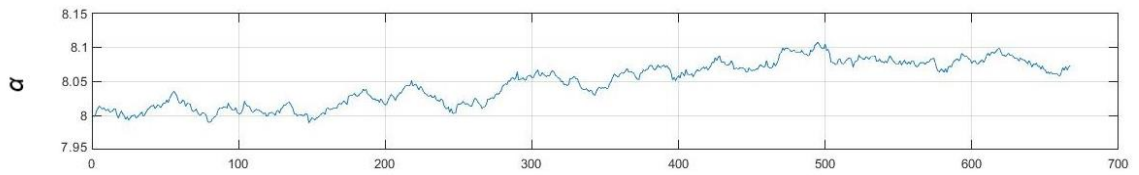
Gráfica 19. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 3 Hz.



(a)



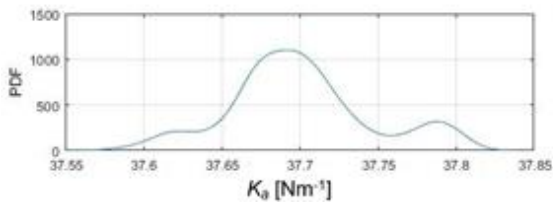
(b)



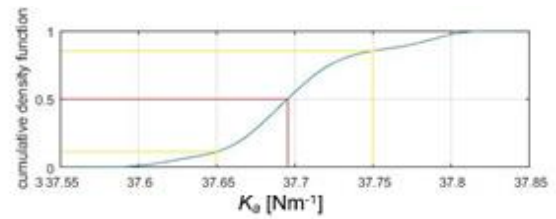
(c)

En la gráfica 20, se muestra tanto la función PDF como la función CFD para cada uno de estos parámetros, y con la información de ésta, se construye la tabla 15, en la cual se presenta el valor de cada parámetro (50% de la distribución acumulada) que se considera para obtener el ciclo de histéresis de esta respuesta, así como el porcentaje de aceptación que tiene, respecto a los datos experimentales (Aceptación del rango).

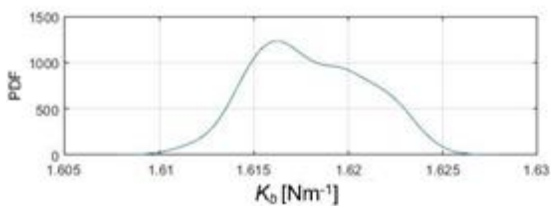
Gráfica 20. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 3 Hz.



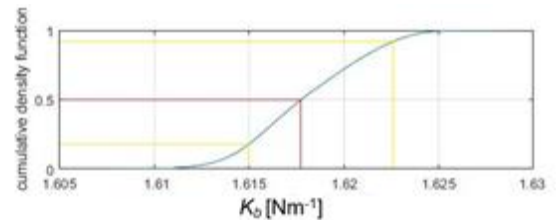
(a)



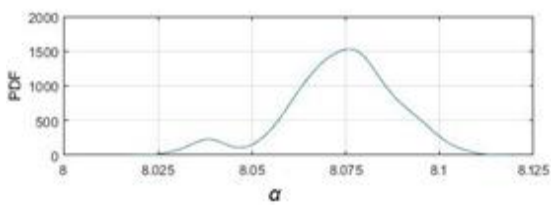
(b)



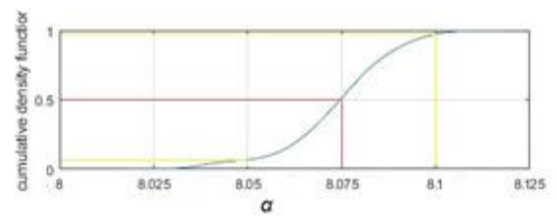
(c)



(d)



(e)



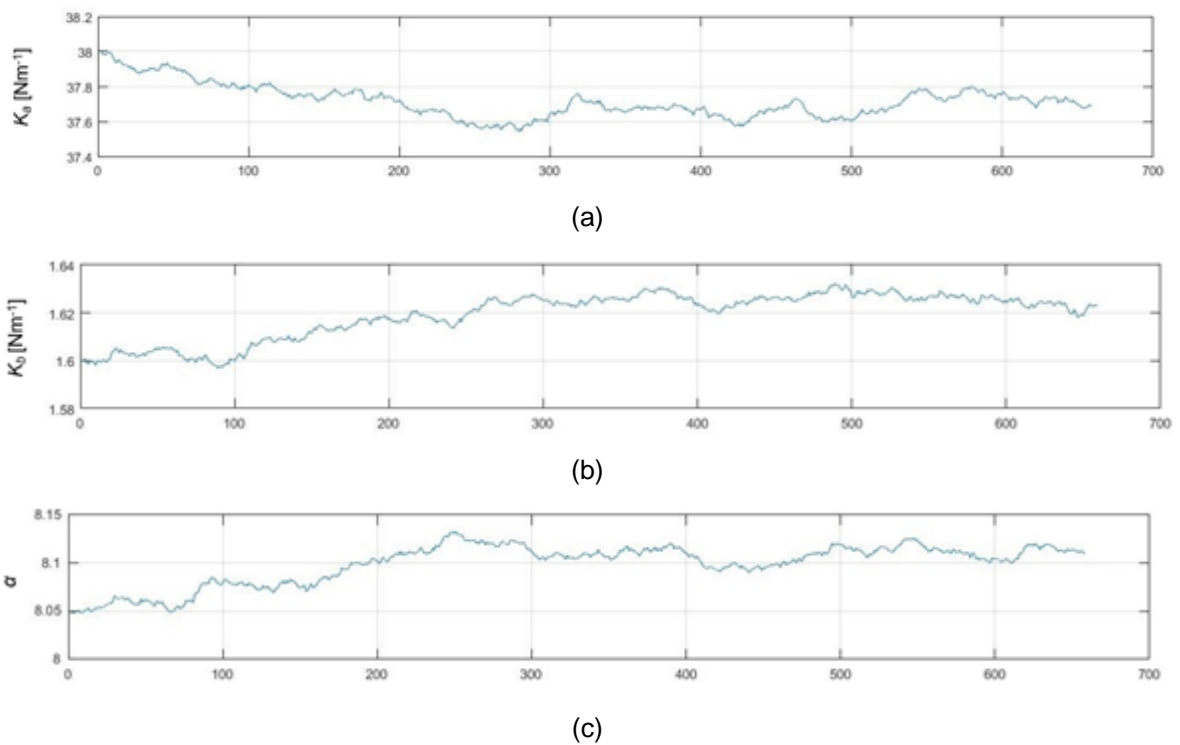
(f)

Tabla 15. Resumen segunda respuesta 3 Hz.

Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Rango	37,65-37,75	1,615-1,62125	8,05-8,1
Aceptación del rango	81%	80%	92%
50%	37,69	1,6175	8,075

El comportamiento de los parámetros en la tercera y última respuesta que se consideró para los 3 Hz de frecuencia, se muestra a continuación, en la gráfica 21. Conservando los 3000 datos procesados, se obtuvo un porcentaje de aceptación del 21,67%, y el valor de cada uno de los parámetros alcanzó la estabilidad, aproximadamente después de los 300 datos.

Gráfica 21. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 3 Hz.



La gráfica 22 muestra la función densidad de probabilidad (PDF) y la función de distribución acumulada (CFD) de la respuesta de la gráfica 23. A partir de esta información, se hallan los rangos a los que pertenece el valor de cada parámetro, el porcentaje de aceptación que este conjunto de valores tiene para generar un error

bajo entre la respuesta teórica y la experimental, y el valor exacto (50% de cada distribución acumulada) de cada parámetro, para generar el ciclo teórico. Estos valores se encuentran en la tabla 16.

Gráfica 22. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 3 Hz.

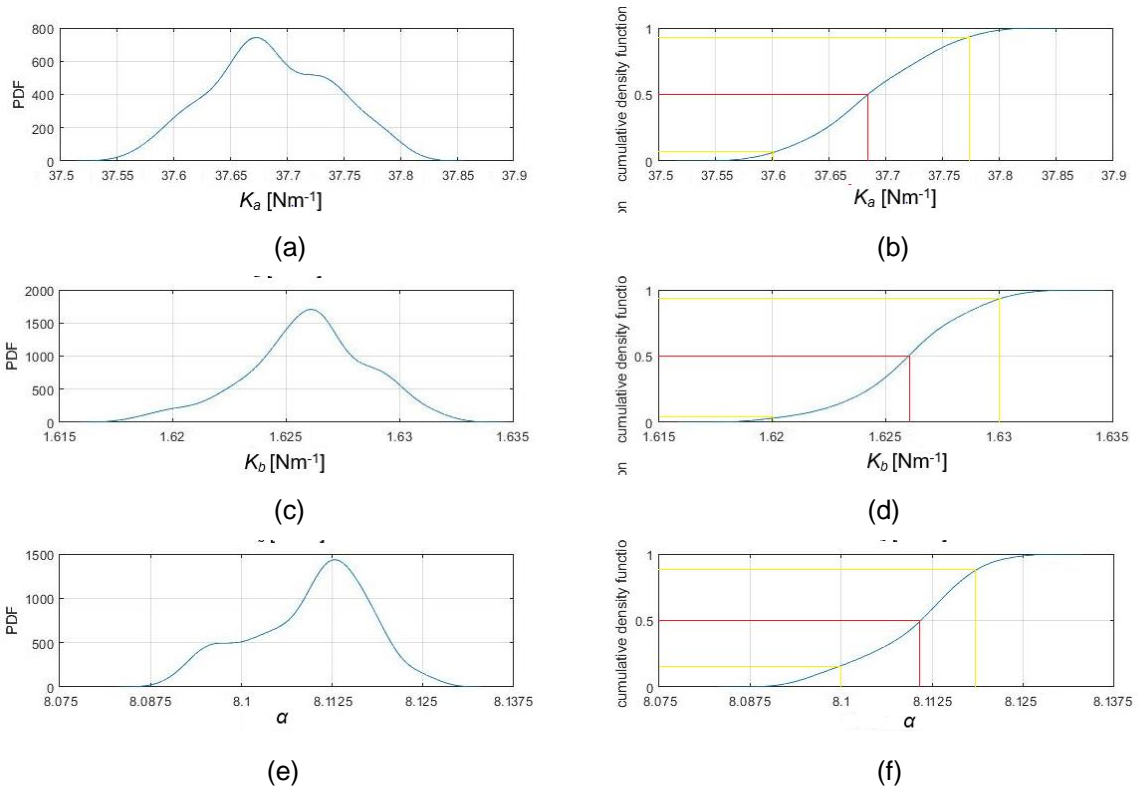


Tabla 16. Resumen tercera respuesta 3 Hz.

Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Rango	37,6-37,775	1,62-1,63	8,1-8,11
Aceptación del rango	87%	92%	78%
50%	37,68	1,626	8,11

La gráfica 23a, en resumen, muestra las tres respuestas teóricas obtenidas para la frecuencia de 3 Hz, comparadas con el ciclo de histéresis experimental que se obtuvo para esta frecuencia. Por otra parte, la gráfica 23b muestra la respuesta

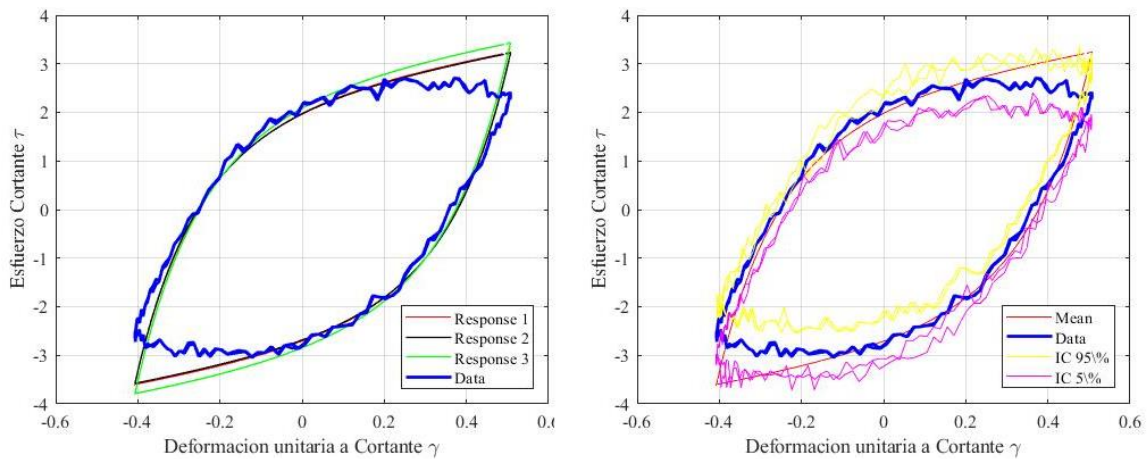
teórica promedio de esta frecuencia, comparada con los mismos datos experimentales.

En la tabla 17, se muestra el valor promedio de los tres parámetros de esta frecuencia, obtenidos en cada una de las respuestas. Estos valores son los que se han empleado posteriormente para generar la respuesta teórica promedio de la gráfica 24b.

Tabla 17. Valor promedio de cada parámetro para 3 Hz.

Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	37,708	1,610	7,893

Gráfica 23. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 3 Hz.



(a)

(b)

Con la gráfica 23b, se puede apreciar que la respuesta promedio de esta frecuencia, se encuentra dentro de los límites establecidos por el percentil del 95% y el 5%, lo que permite asumir que la calibración se ha realizado correctamente, y la respuesta del modelo es acertada para los 3 Hz.

Debido a que el análisis es el mismo para las 7 frecuencias restantes, las demás gráficas se adjuntan posteriormente en los anexos. Para continuar estableciendo la

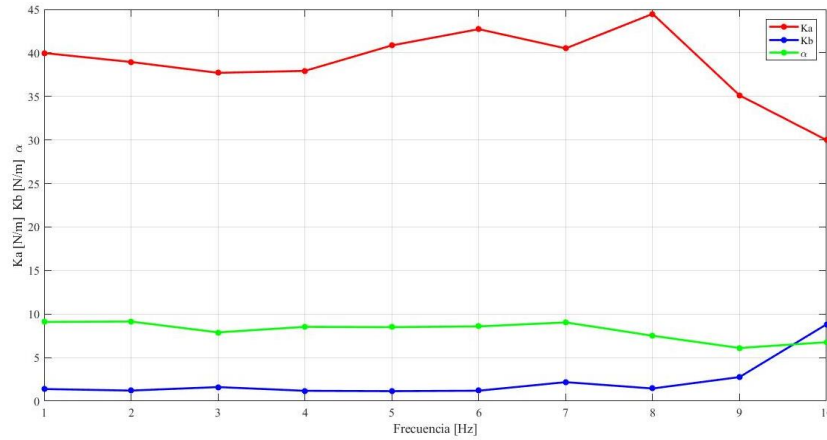
respuesta teórica de cada frecuencia, en la tabla 18 se resumen los parámetros de cada una de las tres respuestas, y el valor promedio de estos.

Tabla 18. Resumen valor promedio para cada parámetro en las frecuencias restantes.

	Parámetro	Respuesta 1	Respuesta 2	Respuesta 3	Promedio
4 Hz	Ka [N/m]	37,964	37,942	37,9	37,935
	Kb [N/m]	1,193	1,1925	1,166	1,184
	α	8,519	8,504	8,56	8,528
5 Hz	Ka [N/m]	40,934	40,745	40,905	40,861
	Kb [N/m]	1,077	1,053	1,295	1,142
	α	8,723	8,742	8,0225	8,496
6 Hz	Ka [N/m]	42,5	42,365	43,326	42,730
	Kb [N/m]	1,196	1,19351	1,1934	1,194
	α	8,5135	8,5157	8,7137	8,581
7 Hz	Ka [N/m]	40,5308	40,5425	40,482	40,518
	Kb [N/m]	2,2046	2,1252	2,201	2,177
	α	9,117	8,94	9,058	9,038
8 Hz	Ka [N/m]	44,517	44,475	44,462	44,485
	Kb [N/m]	1,443	1,4754	1,4258	1,448
	α	7,5103	7,5089	7,5057	7,508
9 Hz	Ka [N/m]	34,775	35,255	35,35	35,127
	Kb [N/m]	2,635	2,925	2,72	2,760
	α	6,053	6,099	6,142	6,098
10 Hz	Ka [N/m]	29,972	29,996	30,0046	29,991
	Kb [N/m]	9,452	8,496	8,4951	8,814
	α	6,67	6,808	6,819	6,766

En la gráfica 24, se muestra el comportamiento de los parámetros promedio en función de la frecuencia. A partir de esta gráfica, se puede afirmar que tanto Kb como α tienen una tendencia definida en su comportamiento (Kb tiene un comportamiento creciente, mientras α tiende a disminuir al mientras se aumenta la frecuencia).

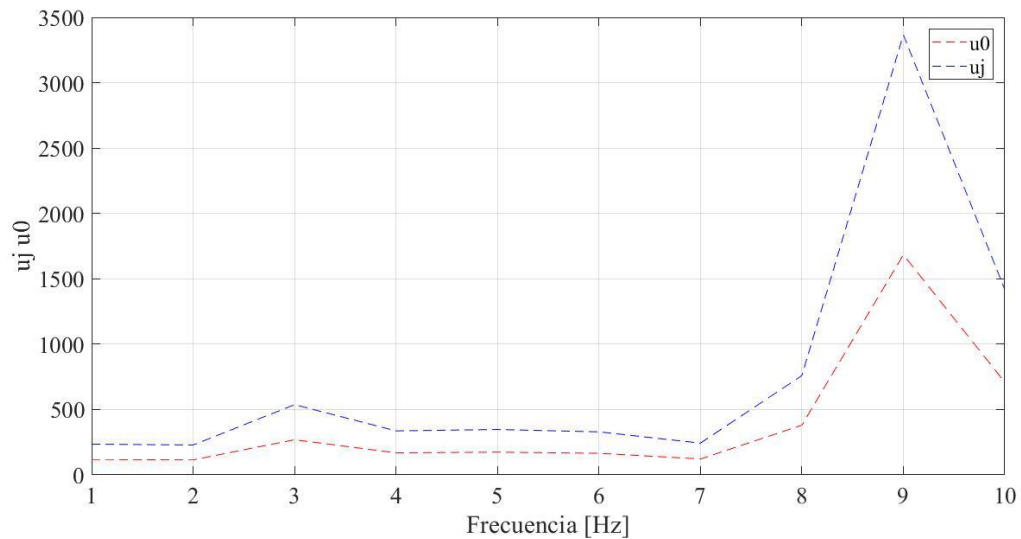
Gráfica 24. Comportamiento de los parámetros promedio en el dominio de la frecuencia.



K_a presenta un comportamiento aleatorio con respecto al aumento de frecuencia, pero esto puede ser generado por la forma en que se calcularon los valores de esta gráfica (promedio entre los tres valores de K_a de cada una de las respuestas en determinada frecuencia).

Con cada uno de estos factores, es posible revisar el comportamiento dinámico de la rigidez del material, propiedad que se había definido anteriormente en la ecuación 8, y la cual, además, se encuentra en función de u_0 y u_j . Estos valores, que se muestran en la siguiente gráfica, también son obtenidos a partir del promedio de las tres respuestas, para cada una de las diez frecuencias.

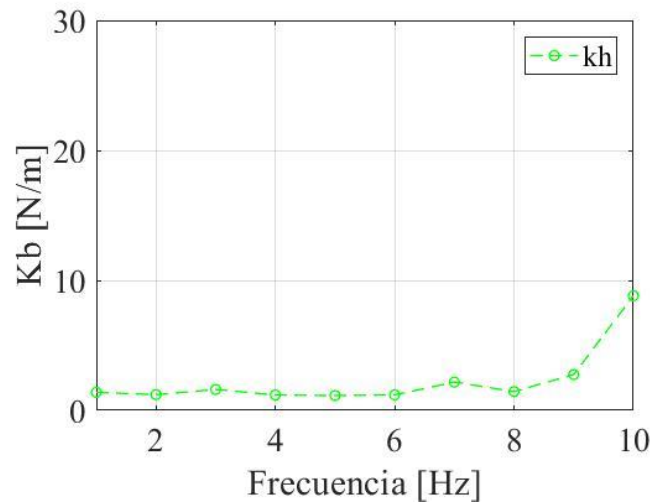
Gráfica 25. Comportamiento de los factores u_0 y u_j en el dominio de la frecuencia.



Como se puede evidenciar en la gráfica 25, u_0 y u_j tiene valores elevados, por esta razón, al reemplazar en la ecuación, el segundo término de esta se aproxima a cero, por eso, en este caso, el parámetro K_b se convierte en la rigidez del material. Esta sería la única propiedad obtenida por este modelo, ya que K_c (PONER ECUACIÓN), está en función de β_1 y β_2 , parámetros que habían sido asumidos como cero, para reducir el tiempo de procesamiento.

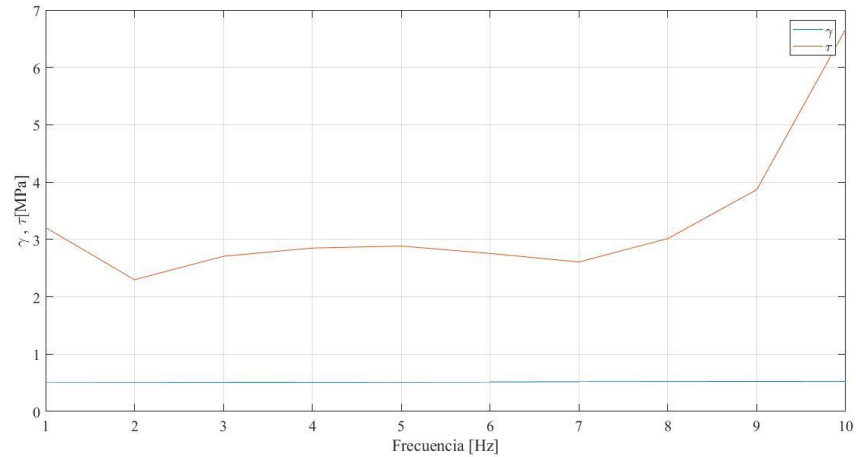
En la gráfica 26 se muestra entonces, la rigidez del material (K_h), en función de la frecuencia.

Gráfica 26. Comportamiento de K_b en el dominio de la frecuencia



Para el análisis de esta gráfica, y del comportamiento dinámico de la rigidez, es necesario considerar la deducción que se hizo anteriormente sobre la figura 15, donde se mencionaba que, en los ciclos de histéresis experimentales, el rango de deformación angular tiene variaciones mínimas en las 10 frecuencias, mientras que el rango de esfuerzo cortante tenía un comportamiento aproximadamente homogéneo entre 1 y 8 Hz, mientras aumentaba en 9 y en 10 Hz. En la gráfica 27 se muestra el valor máximo de esfuerzo y deformación para cada una de las frecuencias.

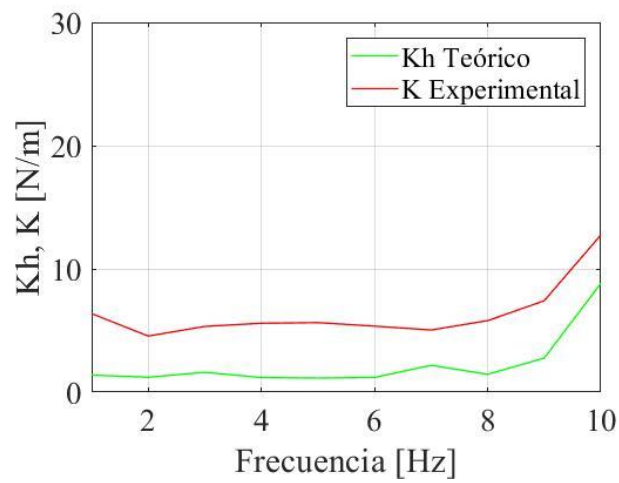
Gráfica 27. Comportamiento de la deformación unitaria (γ) y el esfuerzo cortante (τ) experimentales en el dominio de la frecuencia.



Si a los datos de esta gráfica le aplicamos el concepto de rigidez, que se muestra en la siguiente ecuación, donde K es la rigidez, F_i es el esfuerzo, γ_i la deformación y α_i es el factor de rigidez, que en este caso asumimos como 1, obtenemos la gráfica 28, en la cual se grafica la rigidez obtenida a partir del modelo empleado, y la rigidez obtenida por los datos experimentales.

$$K = \alpha_i \cdot \frac{F_i}{\gamma_i} \quad (10)$$

Gráfica 28. Comportamiento de K_h y K en el dominio de la frecuencia.



Debido a que las dos curvas tienen un comportamiento similar, y únicamente cambian los valores en cada una de ellas ya que se asumió α igual a 1), se puede deducir que el comportamiento de la rigidez hallado a partir del modelo matemático planteado (K_h Teórico), es el comportamiento esperado para la rigidez del material.

6. CONCLUSIONES

Se construyó un soporte (para las muestras y el sensor de distancia), el cual, ensamblado en la MTS Bionix, del laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Industrial de Santander, permite aplicar esfuerzos de tipo cortante a las muestras, conservando las propiedades de accionamiento de la máquina.

Por otra parte, la caracterización dinámica planteada para materiales viscoelásticos, a partir de un esfuerzo de tipo cortante, en el dominio del tiempo, y realizada de forma específica al Neopreno, permitió concluir que:

Mediante el modelo teórico planteado para calcular la rigidez del neopreno, se pudo obtener, en las diferentes frecuencias en las que se realizó en ensayo, un rango de valores con una variación mínima para cada uno de los parámetros del modelo. Además, a partir del método de calibración empleado, se puede apreciar que estos rangos generan un alto porcentaje de aceptación, es decir, se puede obtener con ellos un error mínimo entre el modelo teórico y los datos experimentales, por eso, se concluye que el modelo arrojó valores exactos, los cuales describen de forma óptima el comportamiento del material en el dominio de la frecuencia.

De igual forma, a partir de la corroboración realizada entre K teórico y Kh , se puede concluir que el valor de Kh , para cada una de las frecuencias, describe de forma óptima la rigidez del material.

Para la reducción en el tiempo de procesamiento y análisis de datos, en el desarrollo del proyecto no se consideraron los parámetros β_1 y β_2 del modelo matemático. Los resultados obtenidos permiten concluir que estos valores no influyen en el comportamiento dinámico del neopreno en bajas frecuencias, ya que, a pesar de que no se usaron, los ciclos de histéresis obtenidos a partir del modelo teórico, para cada una de las frecuencias, se ajustan de forma óptima con los ciclos de histéresis obtenidos experimentalmente.

Debido a que la caracterización dinámica del neopreno se llevó a cabo a bajas frecuencias, no fue posible implementar el modelo reológico de Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener ni el modelo reológico de Burgers.

REFERENCIAS

Addison Wesley. "Series in mechanical engineering and Mechanical Vibrations". (1990).pdf.

Autonics. Sensores fotoléctricos. Obtenido de <https://doi.org/http://dominion.com.mx/descargas/sensores-fotoelectricos.pdf>.

Bassani P. Biffi C. A. Carnevale M. Lecis, N. Previtali B. Lo Conte A. "Passive damping of slender and light structures". pp.45, 88 – 95, (2013). Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.044>

Chen D. L. Yang P. F. Lai Y. S. A review of three-dimensional viscoelastic models with an application to viscoelasticity characterization using nanoindentation. "Microelectronics Reliability". pp. 52, 541-558. 2012. Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.10.001>.

Creus G. J. Representación De Materia: Los Viscoelasticos Con Aplicación a Estructuras De Hormigón. Parte I: Viscoelasticidad Lineal. "Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería". pp. 125 – 151. (1989).

El amin M. F. Viscoelastic and Viscoplastic Materials. In Viscoelastic and Viscoplastic Materials. Obtenido en <https://doi.org/10.5772/61921>. (2016).

Evans, M. Seth, J. Probabilidad y estadística. La ciencia de la incertidumbre. 2004.

Feng Y. Jin X. and Hay J N. Dynamic Mechanical Behavior Analysis for Low. pp. 395-401. (1997).

Greco R and Marano G. C. Identification of parameters of Maxwell and Kelvin-Voigt generalized models for fluid viscous dampers. Journal of Vibration and Control. 21, pp. 260 – 274. (2015). Obtenido en <https://doi.org/10.1177/1077546313487937>

Gutierrez Lemini D. Engineering viscoelasticity. 2014.

Hernández W. P. Castello D. A. and Ritto T. G. "Uncertainty propagation analysis in laminated structures with viscoelastic core". pp. 23 – 37. (2016). Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.10.006>.

Hsia S. Y. Chang C. C. and Huang D. H. Application of passive damping fixture to the improvement of CNC drilling. 2018. Obtenido en <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816901036>.

Inmam D. J. Engineering Vibration. 1996. Obtenido en https://findit.dtu.dk/en/catalog/2304900023?single_revert=%2Fen%2Fcatalog%3Fq%3D9780273768449%26show_single%3Doff%26utf8%3D%25E2%259C%2593.

Inman D. J. Handbook of Noise and Vibration Control. pp. 225-231. (2007). Obtenido en <https://doi.org/10.1002/9780470209707.ch15>.

Johnson C. D. and Kienholz D. A. "Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers". pp.1284 – 1290. (1982). Obtenido en <https://doi.org/10.2514/3.51190>.

Johnson C. D. Design of passive damping systems and Journal of Mechanical Design Transactions of the ASME. 117(B), pp. 171 – 176. (1995). Obtenido en <https://doi.org/10.1115/1.2836451>.

Kelly S. Graham. Fundamentals of mechanical vibrations. McGraw Hill. (2000).pdf.

Keramat A. and Heidari Shirazi K. "Finite element based dynamic analysis of viscoelastic solids using the approximation of Volterra integrals, Finite Elements in Analysis and Design". pp. 86, 89-100. (2014). Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.03.010>.

Komperod M. The Kelvin-Voigt Model's Suitability to Explain the Viscoelastic Properties of Anticorrosion Bitumen at Large Shear Strain in Subsea Cables and Umbilicals. pp. 119, 319-330. (2015). Obtenido en <https://doi.org/10.3384/ecp15119319>.

Krodkiewski J. M. Mechanical vibration. pp. 436 – 431. (2008).

Lakes R. S. Viscoelastic measurement techniques. *Review of Scientific Instruments*. 75, 797-810. (2004). Obtenido en <https://doi.org/10.1063/1.1651639>.

Mainardi, F. and Spada G. Creep, relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology. *Physical Journal: Special Topics*. 193(1), pp. 133 – 160. (2011). Obtenido en <https://doi.org/10.1140/epjst/e2011-01387-1>.

Martinez-Agirre M. Illescas S. and Elejabarrieta M. J. Characterisation and modelling of prestrained viscoelastic films and *International Journal of Adhesion and Adhesives* 50, pp. 183-190. (2014). Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.01.029>.

Masterson P. A. Method for the determination of complex shear modulus of viscoelastic adhesives. pp. 276 – 281.pdf

Menard K. *Dynamic Mechanical Analysis*. 2008.

Pozo I. *Análisis y modelización de vigas sándwich sometidas a impactos de baja velocidad*. 2013.

Rafiee M. Nitzsche F. and Labrosse M. R. Effect of functionalization of carbon nanotubes on vibration and damping characteristics of epoxy nanocomposites. pp. 385-395. (2018). Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.037>.

Rittweger A. Albus J. Hornung E. Öry H. and Mourey P. "Passive damping devices for aerospace structures". pp. 597-608. (2002). Obtenida en [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00220-X](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00220-X).

Rouleau L. Pirk, R. Pluymers B. and Desmet W. Characterization and modeling of the viscoelastic behavior of a self-adhesive rubber using dynamic mechanical analysis tests. pp. 200 – 208. (2015). Obtenido en <https://doi.org/10.5028/jatm.v7i2.474>.

Silva C. W. De Borbely A. Kreider J. F. & Davis L. R. Vibration Damping, Control, and Design. 2007. Obtenida en <https://doi.org/10.1201/9781420053227>.

Storck H. and Sumali H. Characterization of a vibration damping mount. 1999. Obtenido en <https://doi.org/10.4271/1999-01-2816>.

Sun, W. Wang Z. Yan X. & Zhu M. Inverse identification of the frequency-dependent mechanical parameters of viscoelastic materials based on the measured FRFs. pp. 816-833. 2018. Obtenido en <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.031>.

Vaiana, N. Sessa, S. Marmo, F. Rosati, L. "An Accurate and Computationally Efficient Uniaxial Phenomenological Model for Steel and Fiber Reinforced Elastomeric Bearings ". pp. 196-212. (2019). Obtenido en DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.017>.

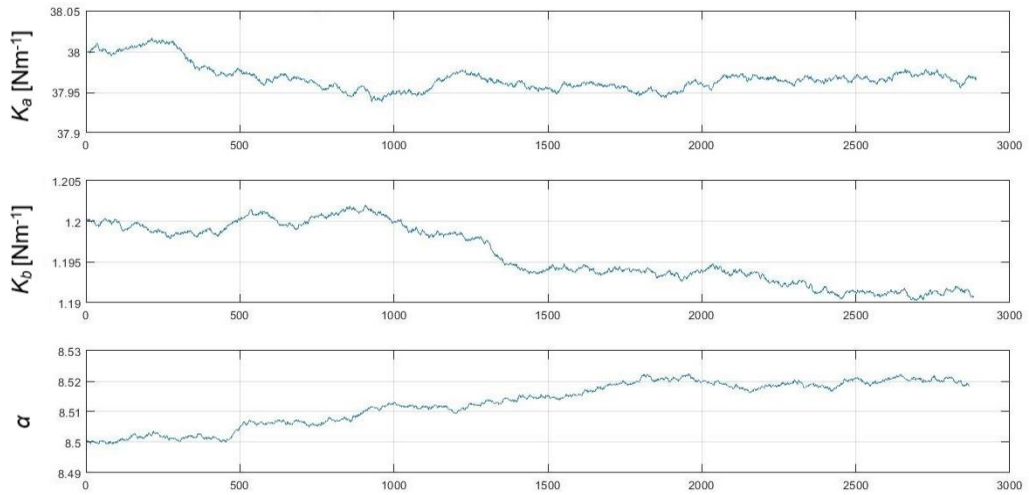
Van Humbeeck J. and Kustov S. "Active and passive damping of noise and vibrations through shape memory alloys: Applications and mechanisms". 2005. Obtenido en <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/5/001>.

White G. Introducción al Análisis de Vibraciones. pp. 1-148. (2010).

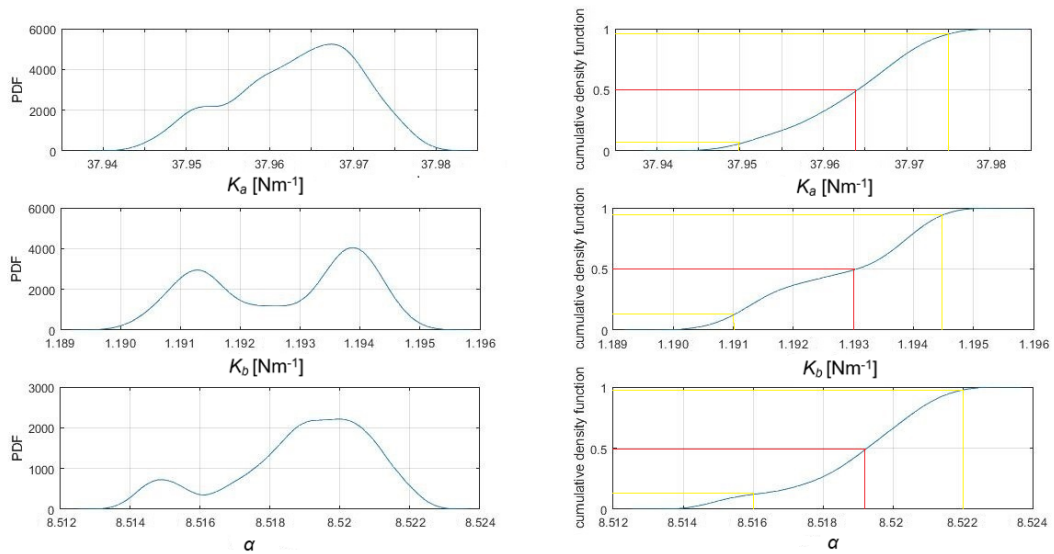
ANEXOS

a. Resultados obtenidos para 4 Hz.

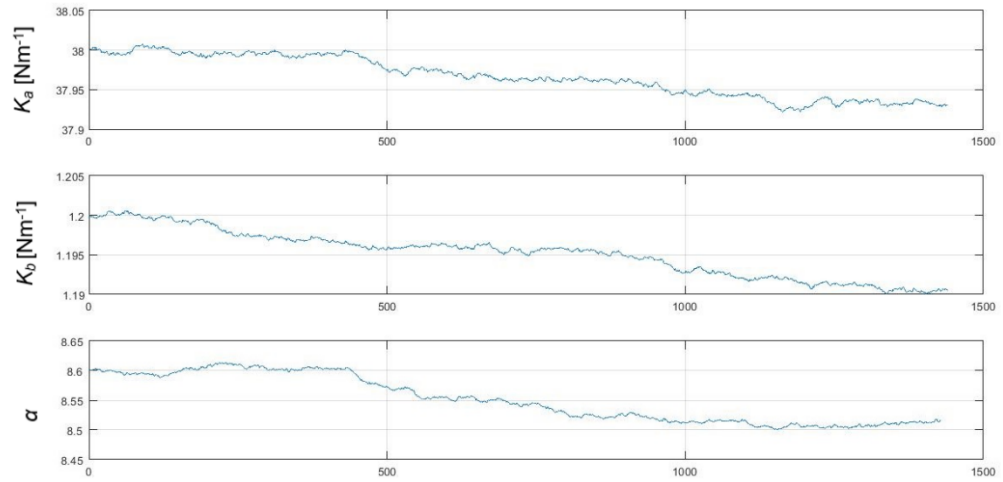
Gráfica 29. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 4 Hz.



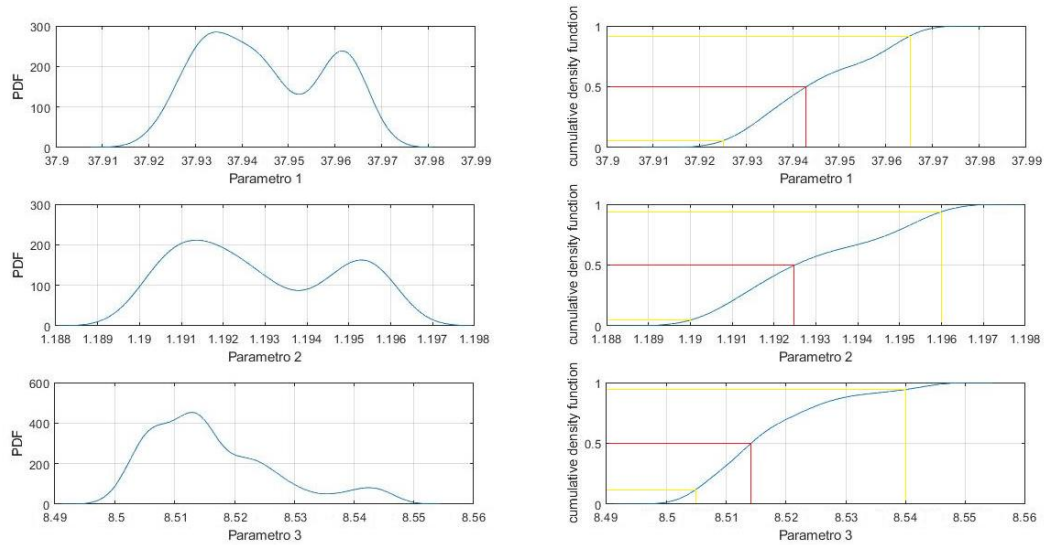
Gráfica 30. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 4 Hz.



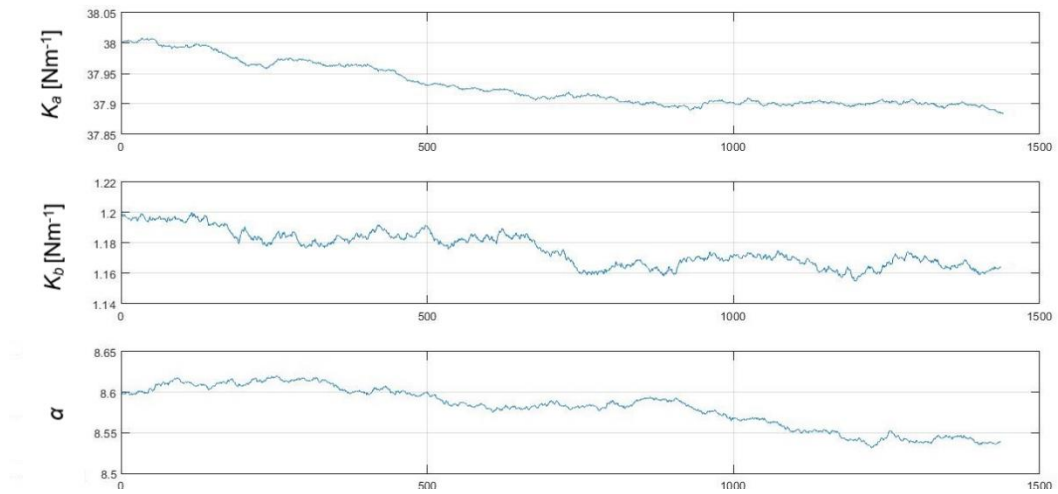
Gráfica 31. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 4 Hz.



Gráfica 32. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 4 Hz.



Gráfica 33. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 4 Hz.



Gráfica 34. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 4 Hz.

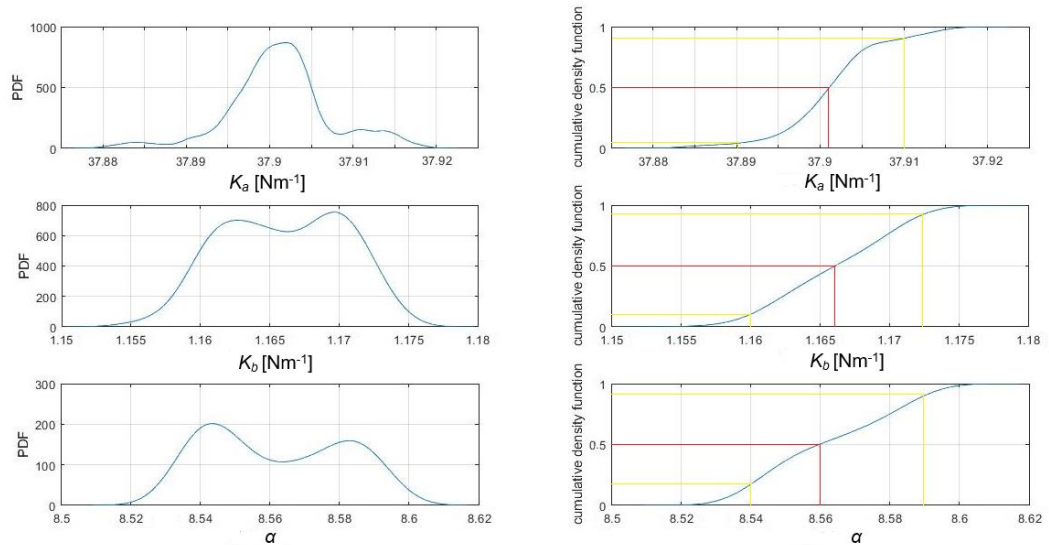
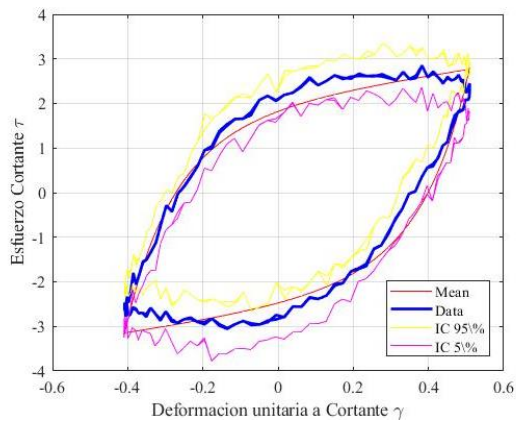
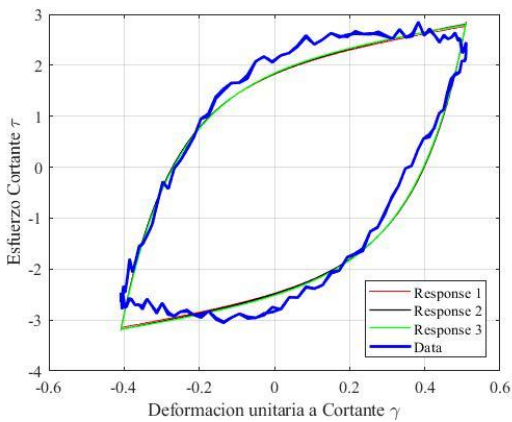


Tabla 19. Valor promedio de cada parámetro para 4 Hz.

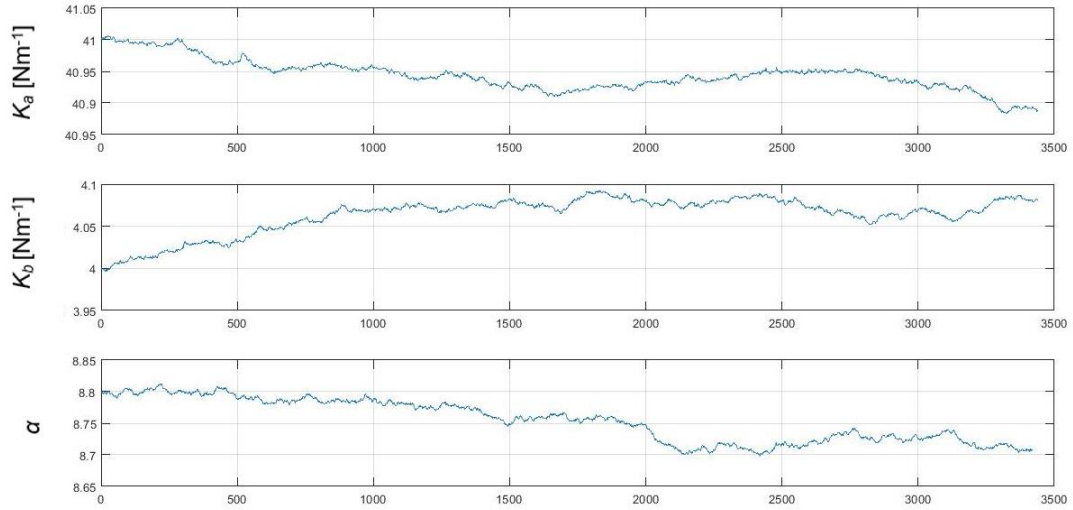
Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	37,935	1,184	8,528

Gráfica 35. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 4 Hz.

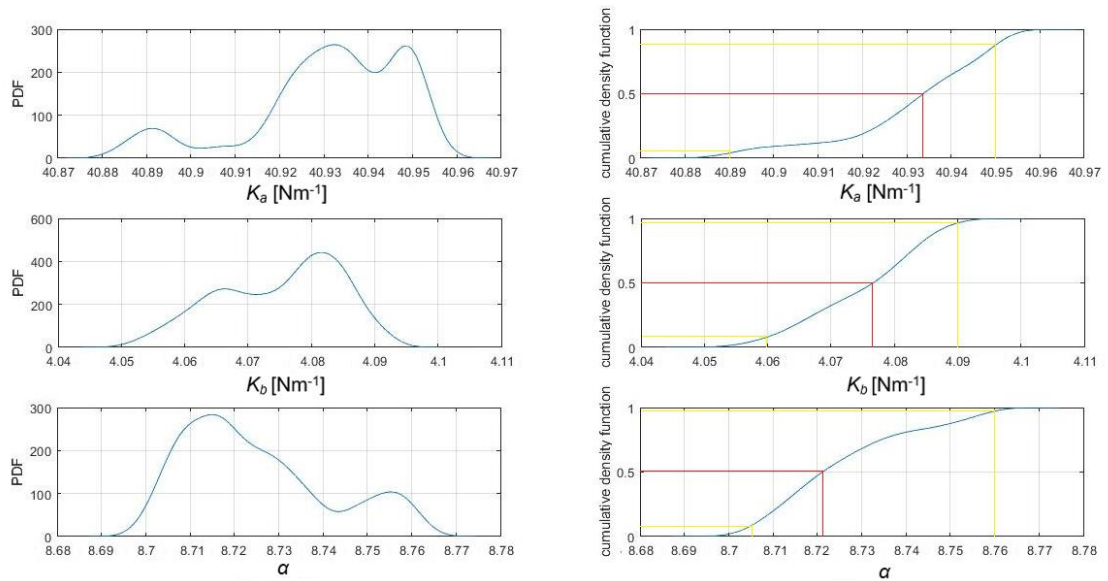


b. Resultados obtenidos para 5 Hz.

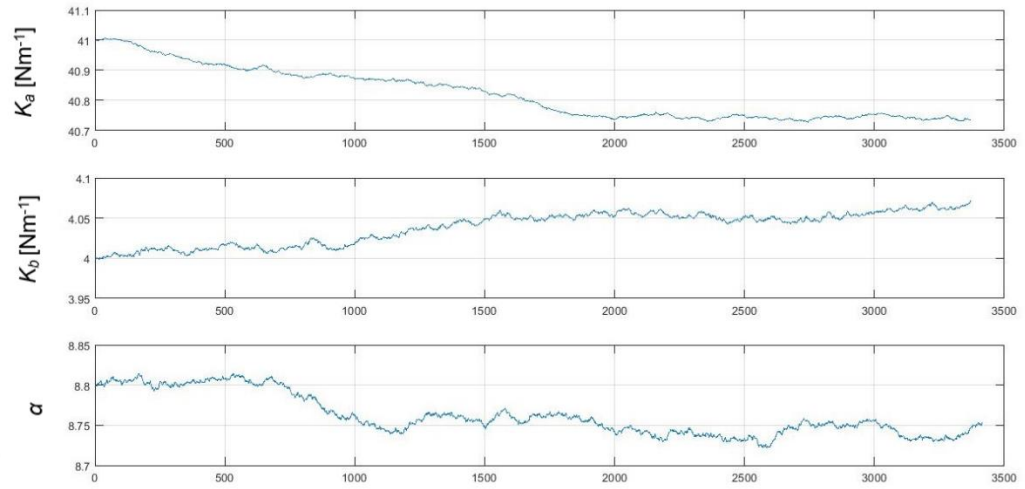
Gráfica 36. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 5 Hz.



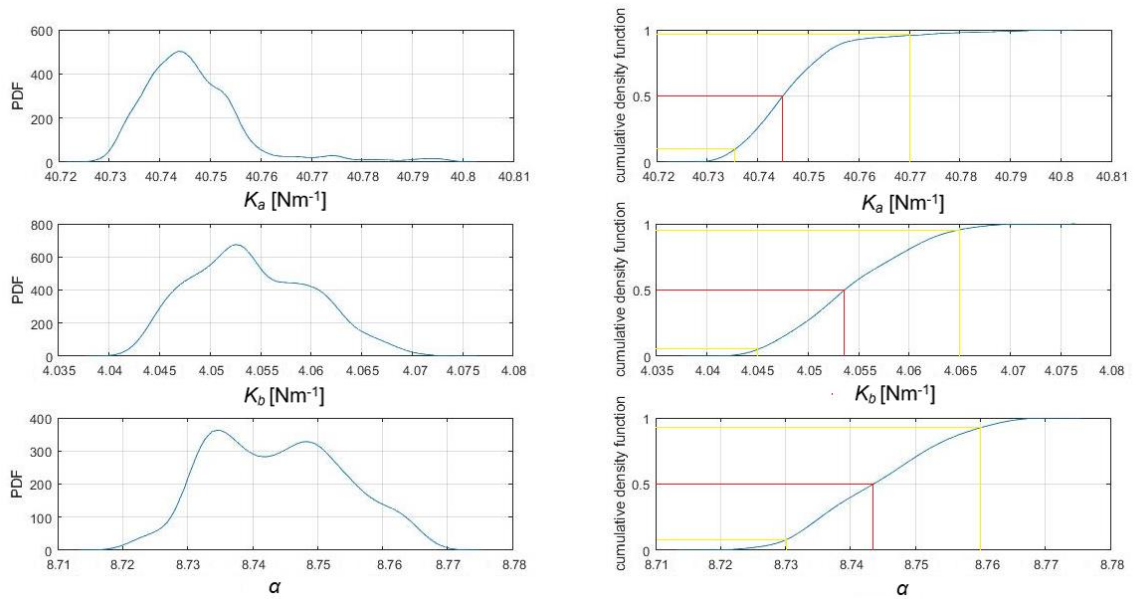
Gráfica 37. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 5 Hz.



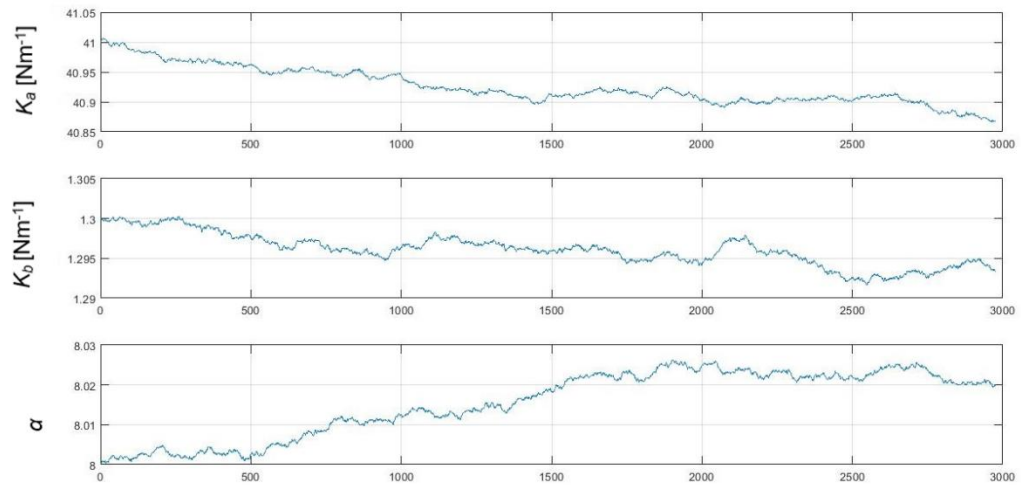
Gráfica 38. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 5 Hz.



Gráfica 39. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 5 Hz.



Gráfica 40. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 5 Hz.



Gráfica 41. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 5 Hz.

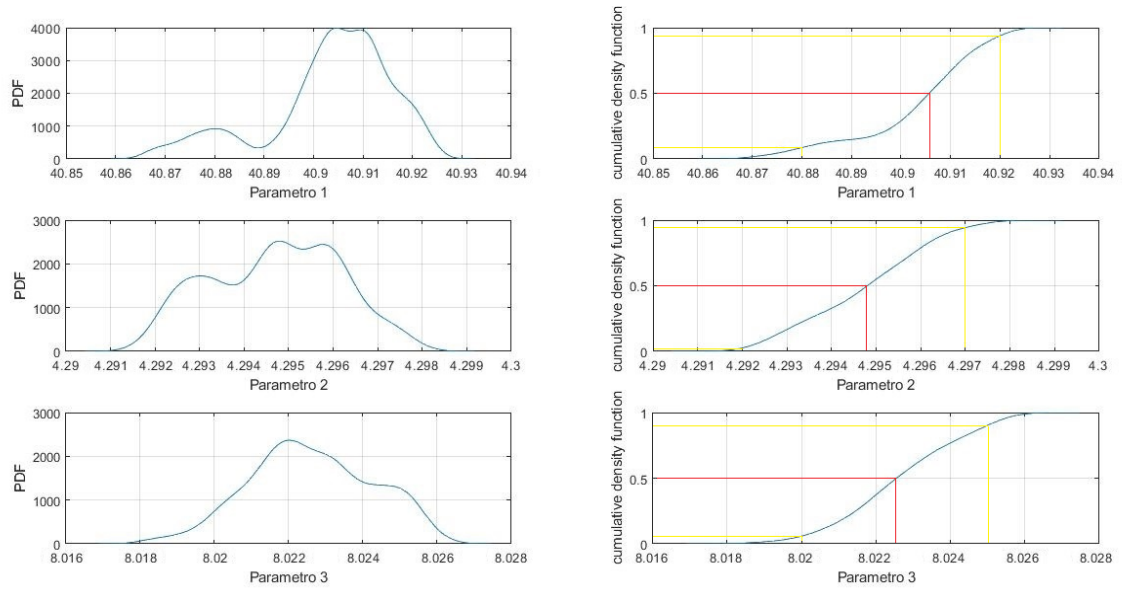
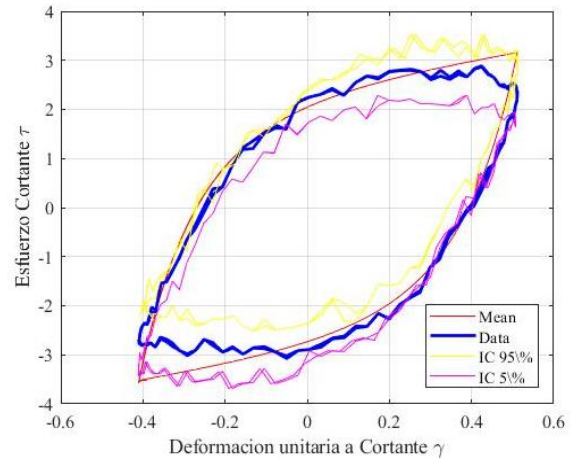
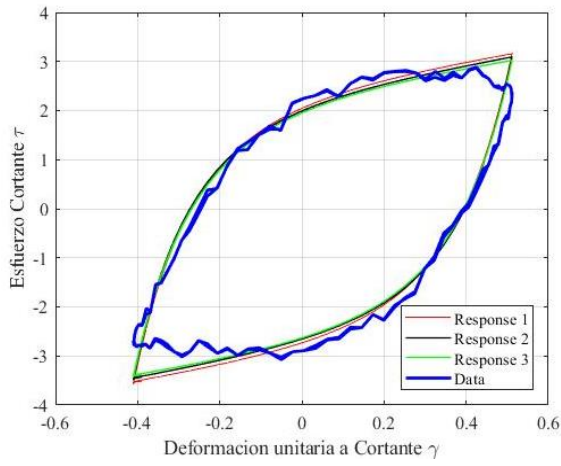


Tabla 20. Valor promedio de cada parámetro para 5 Hz.

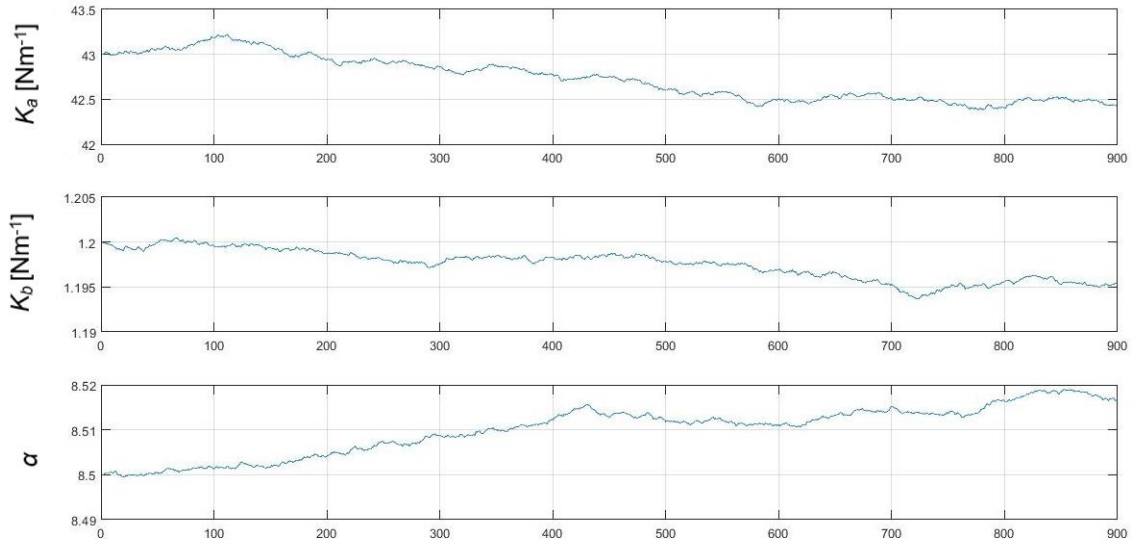
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Promedio	40,861	1,142	8,496

Gráfica 42. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 5 Hz.

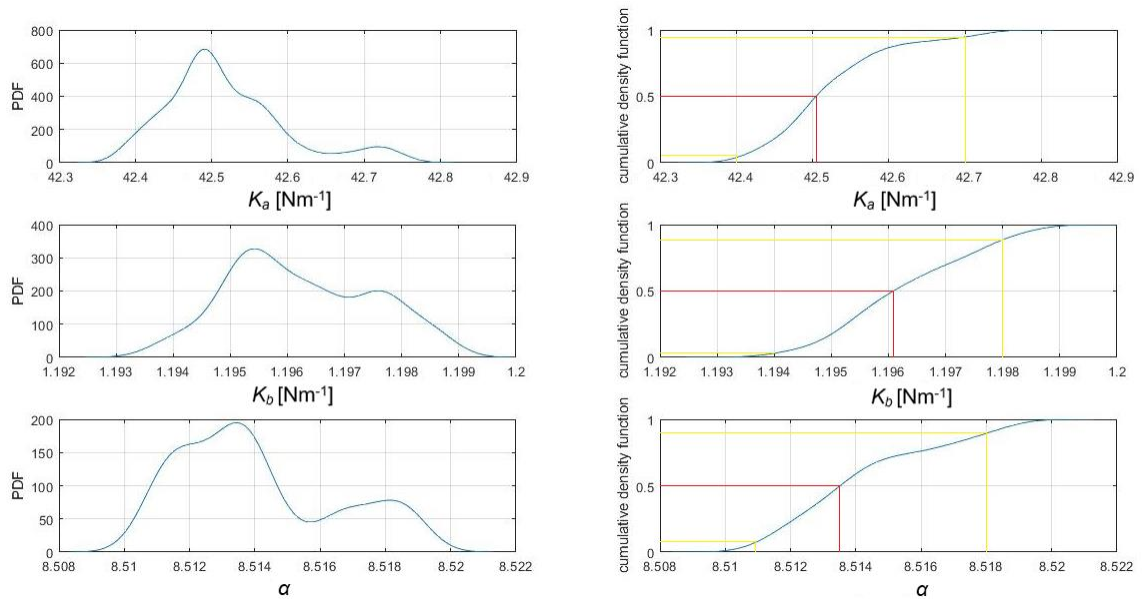


c. Resultados obtenidos para 6 Hz.

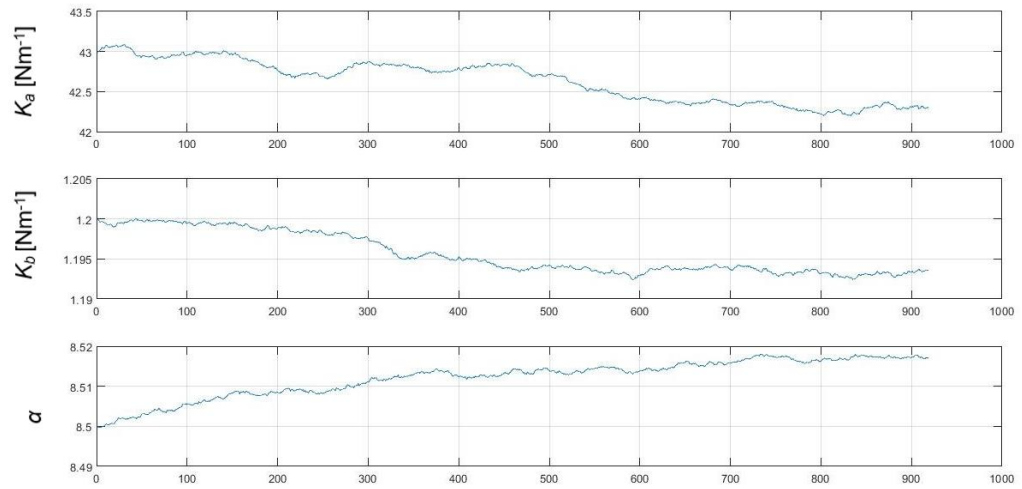
Gráfica 43. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 6 Hz



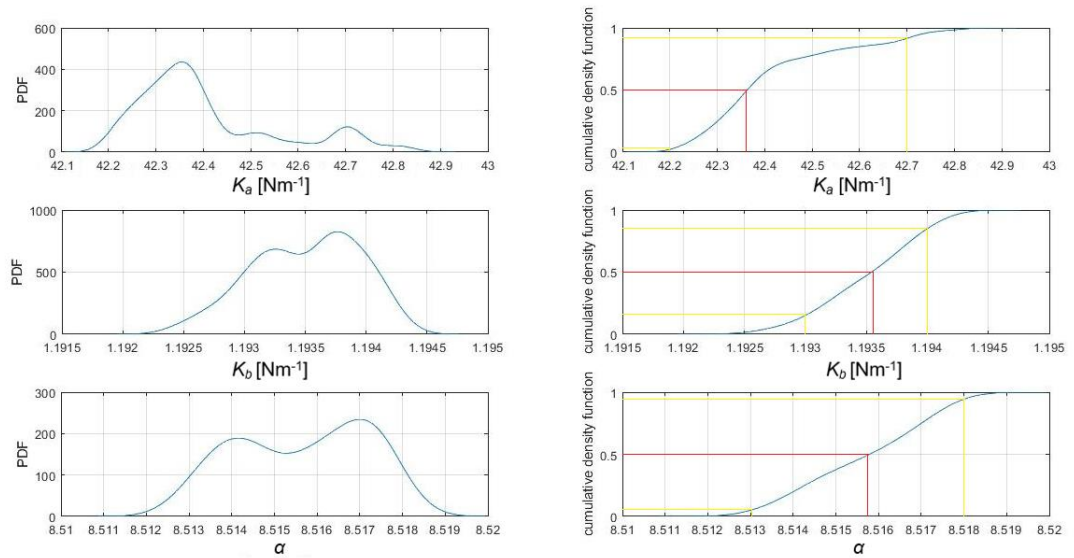
Gráfica 44. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 6 Hz.



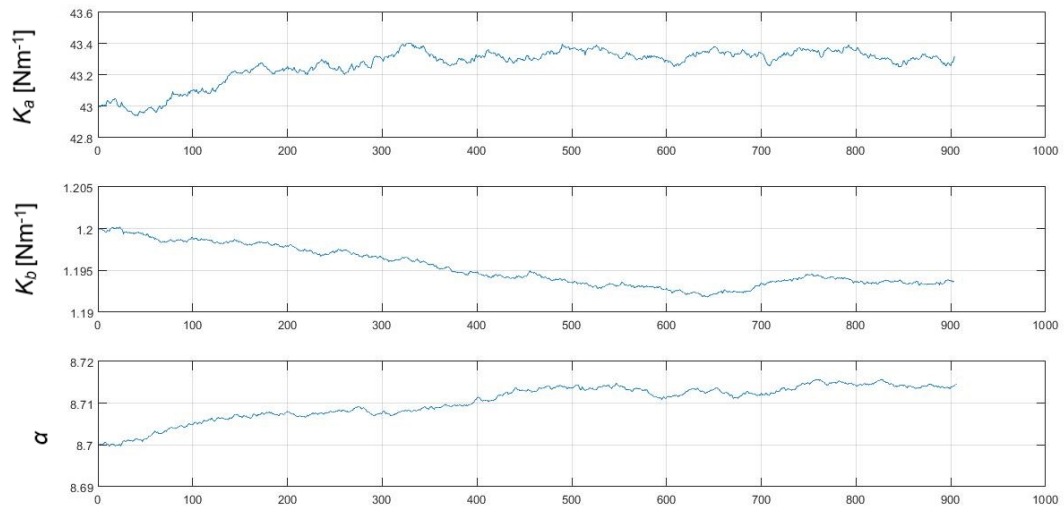
Gráfica 45. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 6 Hz.



Gráfica 46. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 6 Hz.



Gráfica 47. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 6 Hz.



Gráfica 48. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 6 Hz.

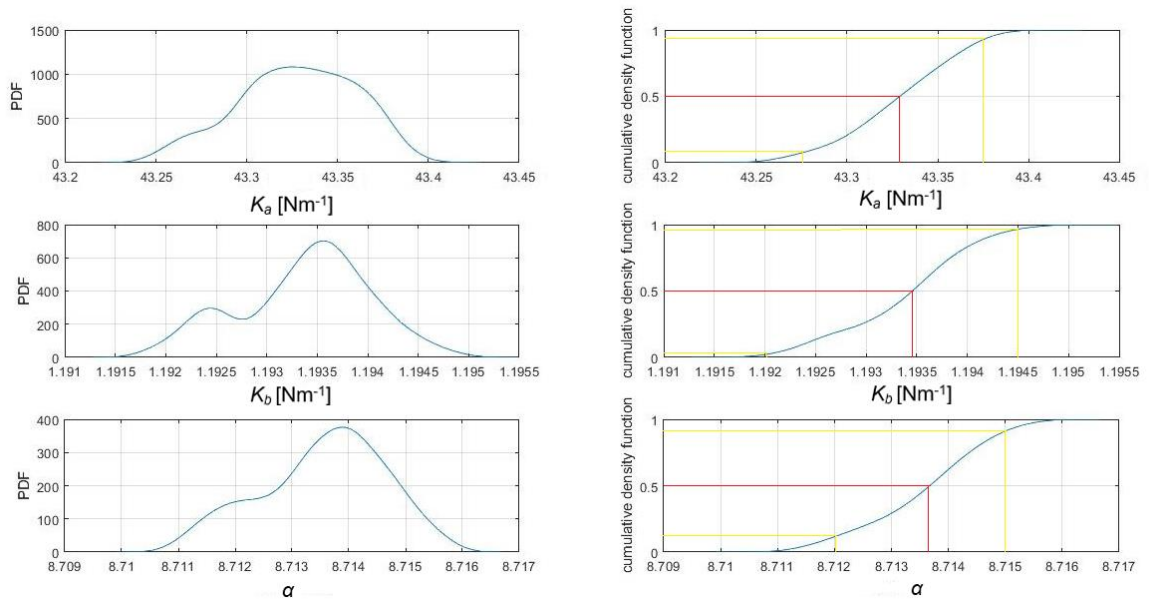
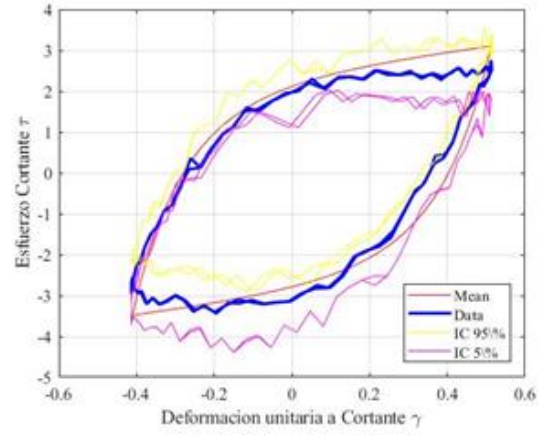
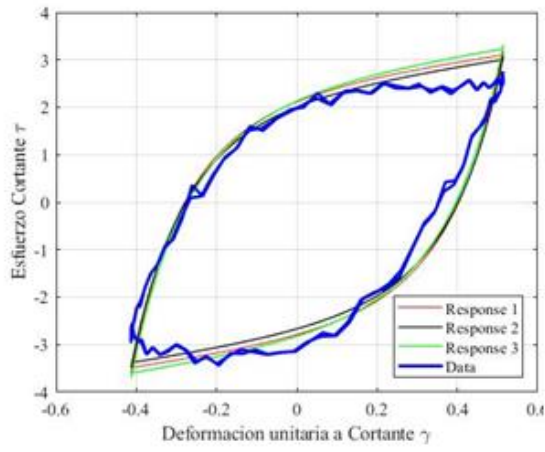


Tabla 21. Valor promedio de cada parámetro para 6 Hz.

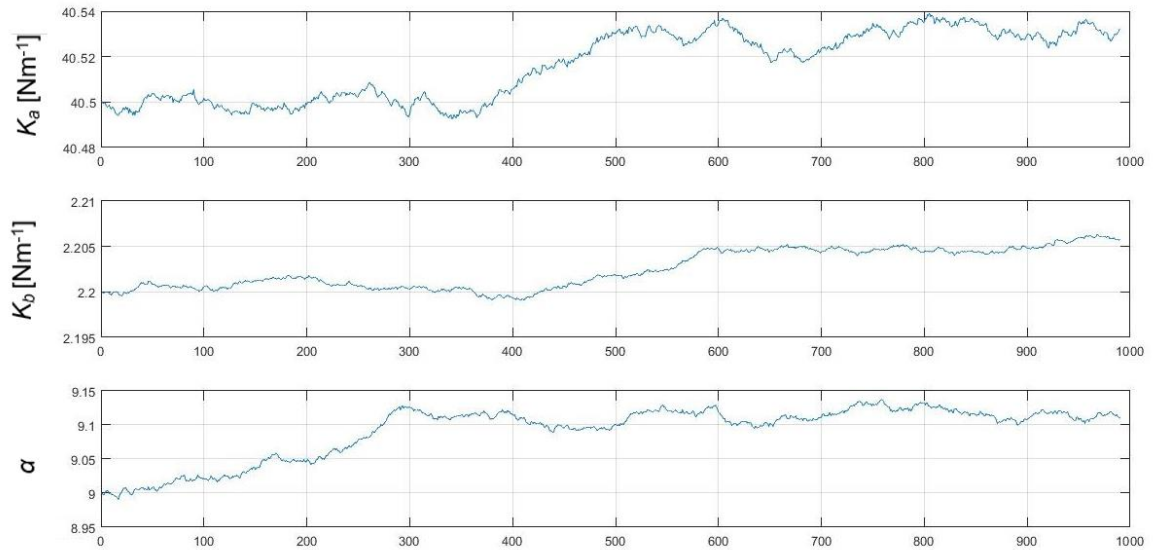
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Promedio	42,730	1,194	8,581

Gráfica 49. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 6 Hz.

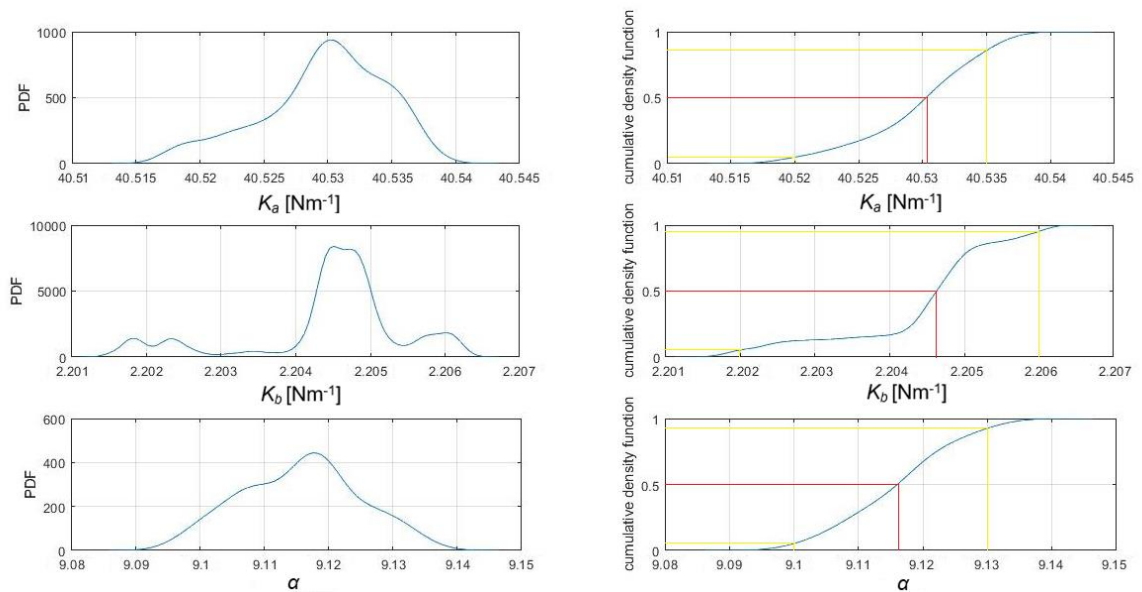


d. Resultados obtenidos para 7 Hz.

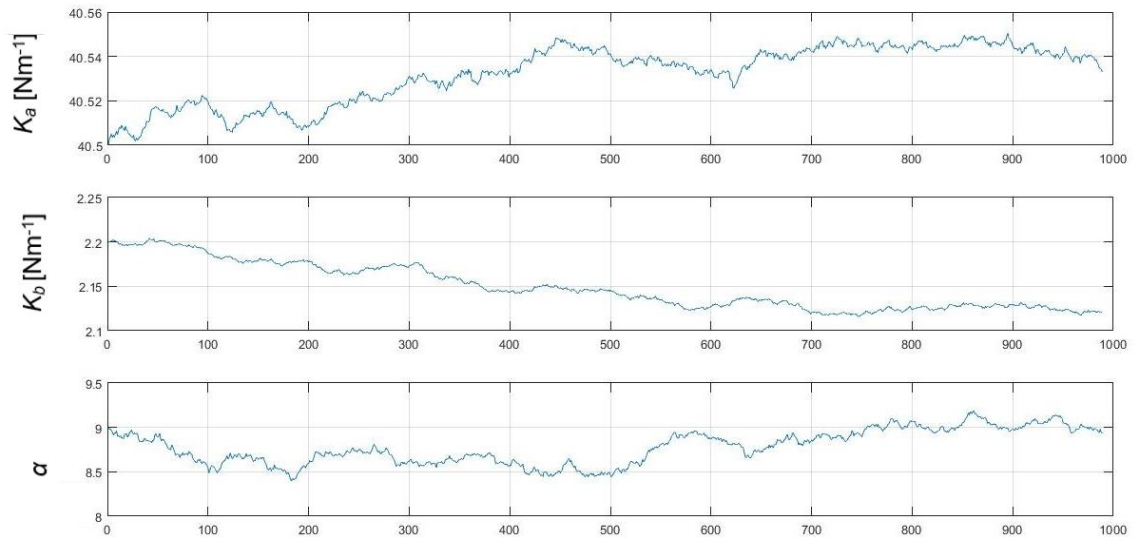
Gráfica 50. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 7 Hz.



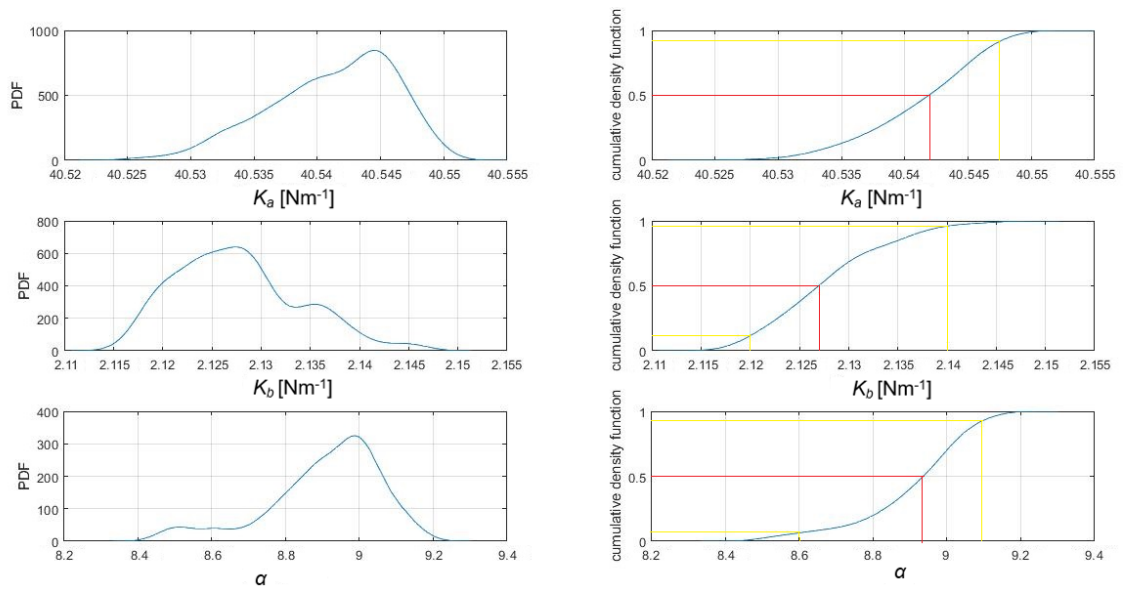
Gráfica 51. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 7 Hz.



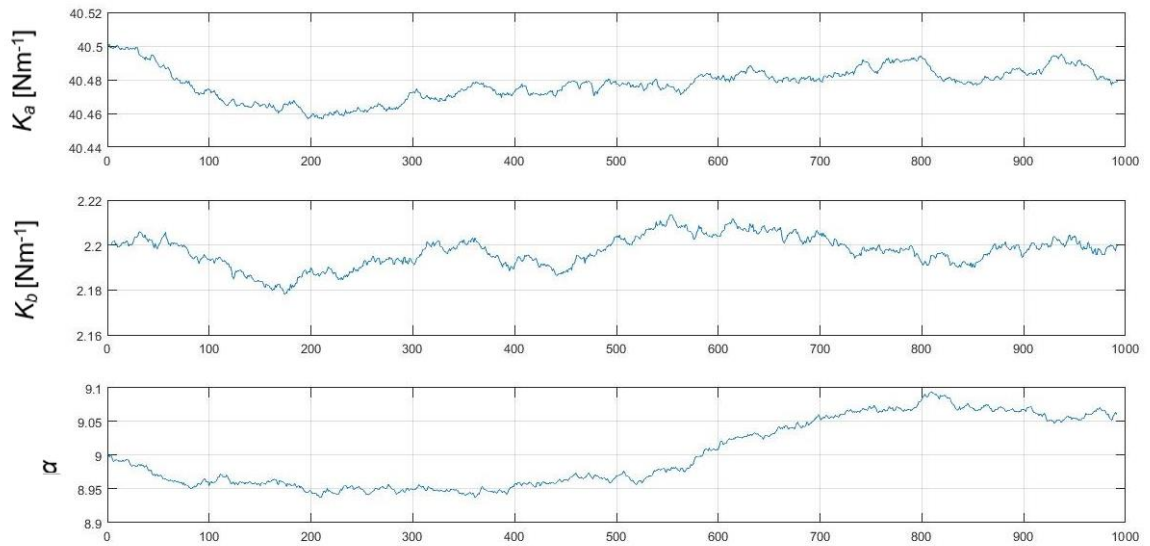
Gráfica 52. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 7 Hz.



Gráfica 53. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 7 Hz.



Gráfica 54. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 7 Hz.



Gráfica 55. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 7 Hz.

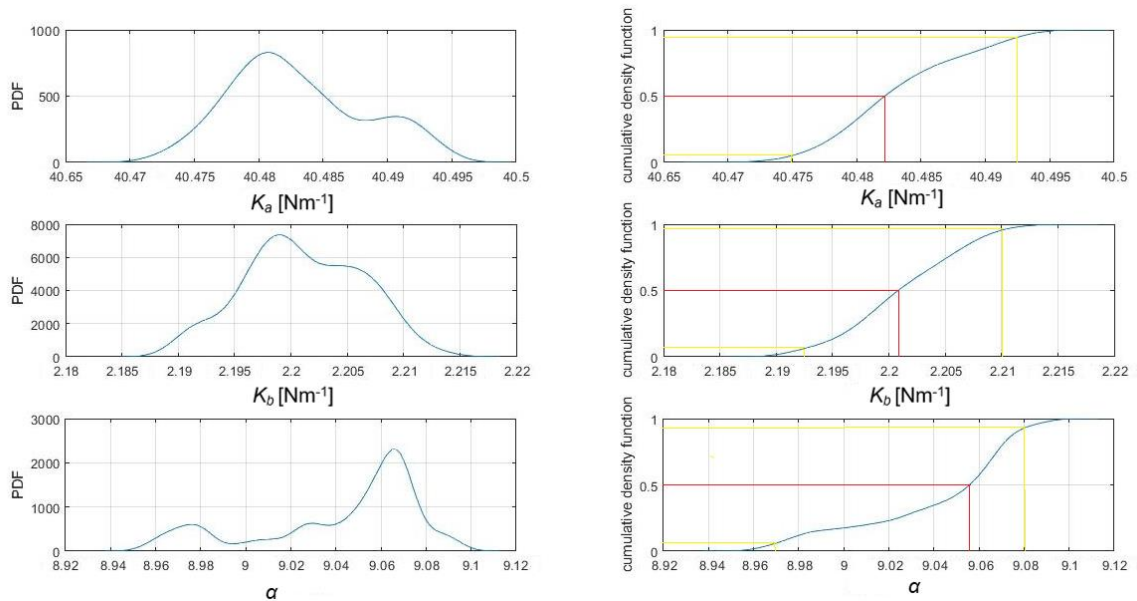
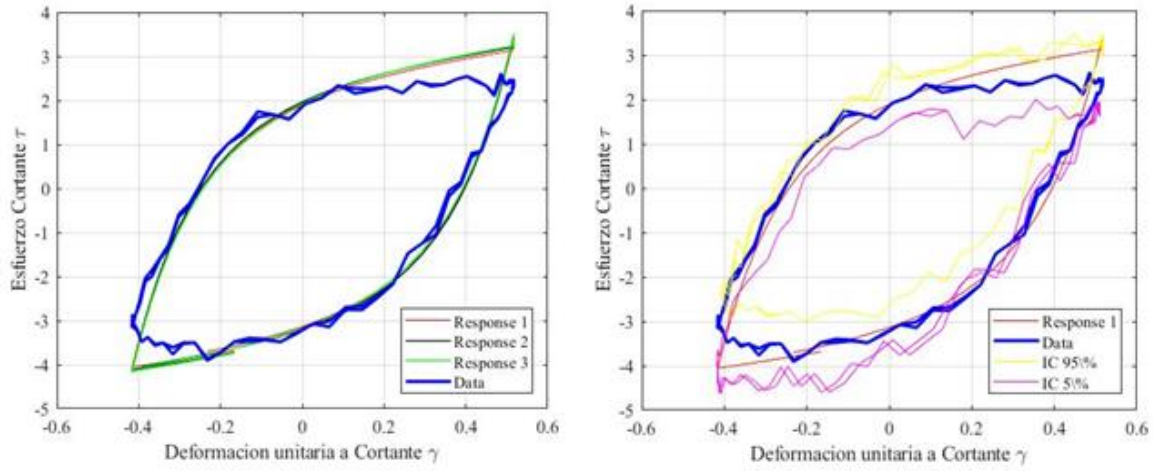


Tabla 22. Valor promedio de cada parámetro para 7 Hz.

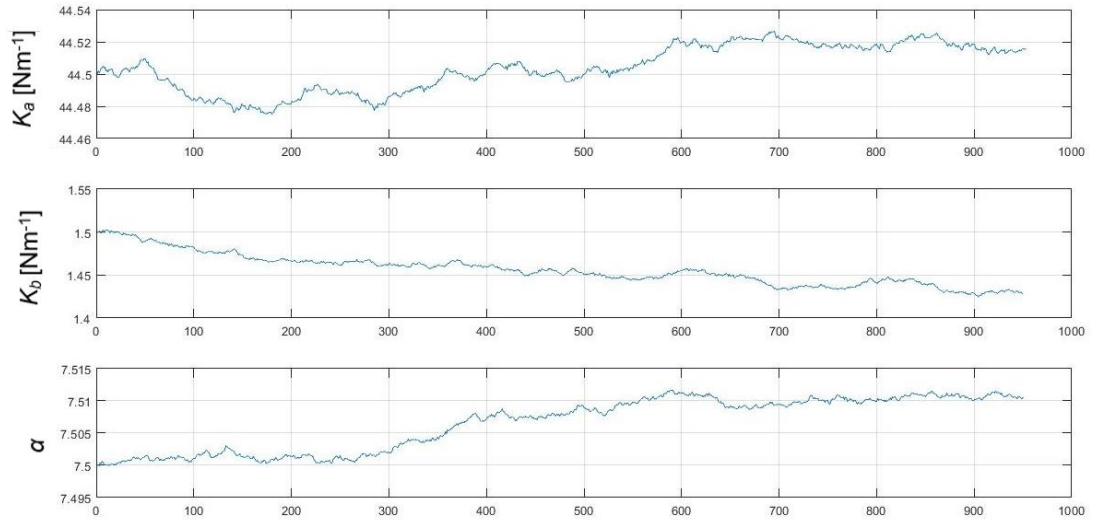
Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	40,518	2,177	9,038

Gráfica 56. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 7 Hz.

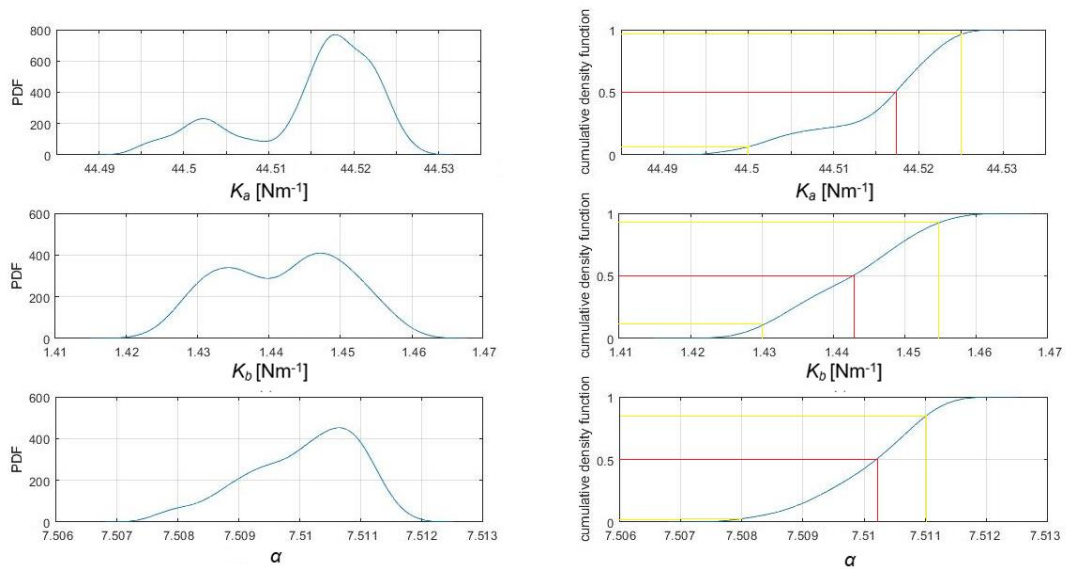


e. Resultados obtenidos para 8 Hz

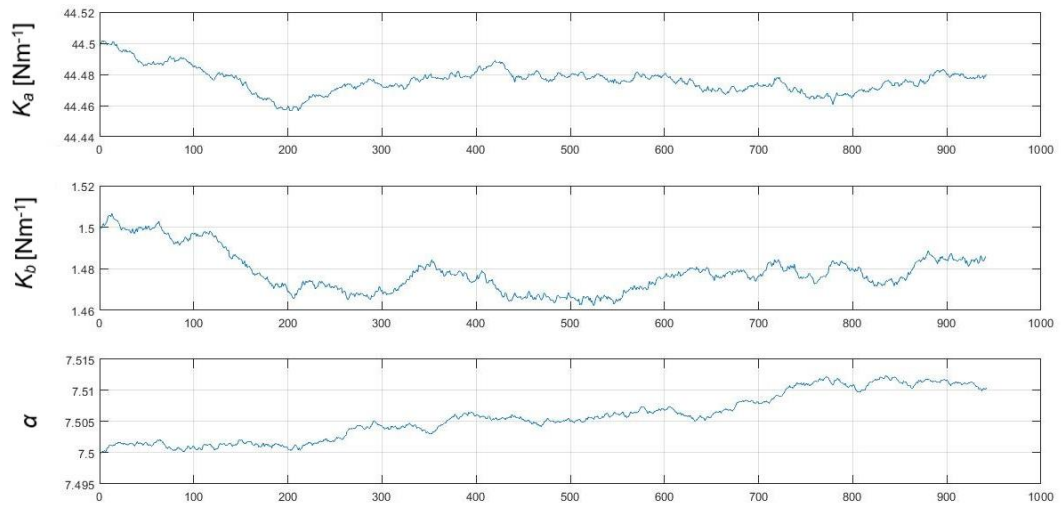
Gráfica 57. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 8 Hz



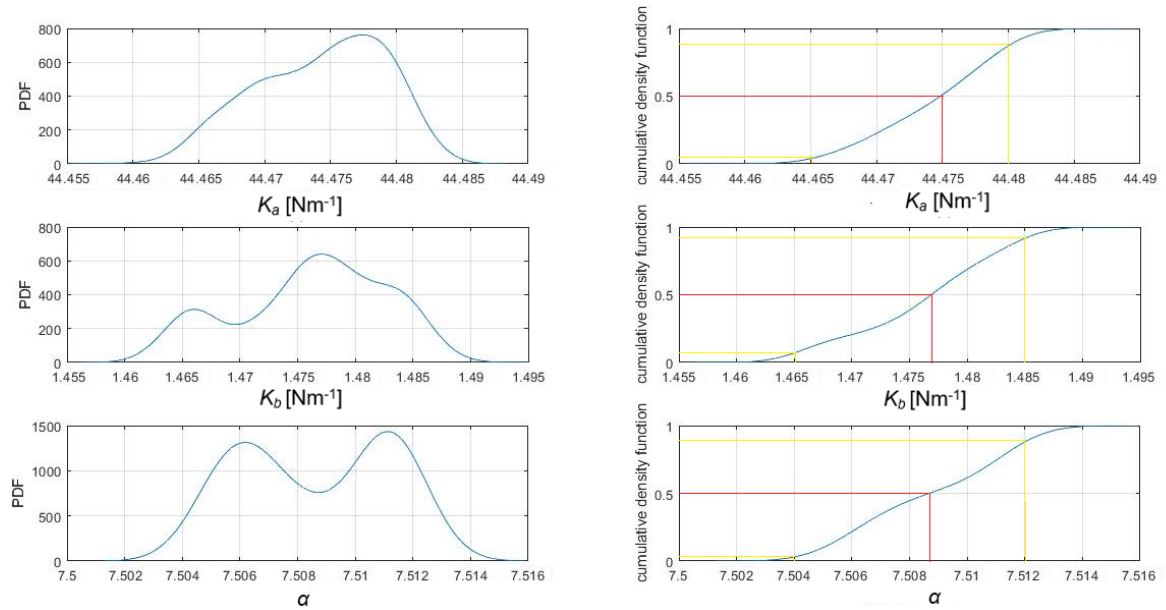
Gráfica 58. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 8 Hz.



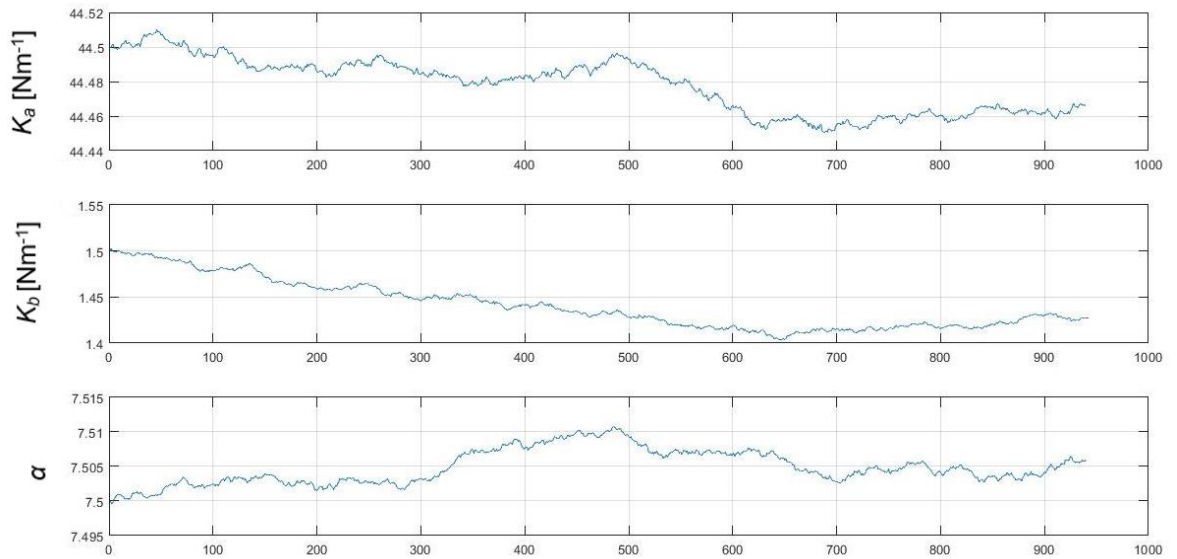
Gráfica 59. . Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 8 Hz.



Gráfica 60. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 8 Hz.



Gráfica 61. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 8 Hz.



Gráfica 62. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 8 Hz.

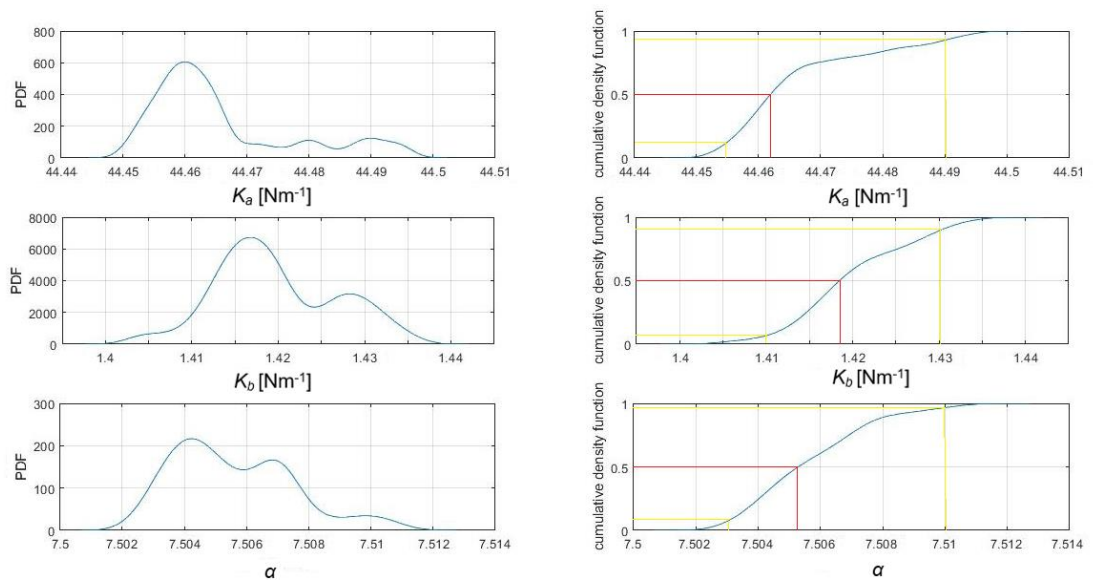
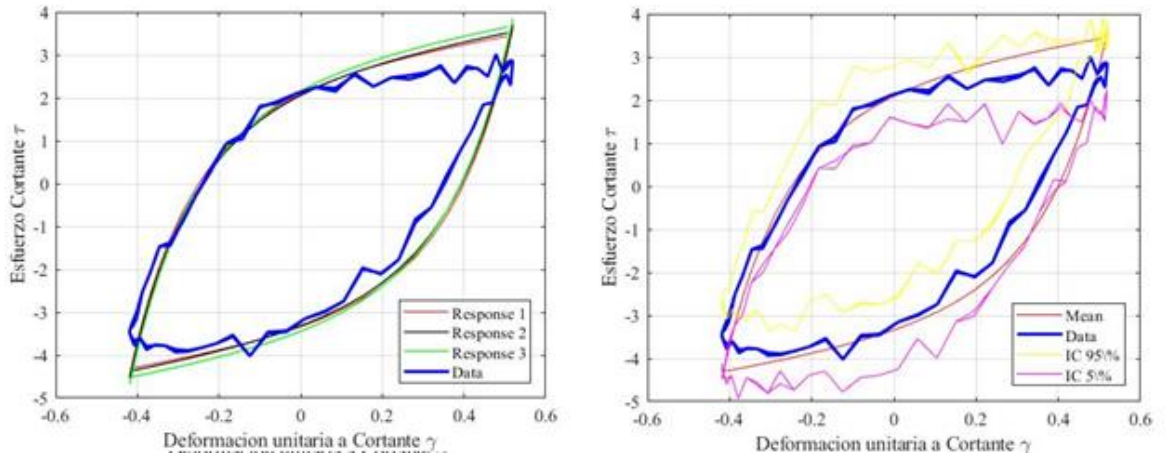


Tabla 23. Valor promedio de cada parámetro para 8 Hz.

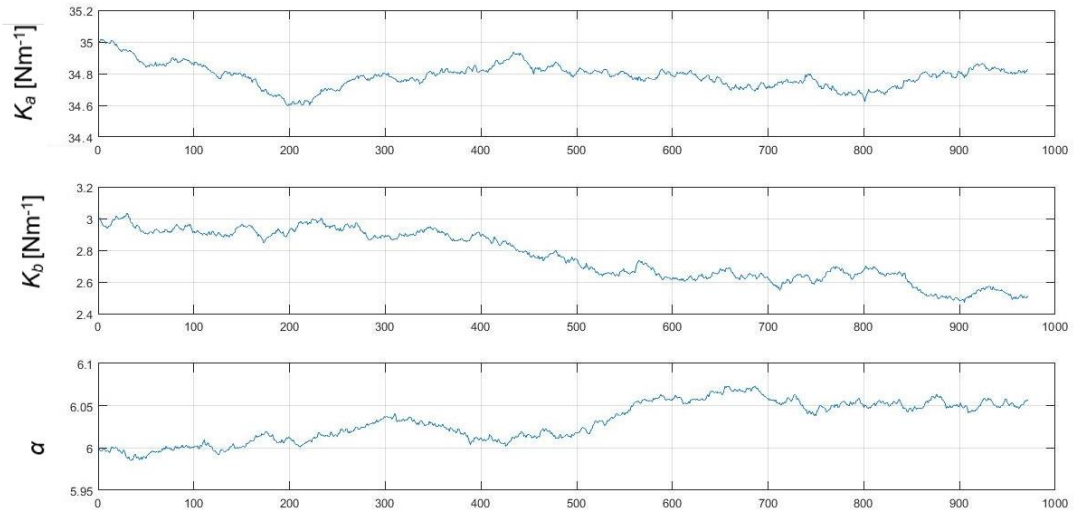
Parámetro	Ka [N/m]	Kb [N/m]	α
Promedio	44,485	1,448	7,508

Gráfica 63. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 8 Hz.

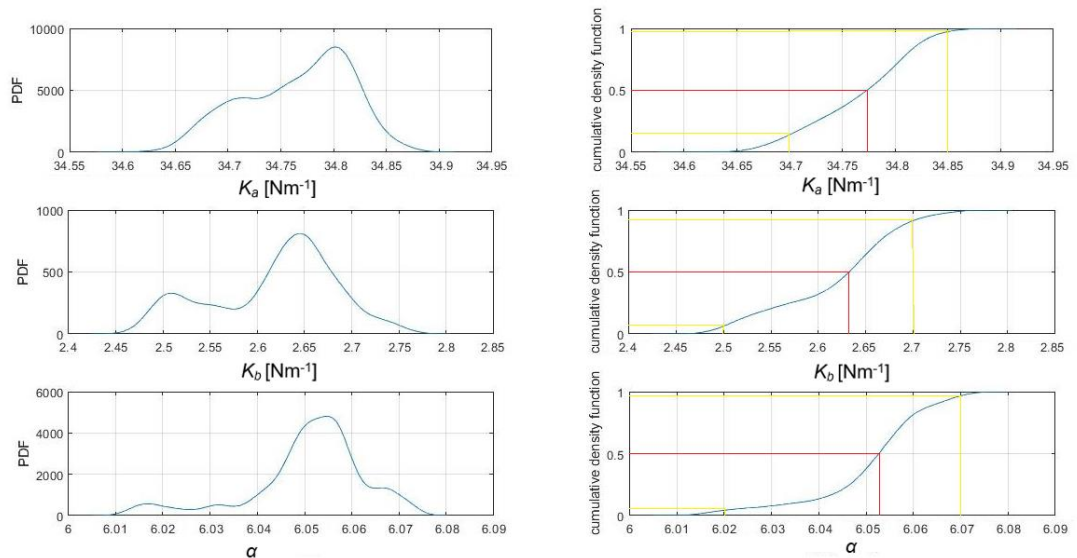


f. Resultados obtenidos para 9 Hz.

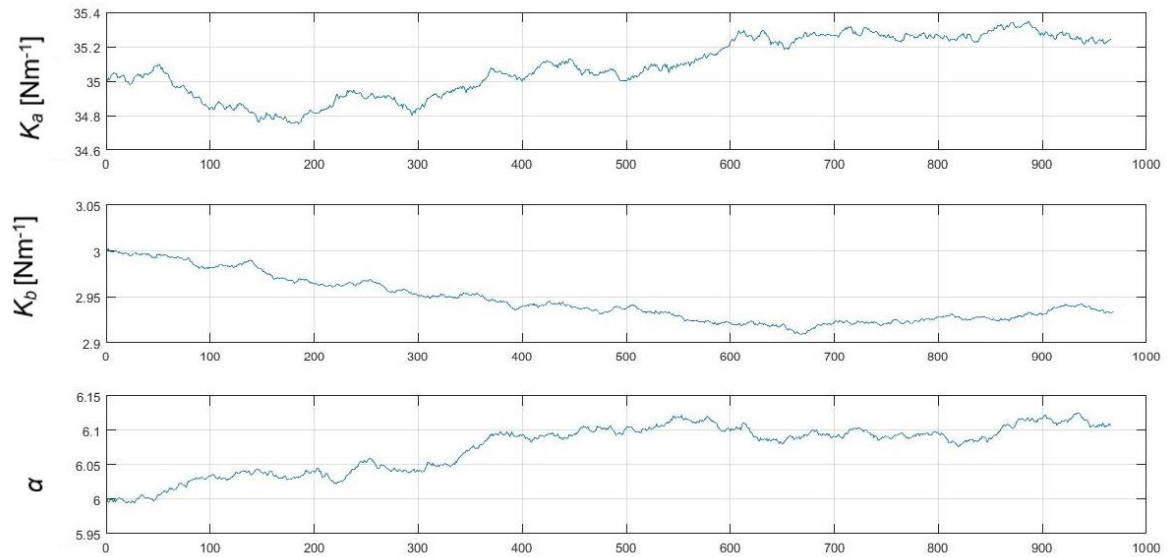
Gráfica 64. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 9 Hz.



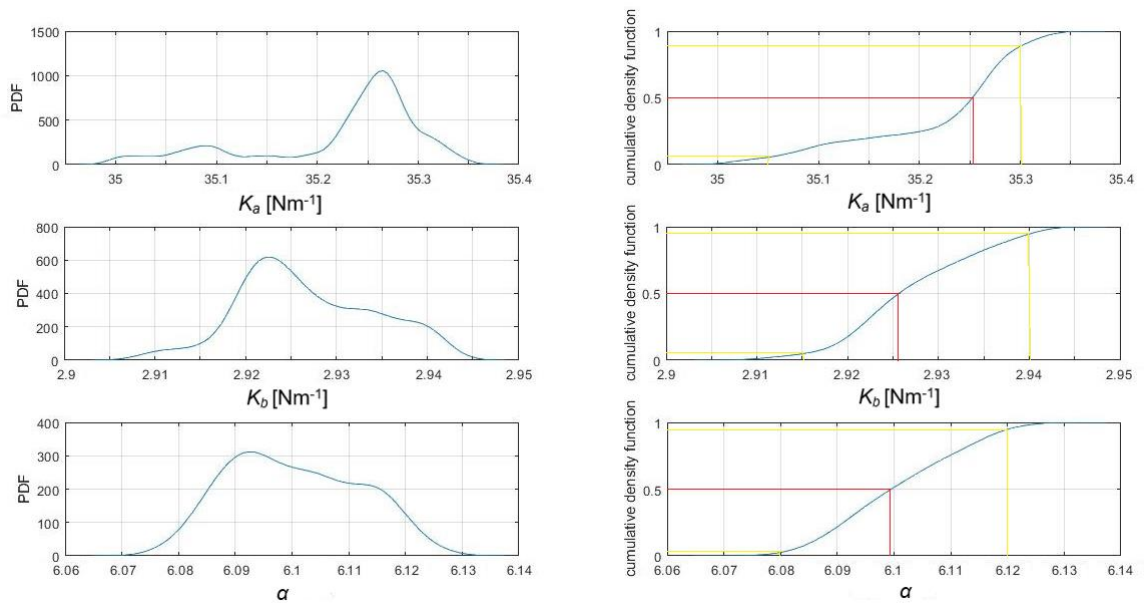
Gráfica 65. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 9 Hz.



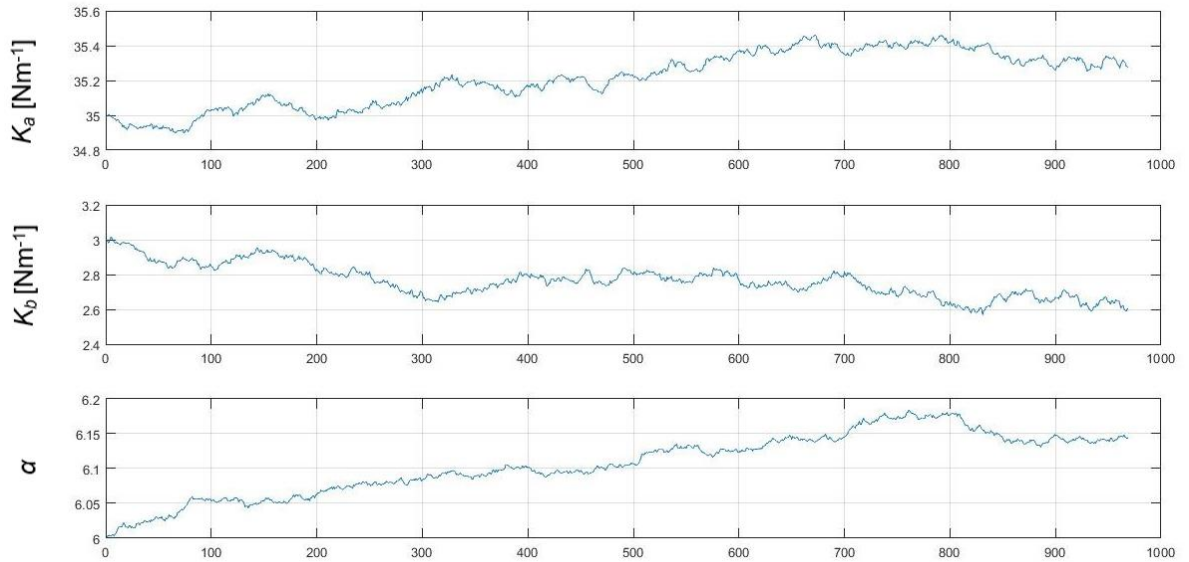
Gráfica 66. Cadenas de Markov para la segunda respuesta de 9 Hz.



Gráfica 67. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 9 Hz.



Gráfica 68. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 9 Hz.



Gráfica 69. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 9 Hz.

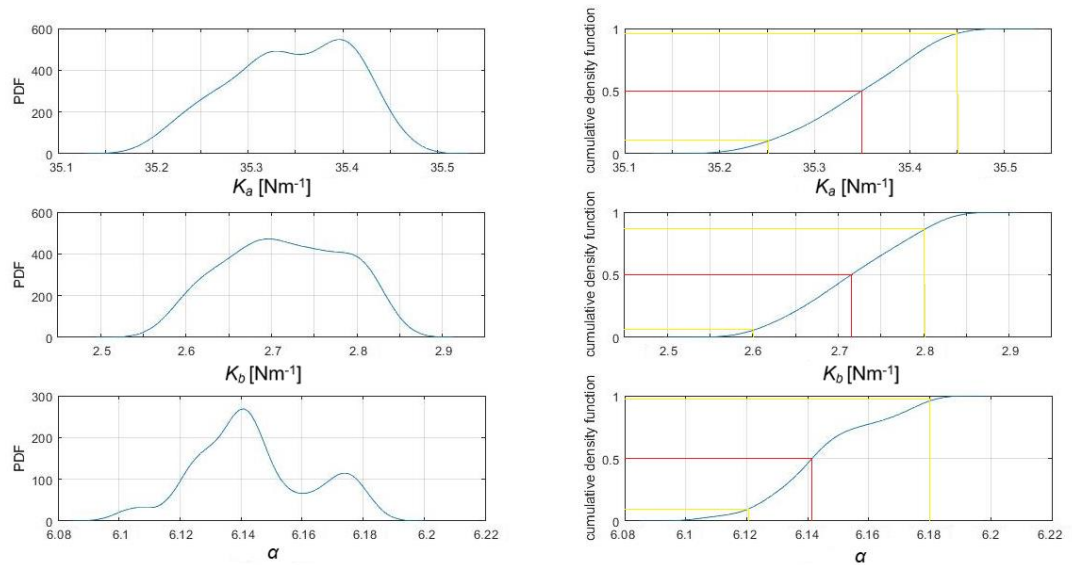
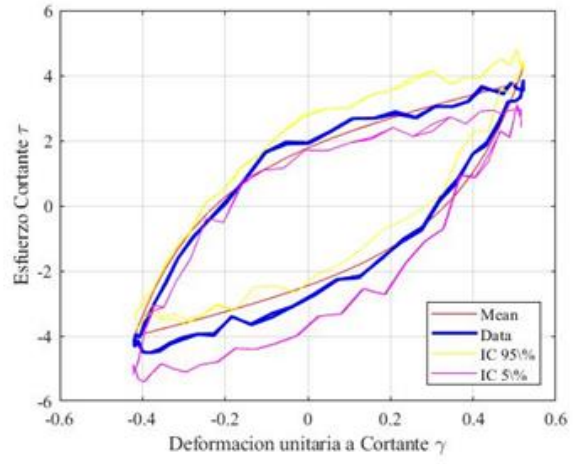
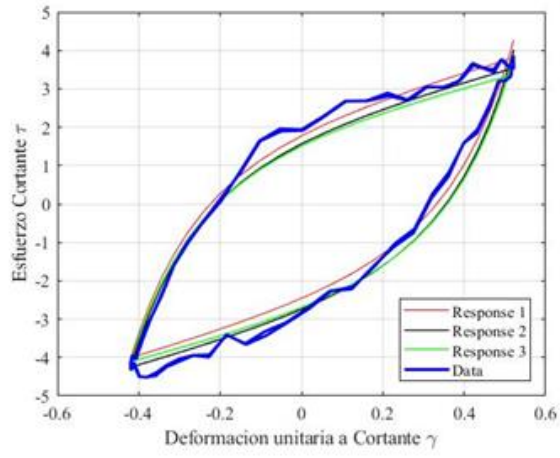


Tabla 24. Valor promedio de cada parámetro para 9 Hz.

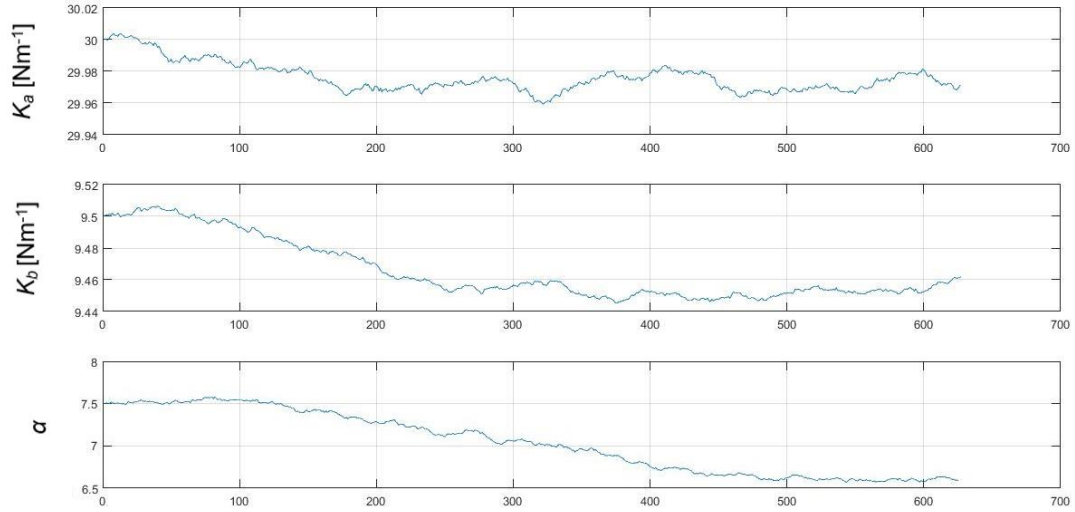
Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Promedio	35,127	2,760	6,098

Gráfica 70. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 9 Hz.

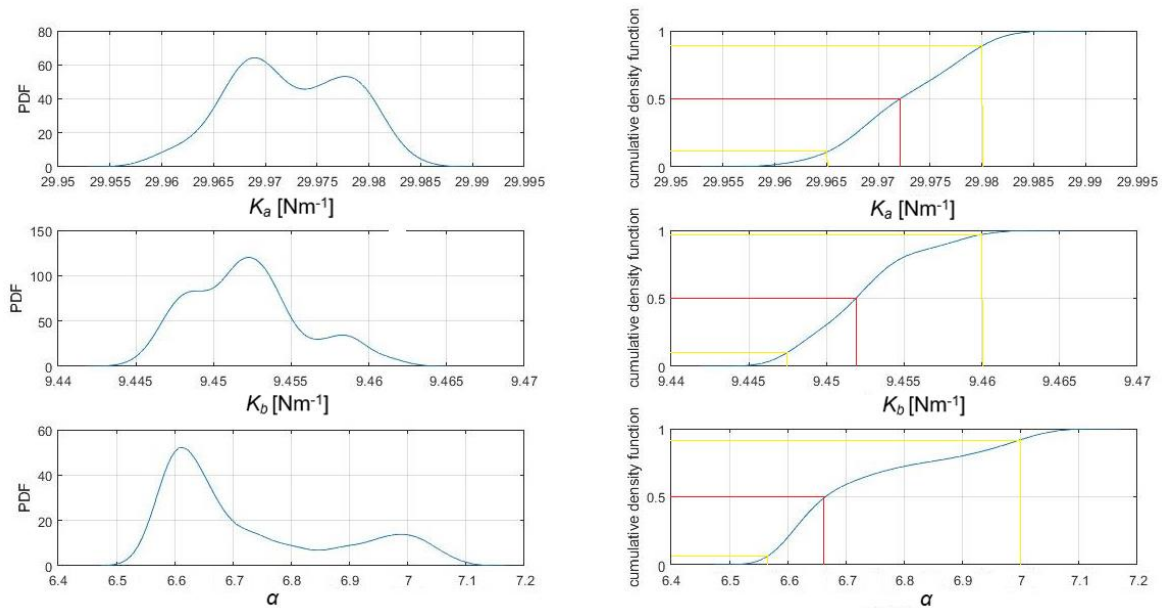


g. Resultados obtenidos para 10 Hz.

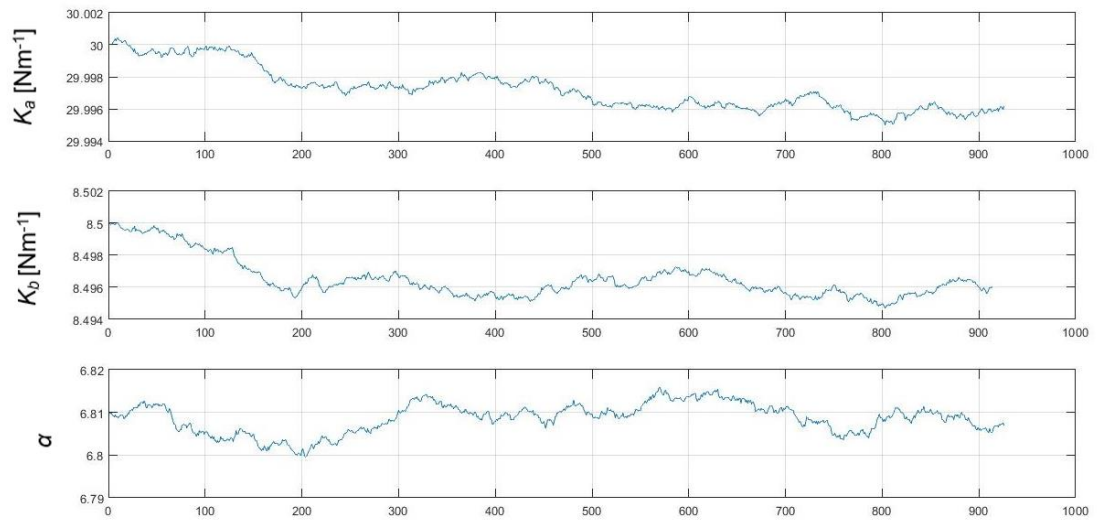
Gráfica 71. Cadenas de Markov para la primera respuesta de 10 Hz.



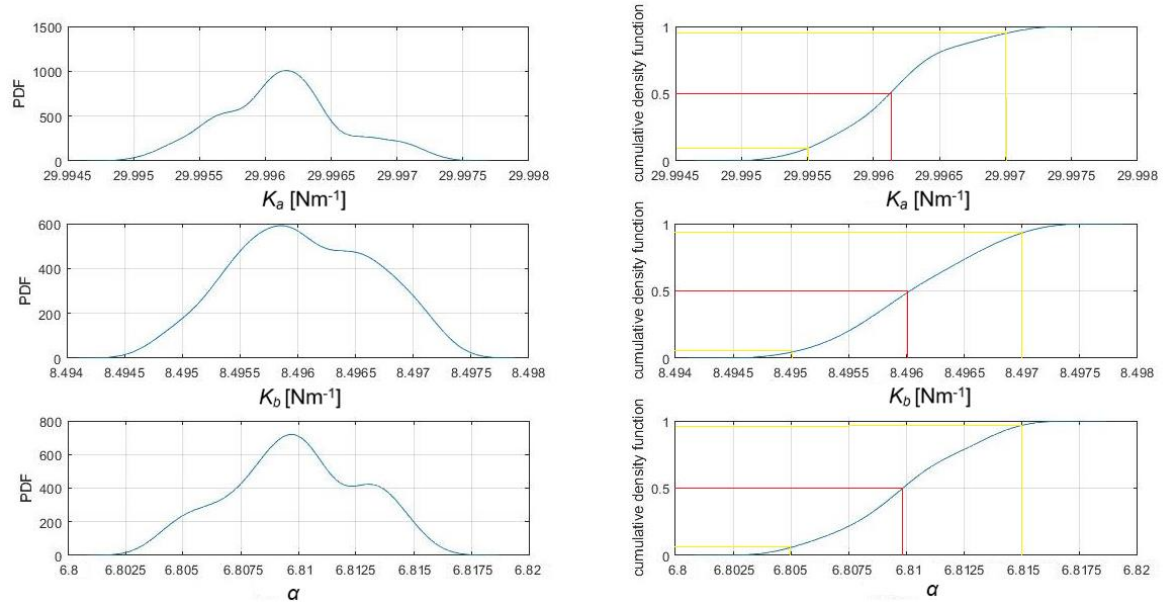
Gráfica 72. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la primera respuesta de 10 Hz.



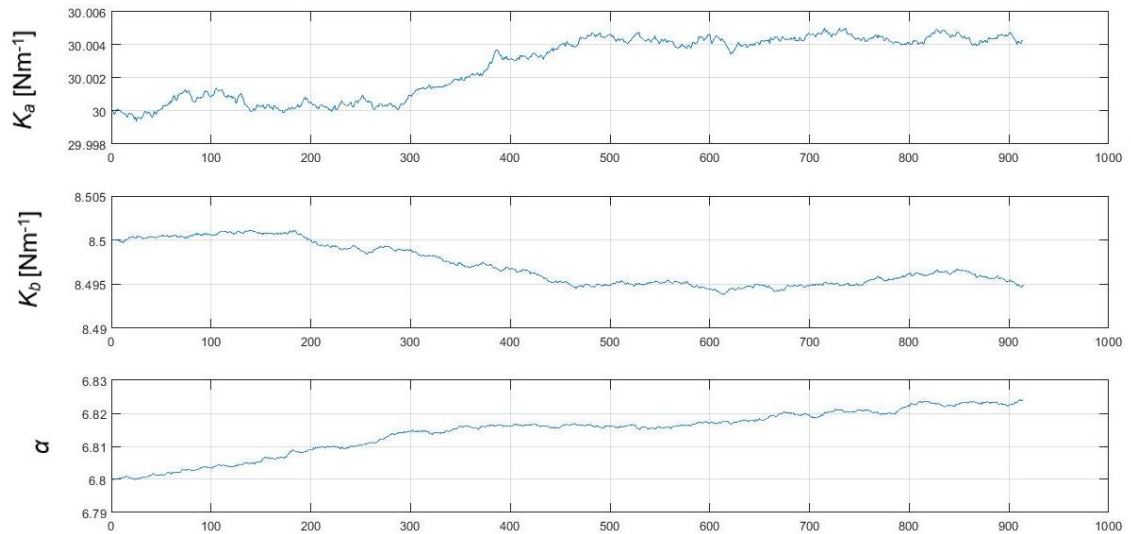
Gráfica 73. Cadenas de Markov para la tercera segunda de 10 Hz.



Gráfica 74. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la segunda respuesta de 10 Hz.



Gráfica 75. Cadenas de Markov para la tercera respuesta de 10 Hz.



Gráfica 76. Funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF) para la tercera respuesta de 10 Hz.

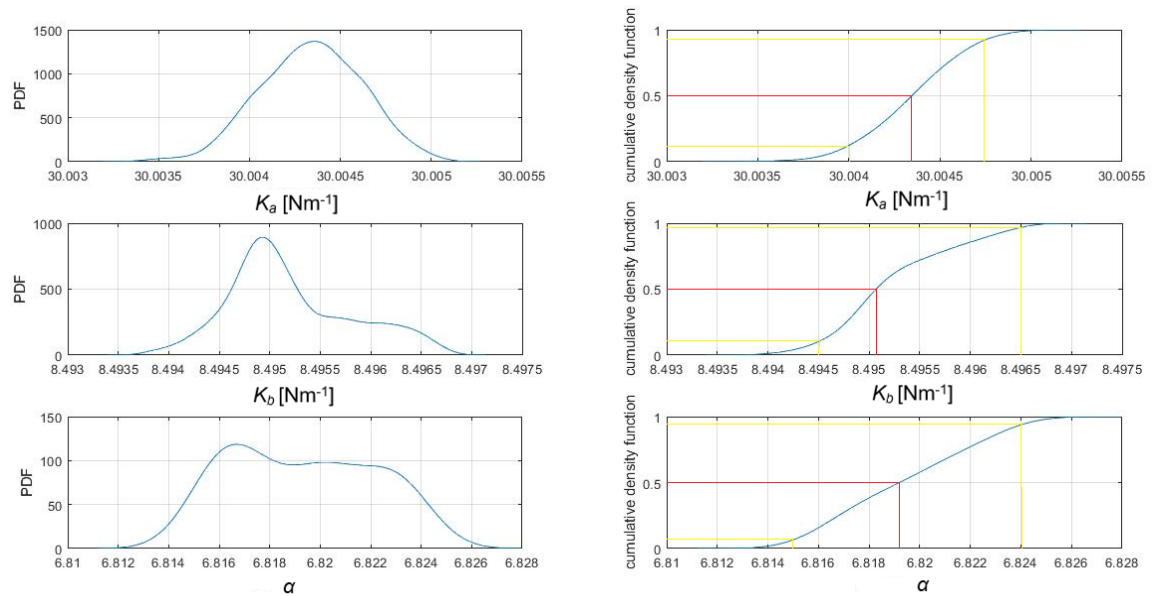
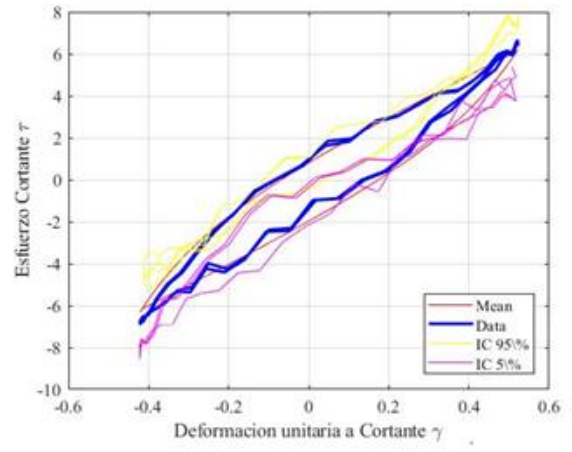
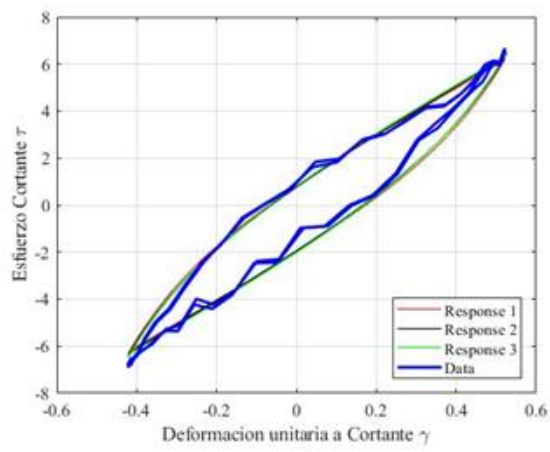


Tabla 25. Valor promedio de cada parámetro para 10 Hz.

Parámetro	K_a [N/m]	K_b [N/m]	α
Promedio	29,991	8,814	6,766

Gráfica 77. Ajuste del modelo teórico y los datos experimentales para 10 Hz.



h. Data sheet sensor de distancia.

HN24MGV-P24

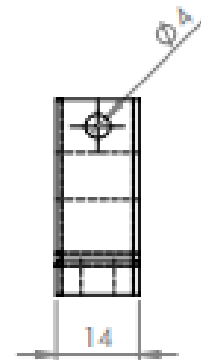
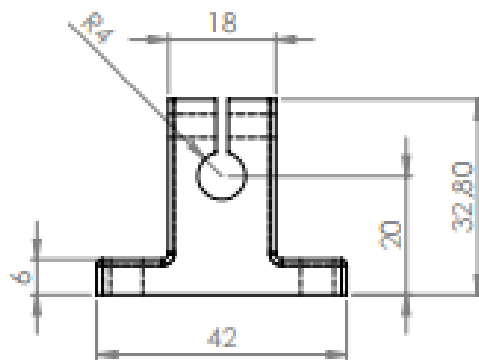
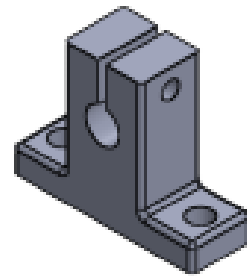
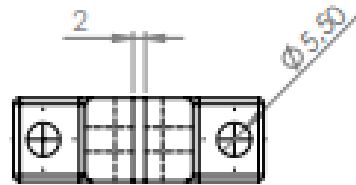
Referencia



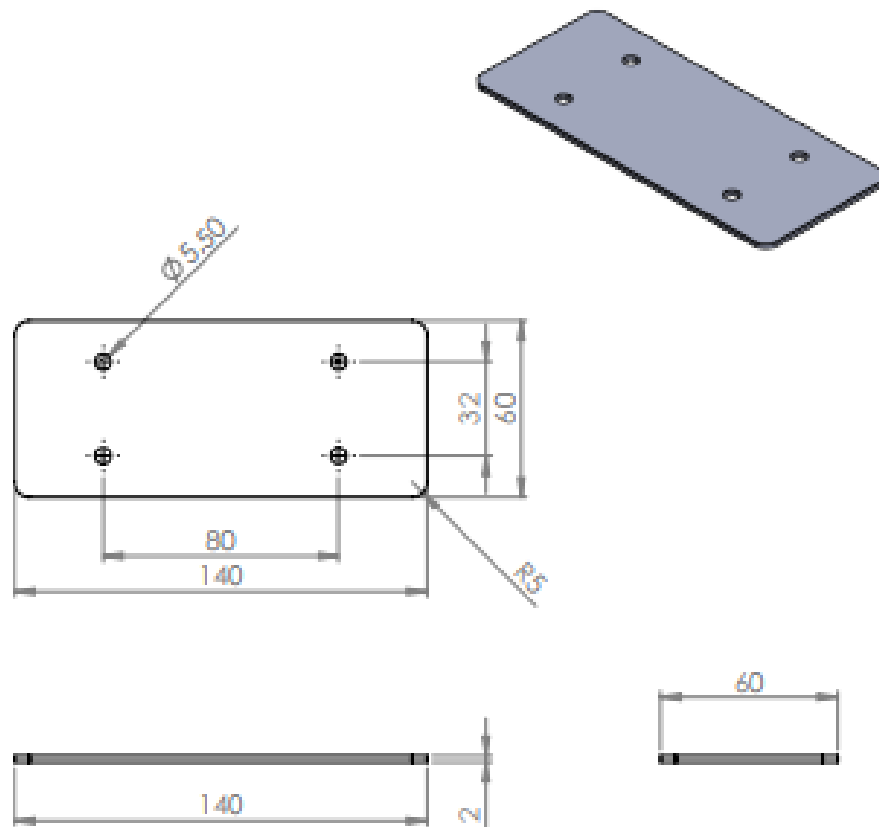
- Gran rango de medición
- Luz roja
- Salida analógica (0...10 V DC)
- Salida de error




Datos técnicos

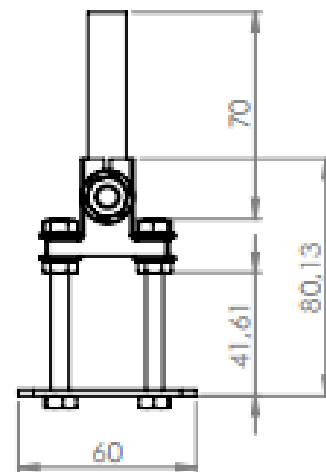
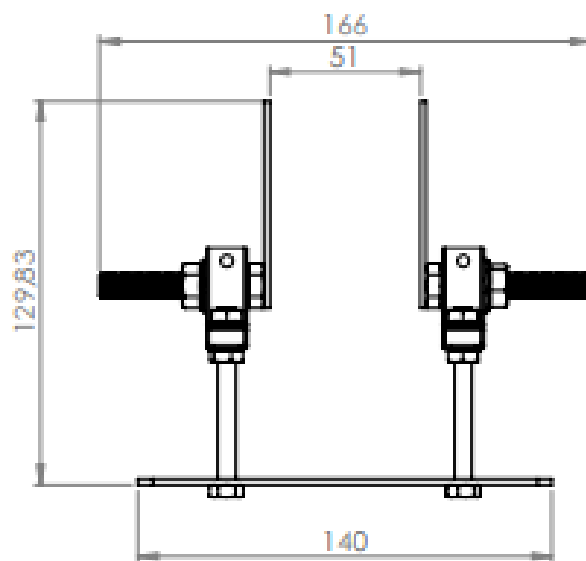
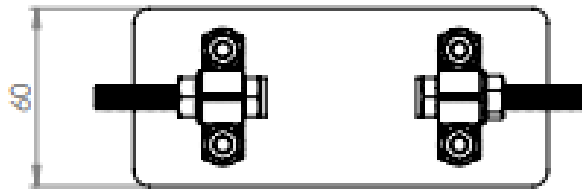
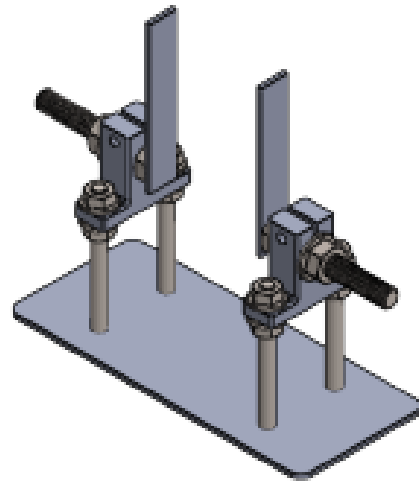
Datos ópticos	
Rango de trabajo	55...155 mm
Distancia de medición	105 mm
Rango de medición	100 mm
Resolución	500 μ m
Linealidad	1 %
Tipo de luz	Luz roja
Longitud de onda	660 nm
Vida útil (Tu = +25 °C)	100000 h
Lux externa máx. admisible	10000 Lux
Diámetro del punto luminoso	3 mm
Datos eléctricos	
Tensión de alimentación	18...30 V DC
Consumo de corriente (Ub = 24 V)	< 40 mA
Frecuencia límite	100 Hz
Tiempo de reacción	5 ms
Temperatura de desvío	50 μ m/K
Rango de temperatura	-10...60 °C
Corriente de conmutación / PNP salida de error	200 mA
Salida analógica	0...10 V
Corriente de salida analógica	500 μ A
Protección cortocircuitos	sí
Protección cambio polaridad	sí
Categoría de protección	III
Datos mecánicos	
Carcasa	Plástico
Totalmente encapsulada	sí
Clase de protección	IP67
Conexión	Cable 6 hilos, 6 m
Salida de error	●
Salida analógica	●
Nº Esquema de conexión	603
Nº Panel de control	N2
Nº Montaje adecuado	350



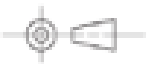


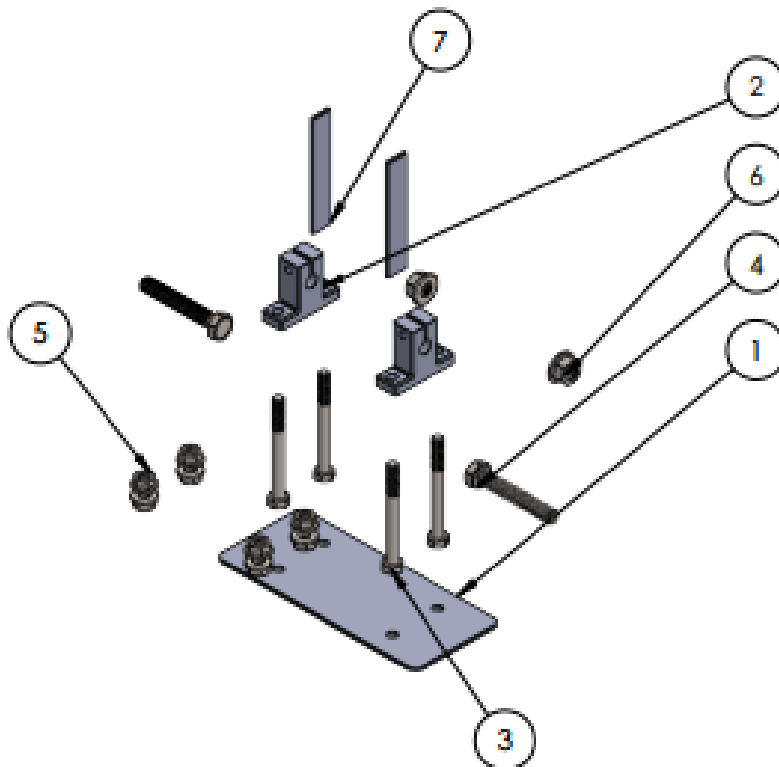
		PROYECTO DE GRADO- INGENIERIA MECANICA	CARACTERIZACION DINAMICA DE MATERIALES VISCOELASTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACION PASIVA		
PIEZA: SOPORTE SK8		DIM: MM	ESC: 1: 1		
DIBUJÓ: CARLOS ANDRES RINCON DIEGO FERNANDO CALDERON		30/06/2020	HOJA 1		



		PROYECTO DE GRADO- INGENIERIA MECANICA	CARACTERIZACION DINAMICA DE MATERIALES VISCOELASTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACION PASIVA		
PIEZA: LAMINA INFERIOR		DIM: MM	ESC: 1:2		
DIBUJÓ: CARLOS ANDRES RINCON DIEGO FERNANDO CALDERON		30/06/2020		HOJA 2	



		PROYECTO DE GRADO- INGENIERIA MECANICA	CARACTERIZACION DINAMICA DE MATERIALES VISCOELASTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACION PASIVA		
PIEZA: ENSAMBLAJE		DIM: MM	ESC: 1: 1		
DIBUJÓ: CARLOS ANDRES RINCON DIEGO FERNANDO CALDERON		30/06/2020		HOJA 1	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	LAMINA INFERIOR	1
2	SOPORTE SK8	2
3	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x 1.0 x 60 -18CS	4
4	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M8 x 1.25 x 50 -50WS	2
5	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M6 x 1 -5	8
6	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M8 x 1.25 -5	2
7	LAMINA SOPORTE	2

 	PROYECTO DE GRADO- INGENIERIA MECANICA		CARACTERIZACION DINAMICA DE MATERIALES VISCOELASTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACION PASIVA		
DIBUJÓ: CARLOS ANDRES RINCON DIEGO FERNANDO CALDERON		30/06/2020	HOJA 1		