



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pachuca

# INFLUENCIA DEL EFECTO DE MULLINS EN LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA EN ELASTÓMEROS MAGNETORREOLÓGICOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA

DIEGO ALEJANDRO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. LUÍS MANUEL PALACIOS PINEDA

SINODALES:

DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA

DR. IGNACIO RAMÍREZ VARGAS

Pachuca de Soto, Hgo. Octubre 2022

55 páginas



Instituto Tecnológico de Pachuca  
ISO 9001:2015



**2022 Flores**  
Año de Magón  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Pachuca, Hidalgo, **9/Septiembre/2022**  
OFICIO No. DEPI-0126-22

**C. ING. DIEGO ALEJANDRO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ  
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

**Influencia del efecto de Mullins en la disipación de  
energía mecánica en elastómeros  
magnetorreológicos**

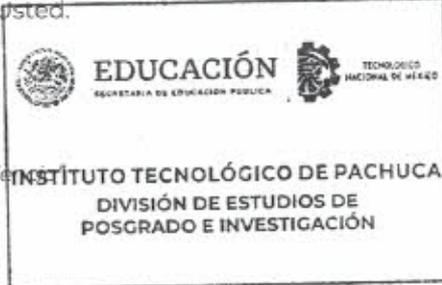
se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*

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



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**M.A.C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo  
ECGO/LMPP



Instituto Tecnológico de Pachuca  
ISO 9001:2015  
Registro: RSCC-1003  
Vigencia: 2022.07.29  
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción  
hasta la entrega del título profesional.

Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.  
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399  
e-mail: [depi@pachuca.tecnm.mx](mailto:depi@pachuca.tecnm.mx) | [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [pachuca.tecnm.mx](http://pachuca.tecnm.mx)





## Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA

Siendo las 13:00 horas del 19 de febrero de 2022, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Influencia del efecto de Mullins en la disipación de energía mecánica en elastómeros magnetorreológicos*, con el siguiente contenido:

- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1- Introducción
- 2- Estado del arte
- 3- Marco teórico
- 4- Materiales y métodos
- 5- Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Diego Alejandro Hernández Hernández obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Luis Manuel Palacios Pineda.

### ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®*

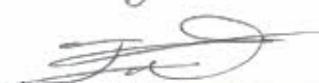
*"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia" ®*

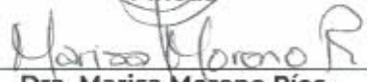
  
Dr. Ignacio Ramírez Vargas

  
Dr. Juan Serrano Arellano

  
Dr. Luis Manuel Palacios  
Pineda

  
Dra. Erika Osiris Ávila Dávila

  
Dr. Edgar Ernesto Vera  
Cárdenas

  
Dra. Marisa Moreno Ríos

  
Dr. Armando Irvin Martínez  
Pérez

  
Dr. Francisco Noe Demesa

  
Dr. Hugo Francisco Abundis  
Fong



Instituto Tecnológico de Pachuca  
ISO 9001:2015  
Registro: RSCC 1002  
Vigencia: 2022-07-31  
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: [depl@pachuca.tecnm.mx](mailto:depl@pachuca.tecnm.mx) | [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [pachuca.tecnm.mx](http://pachuca.tecnm.mx)



Ricardo  
Flores  
Año de Magón

PREVALECE EN LA REPOSICIÓN DEL TÍTULO

## Contenido

Lista de Tablas.....	V
Lista de figuras .....	VI
Lista de abreviaturas.....	VII
Resumen .....	VIII
1. Introducción.....	1
2. Estado del arte .....	2
3. Marco Teórico .....	8
3.1 Elastómeros magnetorreológicos.....	8
3.2 Conceptos generales de fatiga .....	9
3.2.1 Ensayos de fatiga.....	9
3.2.2 Falla por fatiga térmica en materiales poliméricos.....	11
3.2.3 Fatiga por fatiga mecánica en materiales poliméricos.....	11
3.3 Modelos de comportamiento .....	12
3.3.1 Viscoelasticidad.....	12
3.3.2 Hiperelasticidad .....	13
3.3.3 Cristalización.....	14
3.3.4 Ductilidad y fragilidad.....	14
3.4 Magnetismo .....	15
3.4.1 Dipolos magnéticos .....	15
3.4.2 Inducción magnética.....	15
3.4.3 Magnetización de un material.....	15
3.5 Modelo de densidad de energía de deformación equivalente.....	19
3.6 Modelo pseudoelástico para suavizar el estrés y efectos de ablandamiento permanente.....	21
3.7 Efecto de Mullins .....	15
3.7.1 Los efectos de deformación residual que describen Mullins.....	16
4. Materiales y métodos.....	18
4.1 Fabricación de probetas magnetorreológicas .....	18
4.2 Datos experimentales.....	22
4.3 Especificaciones de las probetas.....	23
4.4 Pruebas de tracción uniaxial.....	24
4.5 Modelo para predecir la deformación de Mullins.....	25

5.	Resultados.....	27
5.1	Curvas de energía de deformación para las muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24 .....	28
5.2	Porcentaje del volumen de las partículas respecto del volumen de la matriz.....	21
5.3	Ecuación de pendiente de la rigidez de daos experimentales. ....	27
5.4	Curvas de energía de deformación Probeta 45_0100_ANI.....	31
5.5	Curvas de energía de deformación Probeta 45_0100_ISO.....	32
5.6	Curvas de energía de deformación Probeta 45_2575_ANI.....	33
5.7	Curvas de energía de deformación Probeta 45_2575_ISO.....	34
5.8	Curvas de energía de deformación Probeta 45_5050_ANI.....	35
5.9	Curvas de energía de deformación Probeta 45_5050_ISO.....	36
5.10	Capacidad de disipación de energía.....	38
6.	Conclusiones.....	42
7.	Referencias .....	43
8.	ANEXOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
	Graficas 45_5050_ISO .....	47
	Graficas 45_5050_ANI .....	49
	Graficas 45_2575_ISO .....	51
	Graficas 45_2575_ANI .....	53
	Graficas 45_0100_ISO .....	55
	Graficas 45_0100_ANI .....	57
	Curvas de energía de deformación para las muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24 sin ajuste de pendiente.....	59

## **Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Nomenclatura de muestras de elastómero magnetorreológico (MRE).....	23
<b>Tabla 2.</b> valor de campo magnético para cada corrida. ....	26
<b>Tabla 3.</b> Constantes de material utilizadas y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24.....	29
<b>Tabla 4.</b> Nomenclatura de probetas respecto al contenido de micro y nanopartículas al 45% en peso de CIP.....	23
<b>Tabla 5.</b> Valores de pendiente obtenidos de los datos experimentales de los materiales isotrópicos y anisotrópicos.....	28
<b>Tabla 6.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_0100 Anisotrópica. ....	37
<b>Tabla 7.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_0100 Isotrópica. ....	37
<b>Tabla 8.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_2575 Anisotrópica. ....	37
<b>Tabla 9.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_2575 Isotrópica. ....	38
<b>Tabla 10.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_5050 Anisotrópica. ....	38
<b>Tabla 11.</b> Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45_5050 Isotrópica. ....	38
<b>Tabla 12.</b> Energía disipada por el área entre curvas de carga y descarga máxima.....	40

## Lista de figuras

Fig. 1 Curva con máxima energía disipada para G130I a 0.1 Hz y deformación de 1 %.	3
Fig. 2 Curva de Esfuerzo - Deformación para la muestra E-10%, E-20%, E-30%, E-40%	4
Fig. 3 Curvas tensión-deformación nominal para diferentes contenidos de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .	5
Fig. 4 Influencia de las nanopartículas en las propiedades de MRE en comparación con elastómeros reforzados con micropartículas.	6
Fig. 5 Curvas de tensión-estiramiento para muestras de material magnetorreológico anisotrópico con B = 0 mT.	7
Figura 6. a) Curvas de prueba de tracción para con 20, 27, 45, 63 y 70% en peso de CIP	7
Fig. 7 Estructura microscópica de un MRE: (a) MRE isotrópico y (b) MRE anisotrópico.	8
Fig. 8 Curva de fatiga S-N.	10
Fig. 9 Relación esfuerzo-tiempo.	10
Fig. 10 Falla por fatiga mecánica	11
Fig. 11 Falla por fatiga térmica.	11
Fig. 12 Comportamiento típico de un material hiperelástico.	13
Fig. 13 Diagrama de esfuerzo a) Para material frágil, b) Para material Dúctil	14
Fig. 14 Ensayo de tensión cicloidal que exhibe el efecto de Mullins.	16
Fig. 15 Método de fabricación para una muestra magnetorreológico.	18
Fig. 16 (a) Representación esquemática del solenoide, las abrazaderas de extensión y la muestra. (b) Máquina de tracción acoplada a una bobina de solenoide para realizar la prueba de tracción uniaxial cíclica bajo un campo magnético.	24
Fig. 17 Esquema del montaje de la prueba de tracción y su campo magnético aplicado a las muestras de elastómero magnetorreológico.	25
Fig. 18 Muestra MS04 con Micropartículas.	28
Fig. 19 Muestra NS04 con Nanopartículas.	28
Fig. 20 Muestra MS24 con Micropartículas	28
Fig. 21 Muestra NS24 con Nanopartículas.	28
Fig. 22 Muestra MH04 con Micropartículas	29
Fig. 23 Muestra NH04 con Nanopartículas	29
Fig. 24 Muestra MH24 con Micropartículas	29
Fig. 25 Muestra NH24 con Micropartículas	29
Fig. 26. Curvas de energía de deformación de probeta 45_0100 Anisotrópica.	31
Fig. 27. Curvas de energía de deformación de probeta 45_0100 Isotrópica	32
Fig. 28. Curvas de energía de deformación de probeta 45_2575 Anisotrópica.	33
Fig. 29. Curvas de energía de deformación de probeta 45_2575 Isotrópica	34
Fig. 30. Curvas de energía de deformación de probeta 45_5050 Anisotrópica.	35
Fig. 31. Curvas de energía de deformación de probeta 45_5050 Isotrópica.	36

## **Lista de abreviaturas**

<i>PDMS</i>	<i>Polidimetilsiloxano</i>
<i>CIP</i>	<i>Partículas de Carbonil de Hierro</i>
<i>MRE</i>	<i>Elastómeros Magnetorreológicos</i>
<i>CTPE</i>	<i>Elastómeros Termoplásticos Compuestos</i>
<i>SO</i>	<i>Aceite de Silicona</i>
<i>T<sub>g</sub></i>	<i>Temperatura de transición vítrea</i>
<i>W<sub>T</sub></i>	<i>Energía de Deformación Total</i>
<i>SR</i>	<i>Caucho de Silicona</i>
<i>ISO</i>	<i>Isotrópicas</i>
<i>ANI</i>	<i>Anisotrópicas</i>

## **Resumen**

Los elastómeros magnetorreológicos (EMR), en la actualidad, tienen gran importancia en la industria debido a su capacidad de modificar su rigidez y amortiguamiento en presencia de un campo magnético. Además, su capacidad de deformación y disipación de energía hace que estos materiales sean ampliamente utilizados como sensores o actuadores.

El objetivo de este trabajo es el de modelar el efecto de Mullins en los EMR y sus efectos residuales a partir de datos experimentales obtenidos de muestras de elastómeros magnetorreológicos isotrópicos y anisotrópicos con dos matrices de diferente dureza Shore de polidimetilsiloxano (PDMS) con diferentes contenidos de aceite de silicona como catalizador, los elastómeros se desarrollaron con una serie de técnicas de caracterización que permiten estudiar sus características magneto-mecánicas. A partir de los resultados del presente trabajo, se ha observado un mejor desempeño del material hecho con una matriz polimérica de mayor dureza, donde se presenta una mejor adhesión de nanopartículas de refuerzo.

## **Abstract**

Magneto-rheological elastomers currently play a leading role in the industry, their importance for study lies in their ability to modify their rigidity and damping in the presence of a magnetic field, their mechanical properties such as their ability to deform and dissipate energy. makes these materials widely used.

The objective of this article is to model and predict the Mullins effect and the residual effects by analyzing experimental data obtained from samples of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers with two matrices of different Shore hardness of polydimethylsiloxane (PDMS) with different contents of silicone oil. As a catalyst, elastomers were developed with a series of characterization techniques that made it possible to study the general magneto-mechanical characteristics. A better adaptation was observed to samples with a hard polymeric matrix and where we have adhesion of nanoparticles.

# 1. Introducción

Los elastómeros son una clase de polímeros que involucran cauchos naturales y sintéticos que son amorfos y se componen de largas cadenas naturales que están orientadas al azar las cuales al aplicarles una carga tensora se enderezan y desenroscan parcialmente y vuelven a su estado original al retirarles la carga.

Los elastómeros magnetorreológicos están compuestos por una matriz elastomérica y partículas de hierro de distintos tamaños, cuyas propiedades de reología y viscoelástica se pueden exhibir una rigidez variable y propiedades de amortiguación si se somete a la acción de un campo magnético externo.

Los elastómeros pueden sufrir grandes deformaciones elásticas y sufren un poco cambio de volumen bajo una carga ya que la deformación está relacionada con el enderezamiento de las cadenas y resultan ser casi incompresibles. Por lo tanto, los Elastómeros Magnetorreológicos MRE tienen una amplia variedad de aplicaciones en mecánica. dispositivos como amortiguadores de vibraciones sintonizables, actuadores magnetoactivos, válvulas para control del flujo de aire, aisladores en el control de vibraciones y sensores, por mencionar algunos.

Los MRE estudiados en este trabajo están compuestos de aceite de silicona, reforzado con micropartículas de carbonil hierro que podrían estar alineados o no, es decir, las muestras de MRE isotrópicas no tienen alineación de micropartículas magnéticas, mientras que los MRE anisotrópicos podrían tener micropartículas magnéticas alineadas paralelas a las líneas del campo magnético que pueden mejorar sus propiedades físicas.

El objetivo de este trabajo se centra en investigar el efecto Mullins, las tensiones residuales y la energía de disipación en ciclos de carga-descarga uniaxiales considerando la concentración de partículas de carbonil hierro (CIP) añadidas a una matriz de elastómero, su influencia en la orientación y el impacto de aplicar un flujo magnético en la dirección de carga.

## **2. Estado del arte**

La evolución tecnológica ha implicado el estudio de nuevo materiales, específicamente en aquellos que tengan la posibilidad de modificar sus propiedades en tiempo real en respuesta a ciertos estímulos externos. Los elastómeros magnetorreológicos forman parte de los materiales inteligentes y son capaces de variar su rigidez y amortiguamiento en presencia de un campo magnético. A continuación, se mencionan estudios previos relacionados con el tema de investigación.

Los elastómeros magnetorreológicos o MRE por su sigla en inglés (Magneto-Rheological Elastomers), están compuestos por una matriz elastomérica y partículas de hierro de distintos tamaños, cuyas propiedades de reología y viscoelástica se pueden modificar aplicando un campo magnético externo. Por lo tanto, tienen una amplia variedad de aplicaciones en mecánica. dispositivos como amortiguadores de vibraciones sintonizables, actuadores magnetoactivos, válvulas para control del flujo de aire, aisladores en el control de vibraciones del asiento del vehículo, y sensores, por mencionar algunos. [1] [2]

Roberto H. Castro [3] estudio el comportamiento de 12 probetas de MRE construidas a base de tres matrices elastoméricas y dos tipos de partículas de hierro en dos concentraciones distintas. Cada probeta se estudió con distintas excitaciones sinusoidales (Jesús G. Puente Córdoba, 2018) en presencia de distintos campos magnéticos de intensidades en el rango de 0 a 130 kA/m. Sus resultados obtenidos presentan un desplazamiento de la relación constitutiva fuerza-deformación dejando de ser una curva única dependiente de las propiedades del material y de la excitación, sino que se transforma en una curva que se puede controlar mediante la variación de la intensidad del campo magnético de acuerdo a las necesidades del sistema.

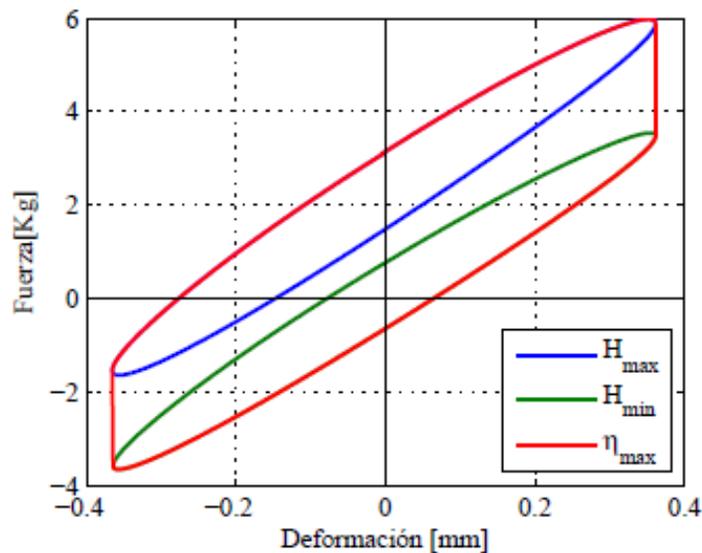


Fig. 1 Curva con máxima energía disipada para G130I a 0.1 Hz y deformación de 1 %.

Olga P. Anna B. Vyacheslav M. Alexei K. [4] analizaron perlas de polímero magnético que están elaboradas a base de un matriz de polímero con micropartículas magnéticas lo que permite una separación rápida y ofrecen la posibilidad de acumularse en un sitio determinado al aplicar un estímulo externo de un campo magnético, lo que permitiría su aplicación en distintos propósitos, como bloqueo de flujos, y la entrega dirigida de productos químicos encapsulados en perlas, además de ser utilizadas como generadores de calor debido a procesos de relajación y pérdidas por histéresis transformando la energía magnética en energía calorífica.

Anel P. Martínez, Luis M. Palacios, L. Marcelo Lozano, Oscar Martínez R, Jesús G. Puente, Alex E. Zúñiga [5] desarrollaron un elastómero magnetorreológico a base de caucho de silicona con micropartículas de carbonil hierro. Se utilizaron diferentes contenidos de partículas de carbonil hierro para obtener la relación de partículas magnéticas / caucho de silicona que podría proporcionar las mejores propiedades mecánicas en el material MRE. Determinaron que cuando se agrega un 20% de partículas de carbonil de hierro a la matriz de caucho crudo se obtiene hasta un 111% de estiramiento adicional y un 95% de incremento de la resistencia a la tracción en comparación con la del material. Mediante una prueba de reología, detectaron que cuando las partículas de carbonil hierro son agregado a la matriz de caucho de silicona, el punto de cruce se desplaza de un valor de deformación del 39,8% a un valor de deformación del 25% que induce comportamiento de material similar a un fluido aumentando su capacidad para tener mayores valores de alargamiento concluyendo que los hallazgos reportados muestran una mejora en las

propiedades mecánicas por otros autores debido a la reordenación de las cadenas activas determinadas por su modelado mecánico.

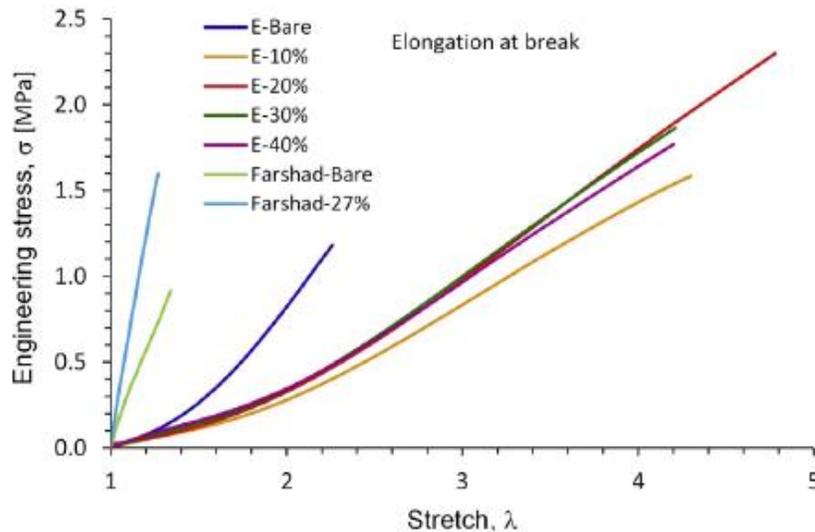


Fig. 2 Curva de Esfuerzo - Deformación para la muestra E-Bare, E-10%, E-20%, E-30%, E-40%.

Feng Jiang, Yaqiong Zhang, Zhongkai Wang, Wentao Wang en su trabajo [6] estudiaron elastómeros termoplásticos compuestos (CTPE) de nanopartículas injertadas con copolímero magnético (magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) para generar CTPE magnéticos, que combinaban la propiedad magnética de las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y la elasticidad termoplástica de la matriz de polímero amorfo injertado. Las partículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dispersas homogéneamente actúan como múltiples puntos físicos de reticulación en los CTPE para mejorar las propiedades mecánicas como una mayor tensión de tracción y recuperación elástica. De igual forma, llevaron a cabo una deformación a temperatura ambiente para revelar la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas, observaron que las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  se ven obligadas a alinearse a lo largo de la dirección de tracción cuando la muestra se alarga y el grado de orientación incrementa a medida que avanza la deformación, lo que influye en el comportamiento de la tensión de las muestras. El endurecimiento por deformación puede ser ajustado dependiendo del contenido de nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , concluyendo que estos CTPE son materiales poliméricos elastoméricos con propiedades mecánicas muy mejoradas para una potencial aplicación en músculos robóticos y actuadores magnéticos.

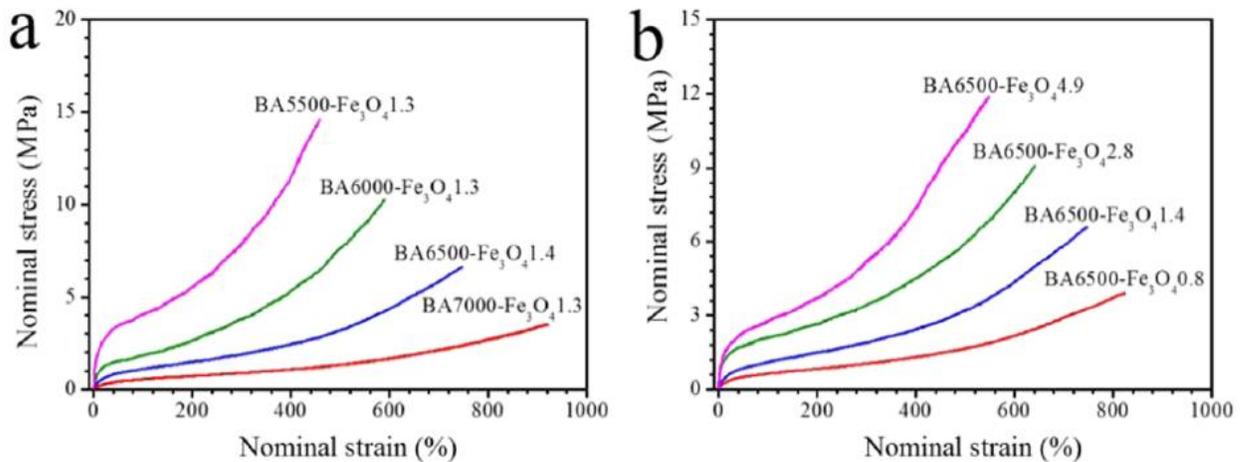


Fig. 3 Curvas tensión-deformación nominal para diferentes contenidos de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Luis M. Palacios, Imperio A. Perales, Luis M. Lozano, Oscar Martínez, Jesús P. Córdova, Emmanuel Segura [7] centraron su investigación en estudiar como la adición con diferentes contenidos de partículas de carbonil de hierro (CIP) pueden influir en las propiedades físicas, químicas y mecánicas basado en una matriz de polidimetilsiloxano (PDMS). Se encontró que el mejor rendimiento mecánico se obtiene con un contenido de partículas magnéticas agregadas a la matriz polimérica de un 20% en peso de partículas de carbonil hierro. Determinaron que, en general, la adición de nanopartículas de hierro mejora las propiedades mecánicas y magnéticas de MRE. De hecho, la adición de nanopartículas de hierro como relleno en la matriz junto con un 24% de Aceite de silicona (SO) ha demostrado ser el material compuesto que exhibe las mejores propiedades y con base en los resultados de su prueba de hinchamiento se concluyó que el aumento de la densidad de reticulación conduce a una mayor resistencia a la tracción debido a los enlaces covalentes que mantienen unidas las cadenas poliméricas y, por lo tanto, se necesita más energía para romperlas, lo cual fue evidenciado por las pruebas de tracción.

Además, encontraron a partir de pruebas experimentales de reología que, si se añaden nanopartículas de hierro a la matriz de silicona, se obtiene un incremento de hasta 4% y 63% en el módulo de almacenamiento y en el factor de amortiguación con respecto a las muestras sin partículas de hierro lo que permitiría la fabricación de componentes más ligeros y pequeños con un rendimiento magnetorreológico mejorado.

Sample ratio properties	Strength (%)	Elongation at break (%)	Stiffness (%)	Magnetic field sensitivity (%)	Thermal stability (T <sub>10%</sub> ) (%)
NS04/MS04	-11	-11	0	9	-1.2
NS24/MS24	24	29	6	80	-0.8
NH04/MH04	15	6	16	-47	1.4
NH24/MH24	84	45	11	49	0.9

Fig. 4 Influencia de las nanopartículas en las propiedades de MRE en comparación con elastómeros reforzados con micropartículas.

Alex Elías-Zúñiga, Luis M. Palacios, Imperio A. Perales, Oscar Martínez, Daniel Olvera e Isaac H. Jiménez [8] en su artículo, investigaron el efecto Mullins, las tensiones residuales y la disipación de energía en ciclos uniaxiales de carga-descarga y el desempeño mecánico de elastómeros magnetorreológicos de poliuretano reforzados con diferentes concentraciones de micropartículas de carbonilo hierro (CIP) considerando el ablandamiento del estrés, la disipación de energía, las tensiones residuales, la orientación de las micropartículas y los efectos de la densidad del flujo magnético. Descubrieron que para muestras anisotrópicas reforzadas con concentraciones de CIP superiores al 20% en peso cuando se someten a cargas cíclicas de extensión, exhiben un módulo de corte más alto que los isotrópicos. La energía disipada durante los ciclos de carga y descarga aumenta debido al % en peso de CIP añadidos a la matriz de elastómero cuando las muestras están bajo la acción de una densidad de flujo magnético, confirmada por el valor máximo alcanzado por las curvas del factor de disipación. Este comportamiento del material es una indicación de que los efectos de Mullins y la deformación residual se vuelven sensibles al % en peso de CIPs añadidos a la matriz de elastómero y a la aplicación de una densidad de flujo magnético. Por tanto, se concluye que en aquellas muestras de material elaboradas a partir de CIP con una orientación predefinida cuando se somete a cargas cíclicas y a la acción de una densidad de flujo magnético, aumenta su módulo de corte y su capacidad de disipar energía.

Cintya G. Soria, Luis M. Palacios, Alex E. Zúñiga, Imperio A. Perales y Oscar Martínez [9] evaluaron la influencia que tiene la alineación de las micropartículas de carbonil de hierro (CIP) en las propiedades mecánicas y reológicas para elastómeros magnetorreológicos (MRE) fabricados con polidimetilsiloxano (PDMS) y 24% en peso de aceite de silicona (SO). Los resultados experimentales y las predicciones teóricas confirmaron que para una concentración del 70% en peso CIP, las muestras del material exhiben el módulo de corte más alto, efectos de ablandamiento

en la tensión cuando las muestras están sujetas a un valor de estiramiento máximo de 1,64 y una densidad de flujo magnético uniforme de 52,2 mT.

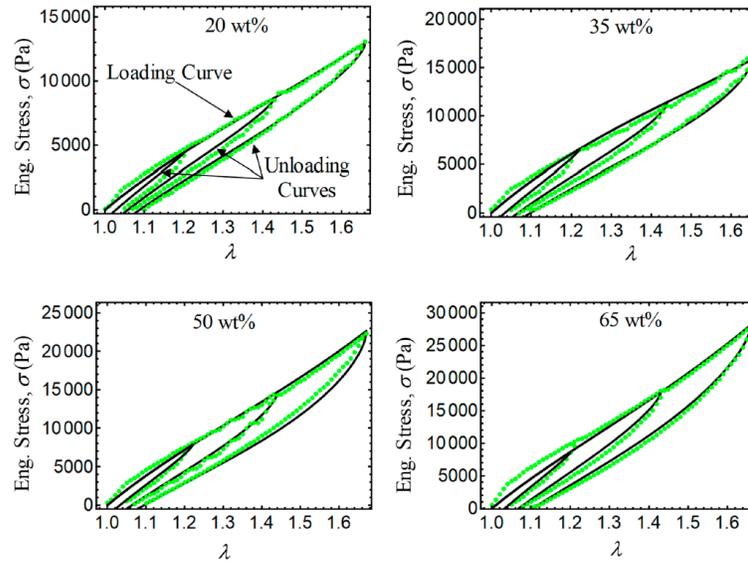


Fig. 5 Curvas de tensión-estiramiento para muestras de material magnetorreológico anisotrópico con  $B = 0$  mT.

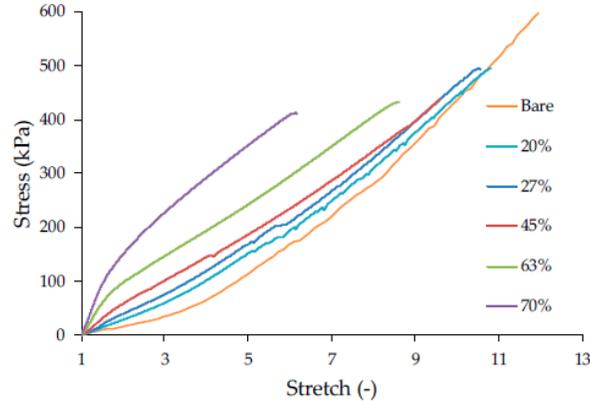


Figura 6. a) Curvas de prueba de tracción para con 20, 27, 45, 63 y 70% en peso de CIP, como el porcentaje de micropartículas magnéticas en el interior el material aumenta, la rigidez del material aumenta. [9]

## 3. Marco Teórico

### 3.1 Elastómeros magnetorreológicos

Los elastómeros magnetorreológicos o MRE, son miembros de la familia de los llamados materiales inteligentes, que son capaces de modificar sus propiedades en tiempo real como respuesta a ciertos estímulos externos. [10]

Los MRE son materiales que muestran un comportamiento sólido, formados por una matriz elastomérica con la suspensión de micro y nano partículas ferromagnéticas, sus características mecánicas en términos de rigidez y amortiguación no dependen sólo de las cargas mecánicas externas sino también del campo magnético aplicado. En general, las variaciones de estas propiedades, los hace materiales propicios para utilizarlos en el campo de la reducción de vibraciones, empaquetaduras, músculos artificiales y actuadores. [3]

Una de las más importantes características de los MRE [11], es la posibilidad de obtener materiales isotropos como configuraciones anisotrópicas durante la fabricación de las muestras. Las partículas ferromagnético dentro de la matriz elastomérica pueden estar distribuidos homogéneamente formando MRE isotrópicos durante el curado de la matriz, como se muestra en la Figura 7 (a), o se puede forzar debido a la aplicación de un campo magnético externo a formar estructuras de columnas en forma de cadena formando MRE anisotrópicos como se muestra en la Figura 7 (b)

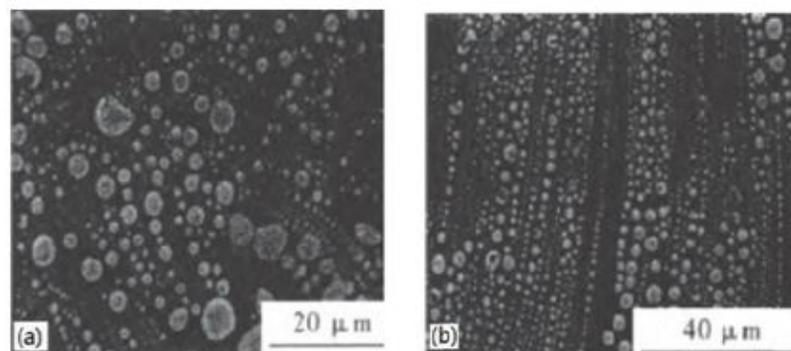


Fig. 7 Estructura microscópica de un MRE: (a) MRE isotrópico y (b) MRE anisotrópico. [11]

El campo magnético externo aplicado al MRE induce momentos dipolares en las partículas ferromagnéticas antes de la polimerización completa del elastómero, por lo que las estructuras columnares de las partículas permanezcan bloqueadas en su lugar hasta el final de la cura, y luego esta estructura se fija en la matriz. [12]

En los MRE isotrópicos las propiedades mecánicas serán independientes de la dirección en la que se miden, y en los MRE anisotrópicos el material presentara una diferencia en el valor de sus propiedades en función de la dirección en la que se miden.

### **3.2 Conceptos generales de fatiga**

La fatiga es un fenómeno que se produce bajo cargas dinámicas cíclicas, produciendo el colapso del material por debajo de su límite de carga estático. Durante dicho proceso se genera una grieta que, si se dan las condiciones adecuadas crecerá hasta producir la rotura por fatiga mecánica de la pieza al aplicar un número de ciclos suficientes. [13]

#### **3.2.1 Ensayos de fatiga**

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas dinámicas, se someten unas probetas de material a cargas cíclicas constantes o variables, de magnitudes especificadas y se contabilizan los ciclos o alternaciones de esfuerzos que soporta el material hasta la falla o rotura, por ello, el ensayo de fatiga está clasificado cómo un ensayo dinámico destructivo. [14] En el ensayo de fatiga existen los siguientes conceptos importantes:

- Las fuerzas necesarias para conseguir la ruptura por cargas dinámicas, son inferiores a las necesarias para una ruptura por cargas estáticas.
- El límite de fatiga es el umbral de carga por debajo del cual, las probetas no se rompen.

El método más utilizado para representar los datos de fatiga es la curva S-N (Stress-Number of cycles), figura 8, donde se representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la rotura (N), para la máxima tensión aplicada (S), y el límite de resistencia (S'e)

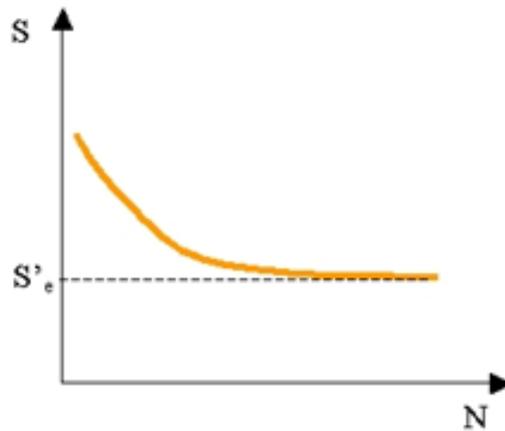


Fig. 8 Curva de fatiga S-N [14]

Durante el ensayo se somete a la pieza a esfuerzos alternos hasta el fallo de la misma, definiéndose esfuerzo alterno  $\sigma_a$  como la mitad de la diferencia entre el esfuerzo máximo  $\sigma_{max}$  y el esfuerzo mínimo  $\sigma_{min}$  aplicadas durante un ciclo.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

Se considera que los esfuerzos de compresión son negativos y los esfuerzos de tensión positivos por convención. En la Figura 9 se muestran la relación esfuerzo-tiempo en a) esfuerzo fluctuante sinusoidal, en b) esfuerzo repetido y en c) esfuerzo sinusoidal completamente invertido. [14]

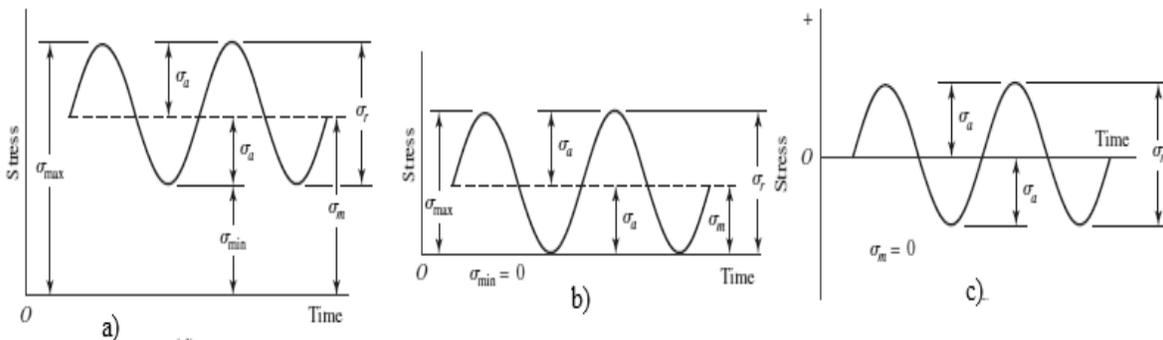


Fig. 9 Relación esfuerzo-tiempo [14]

Según sea el tipo de esfuerzo al que están sometidas las probetas en el ensayo, éste puede ser:

- De tracción-compresión, esfuerzos axiales alternos.
- De flexión plana, en probetas de sección rectangular, empotradas y sometidas a un momento flector alterno.
- De torsión, en probetas de sección circular, empotradas en un extremo y a las que se le aplica un momento de torsión alternado en sentido.

- De flexión rotativa, se realiza sobre una probeta cilíndrica a la que se hace girar a la y se le aplica un momento flector constante en un extremo, provocando la alternancia del esfuerzo cada media vuelta de la probeta.

### **3.2.2 Falla por fatiga térmica en materiales poliméricos**

Cuando un material polimérico es sometido a una variación de esfuerzos superior al nivel de tensiones crítico, se producen movimientos de los segmentos de sus cadenas moleculares, estos movimientos se identifican como transición vítrea o relajación viscoelástica y se producen a una temperatura. La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es un punto intermedio de temperatura entre el estado rígido y el estado de fundición del material y está determinado por métodos experimentales. Una parte de la energía proveniente de esos movimientos es empleada en la propia deformación del material, pero los movimientos moleculares provocan un calentamiento por fricción en la zona. La baja conductividad térmica de los materiales poliméricos, provoca que parte de ese calor no se disipe, provocando un aumento de su temperatura. Cuando la velocidad de transferencia de calor a los alrededores, por cualquiera de los mecanismos de transmisión, ya sea por conducción, convección o radiación, es inferior a la velocidad con que se genera el calor, la temperatura del material aumenta, lo que conlleva que sus propiedades mecánicas disminuyan hasta que sus valores críticos alcancen el nivel de la carga aplicada, produciéndose la rotura.

### **3.2.3 Fatiga mecánica en materiales poliméricos**

Estos fallos también se pueden producir en los materiales poliméricos, como consecuencia de fatiga mecánica habitual a consecuencia del debilitamiento progresivo hasta finalizar en su rotura debido a la propagación de las grietas y evitar provocar la falla por fatiga térmica.

En la Figura 10 se muestra una falla mecánica por fatiga en donde la deformación plástica es menor que en la Figura 11 en donde se muestra una falla por fatiga térmica [13].

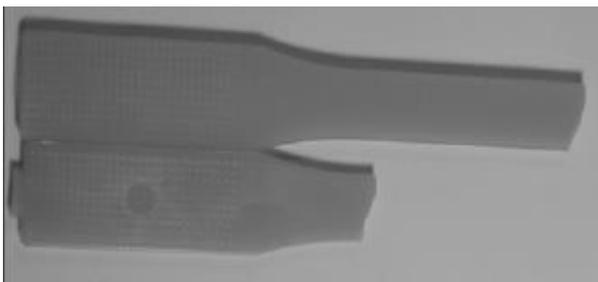


Fig. 10 Falla por fatiga mecánica.

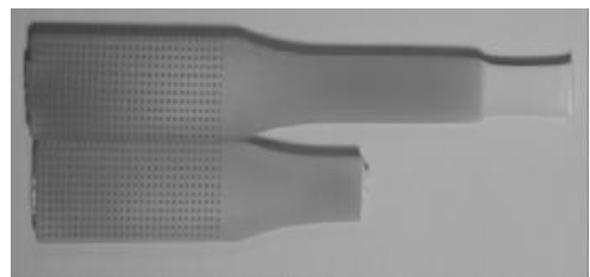


Fig. 11 Falla por fatiga térmica.

### 3.3 Modelos de comportamiento

Uno de los aspectos más importante es cuando se analiza el comportamiento elástico de un material de manera independiente al tiempo, es observar el efecto de la reversibilidad instantánea presente dentro del límite elástico y de la existencia de un comportamiento plástico cuya reversibilidad es notoria.

Debido a que el comportamiento en los polímeros siempre depende del tiempo, sus propiedades mecánicas siempre deben ser calculadas en función de ello.

#### 3.3.1 Viscoelasticidad

Cuando un polímero está sometido a la acción de una carga, la deformación no será constante, pero se incrementará en función del tiempo. El efecto ocurre gracias a que los enlaces característicos del polímero soportan el esfuerzo, aunado a ello, las moléculas recobran lentamente su espacio original y la deformación tenderá a cero, a este efecto se le conoce como fluencia y es una manifestación de una propiedad general de los polímeros sólidos conocida como Viscoelasticidad, es decir, el sólido es elástico en la medida en que se recupera a su estado original, pero viscoso cuando se comporta bajo fluencia. [15]

Los elastómeros no son sólidos perfectos por lo que son viscoelásticos en casi todas las temperaturas, por ello, cuando se consideran deformaciones inducidas siempre será necesario tomar en cuenta no únicamente los esfuerzo, sino también el tiempo de aplicación.

Por lo anterior, podemos entender que las propiedades viscoelásticas en los polímeros son totalmente dependientes de la temperatura y del tiempo.

**Ley de elasticidad de Hooke:** establece que el alargamiento unitario que experimenta un cuerpo elástico es directamente proporcional a la fuerza  $F$  aplicada sobre el mismo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} \quad (2)$$

Siendo  $\Delta L$  el alargamiento,  $L$  la longitud original,  $E$ : Modulo de Young,  $A$  la sección transversal de la pieza estirada.

**Ley de viscosidad de Newton:** establece que la Fuerza por unidad de Área es proporcional a la disminución de la velocidad  $V$  con la distancia  $Y$ .

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (3)$$

Donde:  $\mu$  es la constante de proporcionalidad de la viscosidad del fluido,  $\tau_{xy}$  es la tensión tangencial ejercida en un punto del fluido o sobre una superficie sólida en contacto con el mismo,  $\frac{dv_x}{dy}$  es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que estamos calculando la tensión tangencial.

### 3.3.2 Hiperelasticidad

Hiperelasticidad es la capacidad de un material para experimentar deformaciones elásticas grandes debido a cargas pequeñas, sin perder sus propiedades originales. Un material hiperelástico tiene un comportamiento no-lineal, el cual significa que su respuesta a la carga no es directamente proporcional a la deformación. En la Figura 12 se muestra el comportamiento de un material hiperelástico, el cual consta de tres fases, en primer lugar, el material muestra una pequeña deformación lineal elástica, en segundo lugar, una pendiente de deformación con un rango relativamente pequeño de esfuerzo debido a la deformación elástica, en tercer lugar, una región de densificación se produce a altos esfuerzos por el aplastamiento de las paredes celulares, dando lugar a un rápido aumento del esfuerzo de compresión. [16]

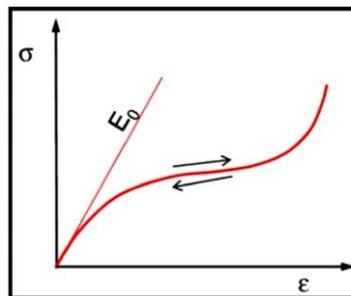


Fig. 12 Comportamiento típico de un material hiperelástico. [16]

Diremos que el material es elástico si su estado tensorial de cada instante depende de su estado de deformación en donde su esfuerzo normal ( $\sigma$ ) está dado por la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) y su función tensorial de las deformaciones  $\mathbf{F}$ . [16]

$$\sigma = \mathbf{F}(\epsilon) \quad (4)$$

### 3.3.3 Cristalización

La cristalización es el proceso por el cual, al enfriar, a partir de una fusión con una estructura molecular altamente desordenada, se alcanza una fase sólida ordenada. Es importante comprender este mecanismo en los elastómeros, ya que el grado de cristalinidad afecta las propiedades térmicas y mecánicas de estos materiales.

La cristalización de un elastómero fundido ocurre a través de procesos de enucleación y crecimiento. Para los polímeros, al enfriarse por debajo de la temperatura de fusión, se forman núcleos dentro de los cuales se ordenan y orientan pequeñas áreas de moléculas desordenadas y orientadas al azar, formando capas de cadenas plegadas. A temperaturas superiores al punto de fusión, estos núcleos son inestables debido a las vibraciones térmicas de los átomos que tienden a romper las configuraciones moleculares ordenadas. Después de la formación de los núcleos, y durante la fase de desarrollo de la cristalización, los núcleos crecen continuamente, ya que otros segmentos de cadenas moleculares están ordenados y alineados con los anteriores, las capas de la cadena plegada, es decir, aumentan las dimensiones laterales. [18]

### 3.3.4 Ductilidad y fragilidad

Las fallas en los polímeros pueden presentar de forma dúctil o frágil. En el caso de la falla dúctil, se caracterizan aspectos como la fluencia y las deformaciones. Existen diversas condiciones por las cuales un material puede fallar, pero sin duda, su composición química puede marcar el tipo de falla que se podría presentar.

La fractura frágil ocurre sin que exista una deformación plástica excesiva a niveles de esfuerzo inmediatamente antes del esfuerzo de la fluencia del material mientras que, en la fractura dúctil, la falla esta precedida de una deformación plástica considerable y lenta. [15]

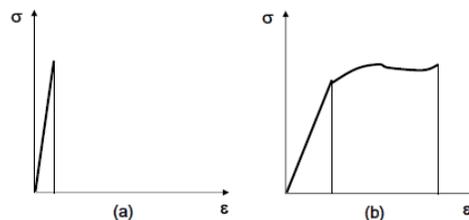


Fig. 13 Diagrama de esfuerzo a) Para material frágil, b) Para material Dúctil

### **3.4 Magnetismo**

El magnetismo es el fenómeno por el cual los materiales muestran una fuerza atractiva ó repulsiva hacia otros materiales por la presencia de un campo magnético, el cual puede ser generado por corrientes eléctricas o por los momentos de las partículas constituyentes de los materiales.

#### **3.4.1 Dipolos magnéticos**

Los dipolos magnéticos pueden considerarse como pequeños imanes formados por un polo norte y un polo sur. Los dipolos magnéticos son influenciados por los campos magnéticos. Dentro de un campo magnético, la fuerza del mismo campo ejerce un par que tiende a orientar los dipolos en dirección del campo. Los polos siempre están en pares en los cuerpos magnetizados y es imposible separarlos, si la barra de magneto se corta transversalmente en dos, aparecerán nuevos polos en las superficies cortadas y darán lugar a dos nuevos magnetos. [19]

#### **3.4.2 Inducción magnética**

La inducción magnética o densidad de flujo magnético, representa la magnitud de campo magnético dentro de una sustancia que es sometida a una intensidad de campo.

#### **3.4.3 Magnetización de un material.**

Mientras mayor sea el campo magnético externo aplicado, más alto es el nivel de magnetización del material. El límite de magnetización se conoce como magnetización de saturación y corresponde al nivel en que todos los dipolos se orientan perfectamente con el campo externo aplicado.

La estructura de los elastómeros MR, donde la matriz elastomérica no se magnetiza y contiene partículas de material ferromagnético en su interior, hace que cada partícula tienda a magnetizarse y la interacción magnética entre ellas produzca el efecto magnetorreológico. [3]

### **3.7 Efecto de Mullins**

Los materiales elastoméricos son sometidos a cargas cíclicas exhiben un fenómeno de esfuerzo por ablandamiento comúnmente conocido como efecto de Mullins. Su curva característica de esfuerzo vs deformación para pruebas cíclicas muestra una reducción significativa en el esfuerzo de la curva de material virgen comparada con la intensidad del esfuerzo que este material experimenta, para un mismo nivel de deformación, durante el proceso de descarga. Leonard Mullins advirtió de este fenómeno en su trabajo [20] y estableció la hipótesis de que un material polimérico está compuesto

por dos fases: una fase “dura” y una fase “blanda”. Cuando el material es virgen, exhibe mayormente la fase dura y conforme avanza la deformación, parte del material duro pasa a la fase suave.

Debido a que el efecto de Mullins está relacionado con la fatiga o daño del material elastomérico, es relevante conocer e identificar las principales características de este fenómeno de ablandamiento que se muestra en la Figura 14.

El ciclo de carga y descarga parte del estado O virgen, sin tensión, y sigue la trayectoria a, llamada carga primaria. Al descargar desde un punto aleatorio A, la muestra continúa por la rama b y regresa completamente al estado O sin tensión. Nótese que una vez que la muestra ha sido sometida a la tensión máxima correspondiente al punto A, sus propiedades originales han cambiado permanentemente. El área encerrada entre las curvas a y b representa la energía disipada por histéresis, dicha energía ya no se puede recuperar. Cuando el material es recargado, el comportamiento tensión-deformación sigue la curva b otra vez hasta el punto A, donde comenzó la descarga, si a continuación se impone una deformación superior a la correspondiente a dicho punto, continuará por la curva c, que es una continuación de la curva primaria a.

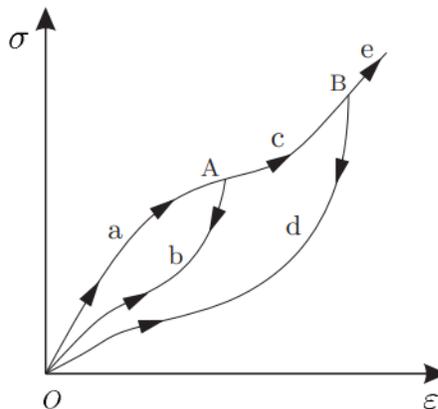


Fig. 14 Ensayo de tensión ciclotidal que exhibe el efecto de Mullins.

### 3.7.1 Los efectos de deformación residual que describen Mullins

Las correspondientes ecuaciones de descarga tensión-estiramiento que describen Mullins y los efectos de deformación residual [15]:

$$\eta_1 = \frac{1}{r_1} \left( \tanh \left[ \frac{W_{max} - W_T}{\mu m_1} \right] \right) \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{r_1 \tanh[1]} \left( \tanh \left[ \frac{W_T}{W_{max}} \right]^a \right) \quad (6)$$

$$\nu_1 = \nu_2 \left( 1 - \frac{1}{r_2} (\tanh[10\lambda_{max} - 1]) \right) \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{10} \left( 3 + \left[ \frac{8W_{max}}{5\mu} \right] \right) \quad (8)$$

La relación esfuerzo-estiramiento de ingeniería uniaxial, para un material incompresible, en función de la forma equivalente de la tensión de Cauchy, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\sigma = TF^{-1} \quad (9)$$

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Fabricación de probetas magnetorreológicas

El procedimiento para obtener el elastómero reforzado con partículas magnetizables es el siguiente:

En primer lugar, se emplearon como partículas de refuerzo materiales como hierro, níquel y óxido de hierro en aceite de silicona (SO) y se mezclaron con caucho de silicona (SR) a temperatura ambiente utilizando una barra agitadora hasta obtener una mezcla homogénea. Una vez que se tiene la mezcla, se coloca en el molde, se inicia con el proceso de curado, una parte de las probetas se expone a un curado sin campo externo y otra parte las muestras se expone a un campo magnético por medio del solenoide diseñado para reordenar las micropartículas durante un tiempo determinado hasta alcanzar un estado semisólido y la sedimentación de las partículas magnéticas este bloqueo, se realiza esta fase en condiciones de vacío para evitar poros en las muestras, este proceso se realiza con diferentes contenidos de SO para poder analizar y determinar la relación de SO-SR que proporcionen las mejores propiedades mecánicas de un MRE, tal como se muestra en la Figura 15. [21]

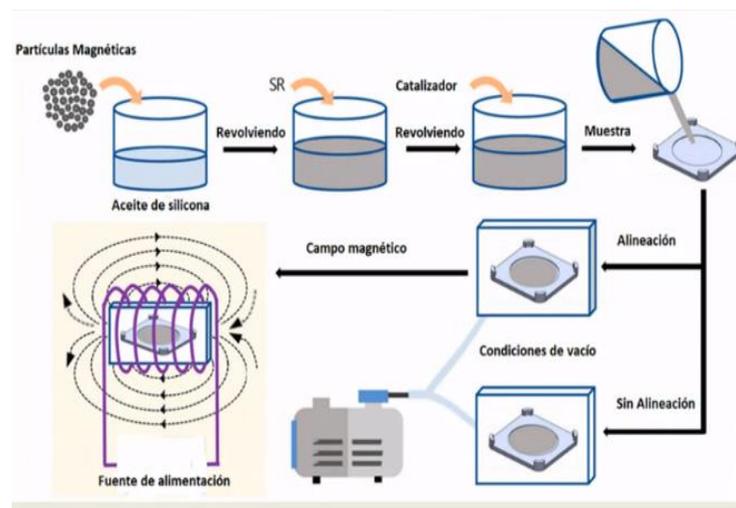


Fig. 15 Método de fabricación para una muestra magnetorreológica. [21]

El procedimiento para fabricar los MRE, primero, se mezclaron los polvos de CIP junto con el aceite de silicona durante unos minutos, luego se agregaron los polvos Nanopartículas y se volvieron a mezclar, hasta que se recuperaron todas las partículas con el SO. Posteriormente, se separaron las cantidades requeridas de las partes A y B de resina PDMS siguiendo una relación 1A: 1B en peso. Luego, la parte B se mezcló con las partículas magnéticas durante unos minutos hasta obtener una mezcla homogénea. Finalmente, se vertió la parte A sobre la mezcla anterior y se volvió a mezclar hasta obtener una mezcla homogénea. La mezcla se coloca en los moldes y se expone al vacío para eliminar el aire formado durante la agitación. [21]

El contenido de partículas magnéticas fue 45% en peso, y las combinaciones de nanopartículas y micropartículas fueron 100-0, 75-25 y 50-50, donde el primer y segundo número corresponden al porcentaje de CIP y nanopartículas, respectivamente. Se aplicó una intensidad de campo magnético de 52 mT para inducir la alineación de las partículas magnéticas durante los primeros 30 minutos del proceso de curado, y así se obtuvieron los MRE anisotrópicos. Para aquellos MRE isotrópicos no se aplicó un campo magnético. Las muestras se desmoldaron después de 8 horas de curado.

### 3.5 Modelo de densidad de energía de deformación equivalente.

Con la finalidad de modelar el comportamiento mecánico de los elastómeros se considera que la densidad de energía de deformación total,  $W_T$ , se da, de acuerdo con la regla básica de mezclas, [15] presentada en la ec. (10):

$$W_T = (1 - f)W_{iso}(I_1) + fW_{aniso}(I_{4i}, I_{5i}) \quad (10)$$

Donde:

$W_{iso}(I_1)$  es la densidad de energía de deformación con el comportamiento isotrópica.

$W_{aniso}(I_{4i}, I_{5i})$  es la densidad de energía de deformación anisotrópica.

$I_{4i}, I_{5i}$  representan la parte anisotrópica de la energía de deformación definida como:

$$I_{4i} = a_i \cdot C \cdot a_i \quad I_{5i} = a_i \cdot C^2 \cdot a_i \quad (11)$$

Las direcciones de las fibras en su configuración inicial están dadas por los vectores  $a_i = x_{1i}e_1 + x_{2i}e_2 + x_{3i}e_3$  en donde  $x_{ji}$  son los cosenos de la dirección de la fibra.

$f$  representa la contribución a la fracción volumétrica anisotrópica, energía total de la densidad del material.

Usando las modificaciones en el trabajo [16] [17], de la densidad de energía en la deformación No-Gaussiana para caracterizar la contribución isotrópica (matriz) a la energía total del material, obtenemos:

$$W_{iso}(I_1) = \mu \left[ N \left( \beta \lambda_r + \ln \left( \frac{\beta}{\sinh \beta} \right) \right) - \ln \left( \frac{\beta}{\lambda_r} \right) \right] + c \quad (12)$$

Donde  $\lambda_r$  es el estiramiento relativo de la cadena:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_{cadena}}{\lambda_L} \quad (13)$$

$\lambda_L = \sqrt{N}$  representa el estiramiento relativo de la cadena completamente extendido,  $N$  es el número de cadenas de eslabones rígidos, cada uno de longitud  $l$ ,  $\lambda_{cadena}$  es la deformación relativa de la cadena que se puede calcular a partir de:

$$\lambda_{cadena} = \sqrt{\frac{I_1}{3}} \quad (14)$$

$\beta = \mathcal{L}^{-1} \lambda_r$  es la inversa de la función de Langevin  $\mathcal{L}(\beta)$  que se define como:

$$\lambda_r = \mathcal{L}(\beta) = \coth \beta - \frac{1}{\beta} \quad (15)$$

$\mu$  es el módulo de corte del material y  $c$  es una constante de energía [16, 17]. Para el caso donde  $W_{aniso}(I_{4i}, I_{5i})$  consideramos de manera equivalente en función de la energía de deformación total  $W_T$  y de  $W_{iso}(I_1)$  como:

$$W_{aniso}(I_4, I_5) = \frac{W_T - (1-f)W_{iso}(I_1)}{f} \quad (16)$$

De acuerdo con el procedimiento desarrollado [18] tendremos que la energía de deformación anisotrópica será:

$$W_{aniso} = f \left( \frac{A_1}{3} (I_{1i} - 3) + \frac{A_2}{9} (I_{1i} - 3)^2 - \frac{2A_i}{3} \ln \sqrt{I_{3i}} \right) \quad (17)$$

Sustituyendo  $W_{aniso}$  en la Ecuación (10) se obtiene la expresión de densidad de energía de deformación equivalente total que puede ser utilizado para modelar materiales hiperelásticos:

$$W_T = (1 - f)W_{iso}(I_1) + f \left( \frac{A_1}{3} (I_{1i} - 3) + \frac{A_2}{9} (I_{1i} - 3)^2 - \frac{2A_i}{3} \ln \sqrt{I_{3i}} \right) \quad (18)$$

### 3.6 Modelo constitutivo del material.

Con la modificación al modelo pseudoelástico propuesto por Dorfmann y Ogden en [19] y considerando la ecuación de expresión de energía (11) para derivar las correspondientes ecuaciones de descarga tensión-estiramiento, obtenemos:

$$T_j - T_k = \left[ \left\{ (1 - f)N + \frac{2f}{3} \left( A_1 + \frac{2A_2}{3} (I_{1i} - 3) \right) \{ x_{ji}^2 - x_{ki}^2 \} \right\} (\lambda_j^2 - \lambda_k^2) + (1 - \eta_2)(\nu_1 \lambda_j^2 - \nu_2 \lambda_k^2) \right] \eta_1 \quad (19)$$

La relación anterior nos permite determinar el valor del esfuerzo al que está sometido el material compuesto.

### 3.7 Obtención de los parámetros para incorporar en el modelo constitutivo del material.

A continuación, se presenta el procedimiento para obtener los valores de las proporciones en volumen de las partículas de refuerzo y la matriz.

Considerando el material donde el contenido de partículas magnéticas que fue 45% en peso respecto de la matriz, y tomando en cuenta que para nuestro caso la proporción en peso es equivalente a la proporción de masa y suponiendo que a la masa total del material ( $M$ ) es 1 kg, tenemos

$$M = 0.55 M_{matriz} + 0.45 M_{particulas} \quad (20)$$

y considerando que la relación de la densidad es  $\rho = \frac{\text{masa } (M)}{\text{volumen } (V)}$ , tenemos que  $M = \rho * V$

Para el caso de la masa de la matriz y la masa de las partículas:

$$M_{matriz} = \rho_{matriz} * V_{matriz} \quad (21)$$

$$M_{particulas} = \rho_{particulas} * V_{particulas} \quad (22)$$

sustituyendo la ec. (21) y (22) en la ec. (20), obtenemos la siguiente relación

$$M = 0.55 (\rho_{matriz} * V_{matriz}) + 0.45 (\rho_{particulas} * V_{particulas}) \quad (23)$$

considerando que la densidad de la matriz es de 1000 kg/m<sup>3</sup> y de las partículas es de 7842 kg/m<sup>3</sup> y sustituyendo estos valores en la ec. (21), tenemos

$$M = 0.55 (1000 * V_{matriz}) + 0.45 (7842 * V_{particulas})$$

$$M = 550 * V_{matriz} + 3529 * V_{particulas} \quad (24)$$

además, el volumen total del material esta dado por las siguientes relaciones

$$V = V_{particulas} + V_{matriz} \quad (25)$$

$$V = \frac{M_{particulas}}{\rho_{particulas}} + \frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}} \quad (26)$$

De acuerdo con las ecuaciones de Porcentaje en volumen tenemos que

$$v_{particulas} = \frac{V_{particulas}}{V} \quad (27)$$

Sustituyendo la ec. (26) en la ec. (27) y sustituyendo valores obtenemos el porcentaje de partículas en volumen en el material compuesto

$$v_{particulas} = \frac{\frac{M_{particulas}}{\rho_{particulas}}}{\frac{M_{particulas}}{\rho_{particulas}} + \frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}}} = \frac{\frac{0.45}{7842}}{\frac{0.45}{7842} + \frac{0.55}{1000}} = 0.09447 \quad (28)$$

De manera similar para el porcentaje de matriz en volumen del material compuesto

$$v_{matriz} = \frac{V_{matriz}}{V} \quad (29)$$

Sustituyendo la ec. (26) en la ec. (29) y sustituyendo valores obtenemos el porcentaje de matriz en volumen en el material compuesto

$$v_{matriz} = \frac{\frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}}}{\frac{M_{particulas}}{\rho_{particulas}} + \frac{M_{matriz}}{\rho_{matriz}}} = \frac{\frac{0.55}{1000}}{\frac{0.45}{7842} + \frac{0.55}{1000}} = 0.90553 \quad (30)$$

Por supuesto sabemos que

$$v_{particulas} + v_{matriz} = 1$$

Lo que se puede verificar fácilmente. De esta manera, la fracción volumétrica anisotrópica equivalente,  $f$  es equivalente a  $v_{particulas}$  que se obtuvo en la ec. (28).

### 3.8 Materiales analizados

Los datos experimentales de la caracterización se obtuvieron de [7] donde los materiales que utilizaron para la fabricación fueron dimetil hidroxipolidimetilsiloxano (PDMS) P-85 RTV y PE-21 RTV (con dureza Shore A de 14 y 20, respectivamente), polidimetilsiloxano con viscosidad de 340 cps utilizado como agente dispersante (aceite de silicona, SO), y ortosilicato de tetraetilo y estaño de dibutilo como agente de curado, se utilizaron rellenos magnéticos con diferentes tamaños de partícula, 70 nm y 2,5  $\mu$ m de tamaño medio.

Para el proceso de fabricación [7] las partículas magnéticas (20% en peso) y SO se mezclaron durante 3 a 5 min. Para después añadir a esta mezcla 44 g de PDMS, todos los componentes se agitaron a temperatura ambiente durante 5 min. Se añadió el agente de curado antes de poner la

mezcla homogénea en un molde. El proceso de curado tuvo lugar en condiciones de vacío a temperatura ambiente durante 12 h. Se utilizaron contenidos de 4% y 24% de SO basándose en el volumen de PDMS para obtener propiedades mecánicas mejoradas de los materiales MRE. Los diferentes tipos de materiales desarrollados se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de muestras de elastómero magnetorreológico (MRE).

<b>Nomenclatura</b>	<b>Relleno</b>	<b>Dureza Shore A</b>	<b>Volumen de Aceite de Silicona (%)</b>
MS04	Micropartículas	14 (Blanda)	4
NS04	Nanopartículas	14 (Blanda)	4
MS24	Micropartículas	14 (Blanda)	24
NS24	Nanopartículas	14 (Blanda)	24
MH04	Micropartículas	20 (Dura)	4
NH04	Nanopartículas	20 (Dura)	4
MH24	Micropartículas	20 (Dura)	24
NH24	Nanopartículas	20 (Dura)	24

Tabla 2. Nomenclatura de probetas respecto al contenido de micro y nanopartículas al 45% en peso de CIP.

<b>Nomenclatura</b>	<b>% de Micropartículas</b>	<b>% de Nanopartículas</b>	<b>% en Peso</b>
45_0100_ANI	0	100	45
45_0100_ISO	0	100	45
45_2575_ANI	25	75	45
45_2575_ISO	25	75	45
45_5050_ANI	50	50	45
45_5050_ISO	50	50	45

### 3.9 Especificaciones utilizadas en la fabricación de los materiales.

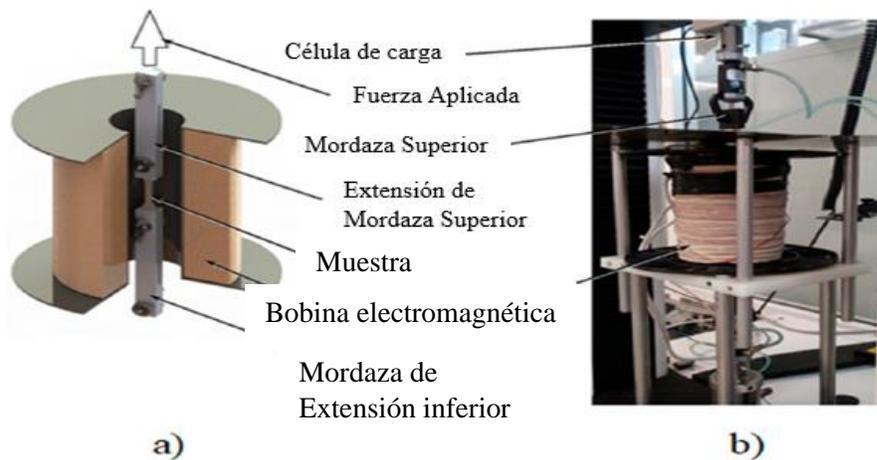
Los materiales utilizados para la fabricación de los MRE fueron la matriz de polidimetilsiloxano de Ecoflex con una viscosidad de 14.000 cps según ASTM D-2393, y una dureza Shore de 00-10 según ASTM D-2240, y aceite de dimetilsilicona (SO), cuya la viscosidad fue de 0,25 Pa\*s,

utilizada como aditivo para recuperar la superficie de las partículas magnéticas. Ambos fueron adquiridos a Mörph Industries (Ciudad de México, México).

Como cargas de refuerzo, las micropartículas utilizadas fueron partículas de carbonil hierro (CIP) con un tamaño de partícula en el rango de 5-9  $\mu\text{m}$ , y las nanopartículas de hierro con tamaños de 60 a 80 nm, según el proveedor. Ambos fueron adquiridos de Sigma-Aldrich (Ciudad de México, México). Tolueno

### 3.10 Pruebas de tracción uniaxial.

Una vez curadas las mezclas magnetorreológicas, las diferentes muestras de material fueron sometido a pruebas de extensión uniaxial cíclica en una máquina de prueba universal Instron 3365 a temperatura ambiente. Las probetas tienen una geometría en forma de mancuerna según la especificación norma ISO37-2011. Las muestras de material se ubicaron dentro de una bobina de solenoide, el campo magnético se orientó hacia la dirección de la carga de tracción aplicada por la máquina de prueba, como se muestra en la Fig. 16. Todas las muestras se mantuvieron dentro de la bobina del solenoide durante la aplicación de densidad de flujo magnético. [9]



La configuración de instalación está preparada de tal manera que se asegure que el campo magnético aplicado sea paralelo a la alineación de partículas del MRE (Fig. 17). Se mantuvo adentro la muestra del solenoide durante la aplicación de una densidad de flujo magnético uniforme. Es importante mencionar que se instaló una chapa de acero Fe-Si, utilizada como escudo

magnético, para proteger la carga de la máquina de tracción. celda y para evitar datos falsos. La densidad de flujo magnético se varió de 0 a 52 mT.

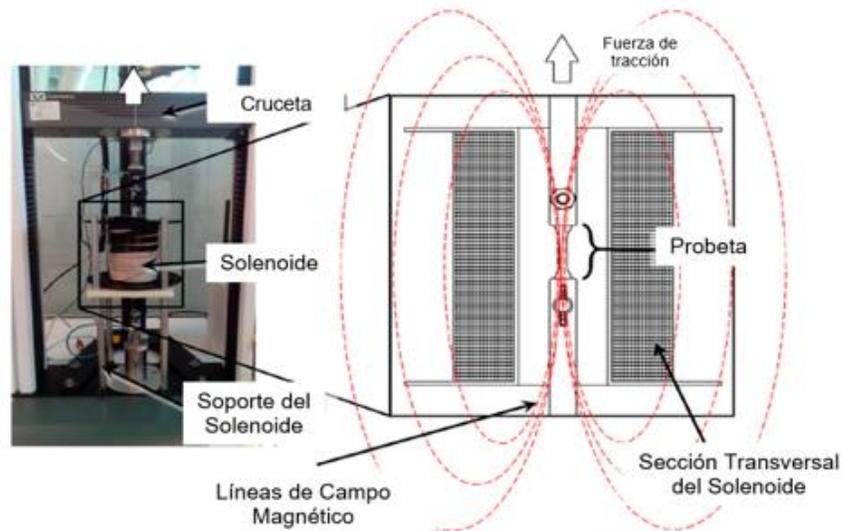


Fig. 17 Esquema del montaje de la prueba de tracción y su campo magnético aplicado a las muestras de elastómero magnetorreológico (MRE). La configuración experimental permite que las líneas del campo magnético sean paralelas a la ubicación de las micropartículas dentro de la muestra de material.

### 3.11 Modelo para predecir el efecto de Mullins.

De los datos experimentales obtenidos de [7] para las muestras examinamos el modelo para predecir el efecto de Mullins y los efectos residuales en las muestras de los elastómeros magnetorreológicos isotrópicos y anisotrópicos cuando se someten a cargas cíclicas. Las curvas de energía de deformación de las muestras que se presentaran a continuación se obtuvieron de datos experimentales y los valores de  $b$  y  $c$  son parámetros de ajuste del modelo a cada uno de los materiales que se adaptan a cada ciclo de carga y descarga.

Para las muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24, obtenemos gráficas y compramos los valores de esfuerzo real o de ingeniería y la deformación para las probetas con micro y nano partículas.

En las muestras 45\_0100 ANI, 45\_0100\_ISO, 45\_2575\_ANI, 45\_2575 ISO, 45\_5050 ANI y 45\_5050 ISO, las curvas de energía de deformación se presentarán para cada una de las probetas. Los datos experimentales de las probetas fueron obtenidos de las pruebas de carga-descarga (corridas) para cada una de ellas a diferentes valores de campo magnético

Table 2. valor de campo magnético para cada corrida.

# CORRIDA	miliTesla (mT)
Corrida 1	0.00
Corrida 2	0.00
Corrida 3	11.1
Corrida 4	26.3
Corrida 5	39.5
Corrida 6	52.2

Un Tesla se define como la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética.

## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados a partir de la caracterización mecánica realizada a las probetas de material magnetorreológico.

### 5.1 Obtención del módulo de rigidez, $\mu$

Con la finalidad de establecer una mejor caracterización del efecto de Mullins, se ha obtenido el valor experimental del módulo de rigidez, lo que se obtiene a partir de una regresión lineal de los primeros puntos de la prueba de tensión. La Figura 18 muestra los datos experimentales y la regresión lineal para el material 45\_5050\_ISO.

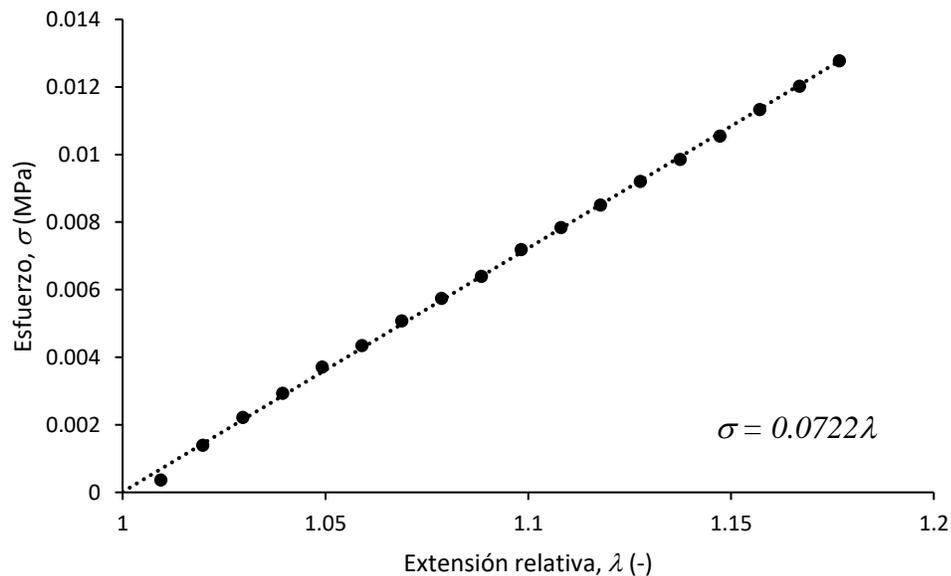


Fig. 18. Obtención del módulo de rigidez para el material 45\_5050\_ISO.

Los valores de módulos de rigidez obtenidos a partir de los datos experimentales de los materiales isotrópicos y anisotrópicos en sus diferentes contenidos se muestran en la Tabla 3. Esta información permitirá realizar un mejor modelado del comportamiento mecánico del material.

Tabla 3. Valores de pendiente obtenidos de los datos experimentales de los materiales isotrópicos y anisotrópicos

Probeta	Módulo de rigidez (MPa)					
	45_0100_ANI	45_0100_ISO	45_2575_ANI	45_2575_ISO	45_5050_ANI	45_5050_ISO
2	0.0473	0.0394	0.0523	0.0523	0.0646	0.055
3	0.0468	0.0391	0.0523	0.0523	0.0631	0.0546
4	0.0466	0.0393	0.0629	0.0525	0.0626	0.0541
5	0.0489	0.0396	0.0632	0.0526	0.063	0.0541
6	0.0522	0.0396	0.0635	0.0531	0.0623	0.054

## 5.2 Curvas de energía de deformación para las muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24

Las Figuras 19 a 26 muestran los datos experimentales en puntos de color azul y con la línea punteada de color negro se muestra la curva descrita por el modelo utilizado para describir el efecto de Mullins. Los materiales que se muestran son los MS04, NS04, MS24, NS24, MH04, NH24, MH24 y NH24.

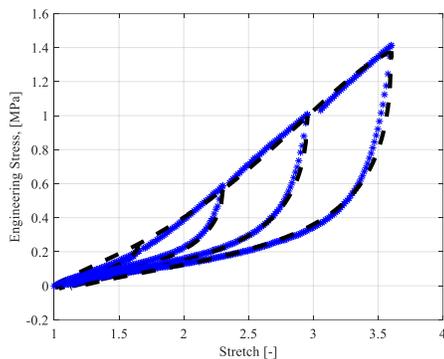


Fig. 19 Muestra MS04 con Micropartículas y valores:  $\mu = 0.2797$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.3549$ ,  $A2 = 0.0297$ ,  $N = 9.7263$ ,  $b = 0.62$ ,  $c = 9$ .

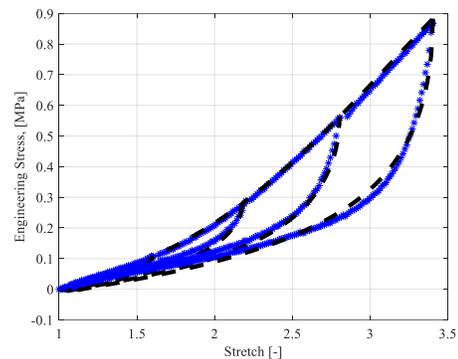


Fig. 20 Muestra NS04 con Nanopartículas y valores:  $\mu = 0.3666$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.4435$ ,  $A2 = 0.0543$ ,  $N = 7.3397$ ,  $b = 0.72$ ,  $c = 12$ .

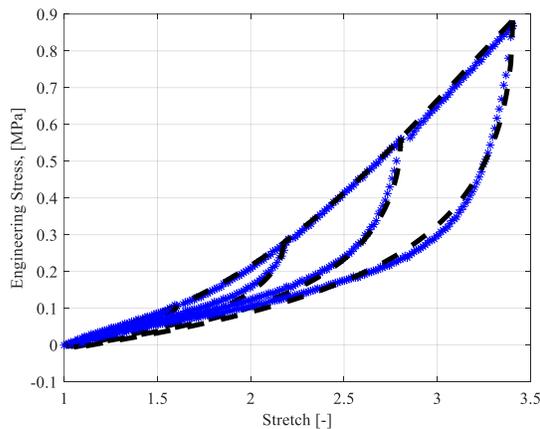


Fig. 21 Muestra MS24 con Micropartículas y valores:  $\mu = 0.1713$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.2426$ ,  $A2 = 0.0050$ ,  $N = 22.3302$ ,  $b = 0.5$ ,  $c = 18$ .

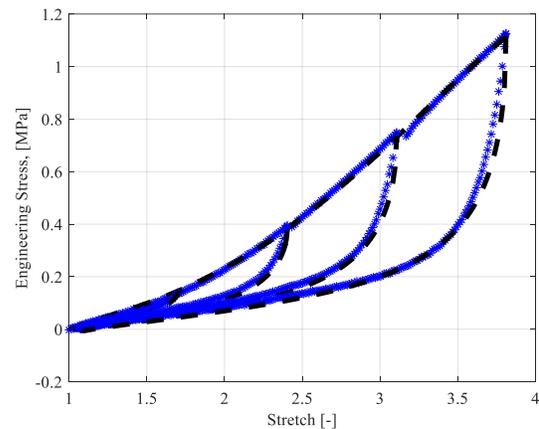


Fig. 22 Muestra NS24 con Nanopartículas y valores:  $\mu = 0.1810$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.2580$ ,  $A2 = 0.0044$ ,  $N = 26.0474$ ,  $b = 0.65$ ,  $c = 17$ .

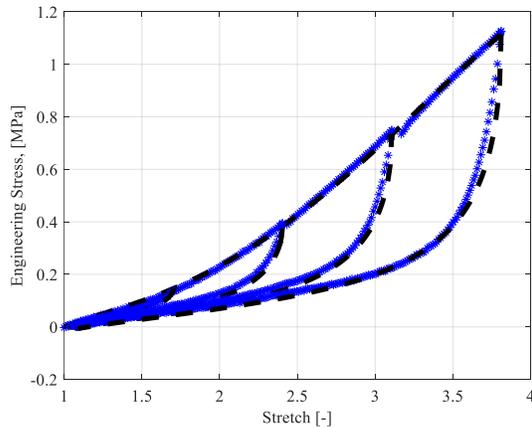


Fig. 23 Muestra MH04 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.1831$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.2192$ ,  $A2 = 0.0265$ ,  
 $N = 8.8536$ ,  $b = 0.53$ ,  $c = 19$ .

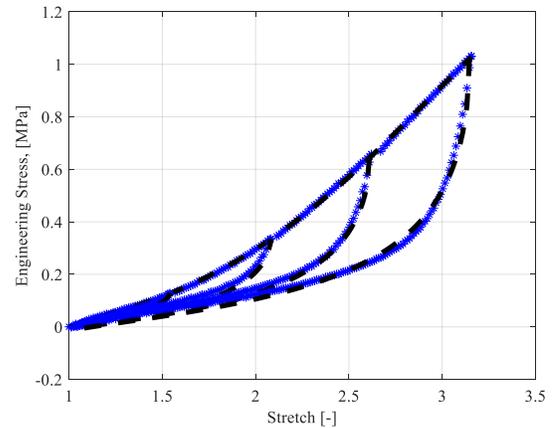


Fig. 24 Muestra NH04 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.2294$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.2732$ ,  $A2 = 0.0328$ ,  
 $N = 8.6259$ ,  $b = 0.63$ ,  $c = 19$ .

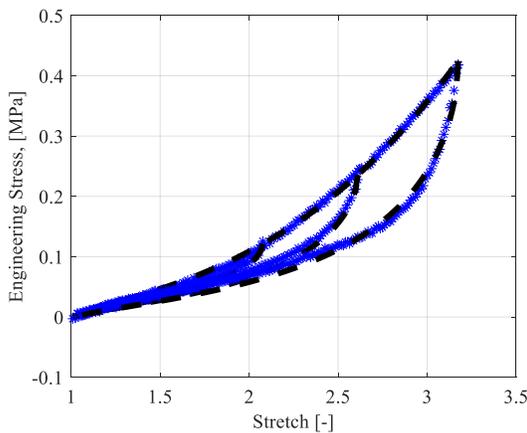


Fig. 25 Muestra MH24 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.0864$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.1233$ ,  $A2 = 0.0021$   
 $N = 32.4457$ ,  $b = 0.42$ ,  $c = 35$ .

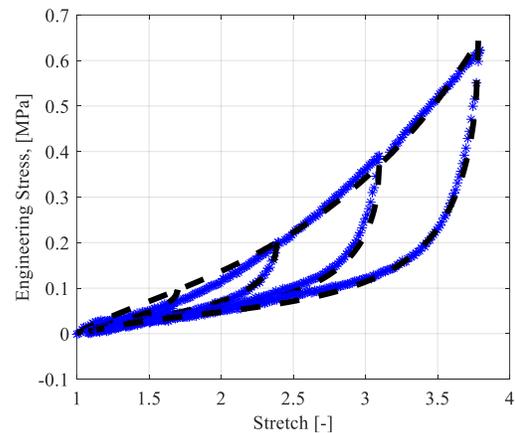


Fig. 26 Muestra NH24 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.0908$ ,  $f = 0.03089$ ,  $A1 = 0.1298$ ,  $A2 = 0.0021$   
 $N = 29.5889$ ,  $b = 0.6$ ,  $c = 10$ .

A partir de estos resultados obtenidos puede observarse que material que presentó una mayor rigidez es el que contiene nanopartículas con poco contenido de aceite de silicón NS04, además, el material que presenta un mayor parámetro del efecto de ablandamiento es el material con micropartículas de refuerzo con un alto contenido de aceite MH24 que, al mismo tiempo, exhibe el comportamiento más flexible de todas las variantes consideradas.

En la Tabla 4 se muestra el resumen de cada uno de los parámetros obtenidos para el modelo constitutivo de cada uno de los materiales analizados, se muestra para los materiales reforzados con micro y nanopartículas magnéticas y con alto y bajo contenido de aceite de silicón.

Tabla 4. Constantes de material utilizadas y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24.

	$\mu$ (Mpa)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b(-)	c (MPa)	f (-)
<b>MS04</b>	0.2797	0.3549	0.0297	9.7263	0.62	9	0.03089
<b>NS04</b>	0.3666	0.4435	0.0543	7.3397	0.72	12	0.03089
<b>MS24</b>	0.1713	0.2426	0.0050	22.3302	0.5	18	0.03089
<b>NS24</b>	0.1810	0.2580	0.0044	26.0474	0.65	17	0.03089
<b>MH04</b>	0.1831	0.2192	0.0265	8.8536	0.53	19	0.03089
<b>NH04</b>	0.2294	0.2732	0.0328	8.6259	0.63	19	0.03089
<b>MH24</b>	0.0864	0.1233	0.0021	32.4457	0.42	35	0.03089
<b>NH24</b>	0.0908	0.1298	0.0021	29.5889	0.6	10	0.03089

En las secciones que siguen se presentan los resultados de las probetas híbridas que contienen al mismo tiempo partículas micro y nanométricas y que tienen una alineación preferente de las partículas, ya que durante su proceso de curado se expusieron a un campo magnético de 52 mT.

En primer término, en la sección 5.3 se muestran los resultados de las probetas que contienen 100% de micropartículas alineadas (anisotrópicas); mientras que en la sección 5.4 se muestran las mismas probetas, pero con las partículas no alineadas (isotrópicas).

Después, se presentan los resultados de las probetas que contienen 25% de nanopartículas y 75% de micropartículas en la sección 5.5 las muestras con partículas alineadas y en la sección 5.6 las no alineadas.

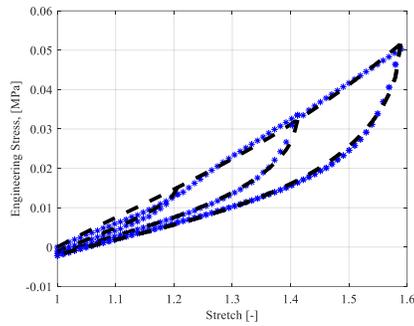
Las muestras con 50% de nanopartículas y 50% de micropartículas, cuando están alineadas se presentan en la sección 5.7 y en la sección 5.8 las que no están alineadas.

Es importante mencionar que con cada una de las corridas se está cambiando la intensidad de campo magnético aplicado durante la prueba cíclica.

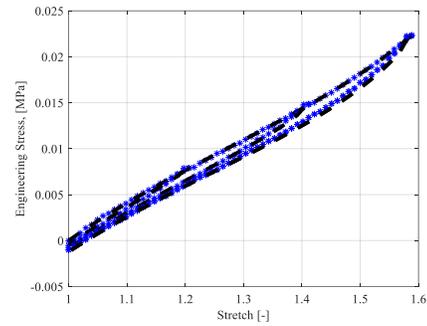
La corrida 1 se realiza sin campo magnético y corresponde al material en su condición virgen, mientras que la corrida 2 corresponde a la misma probeta sin campo magnético, pero con el material ya no virgen. De esta manera, en la corrida 3 se aplica un campo magnético de 11 mT, para la corrida 4 la intensidad de campo es de 26.3 mT, en la corrida 5 se incrementa nuevamente la intensidad del campo magnético para que alcance un valor de 39.5 mT, por último, en la corrida 6 se aplica un campo magnético con una intensidad de 52.2 mT.

Estas corridas permitirán conocer la influencia del campo magnético en cada una de las diferentes muestras que se analizaron.

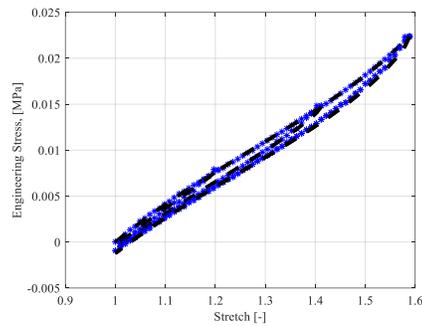
## 5.3 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_0100\_ANI



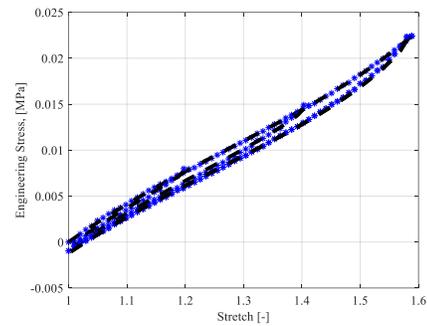
a) **Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0384$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.1204$ ,  $A2 = 0.4994$ ,  $N = 79.9997$   
 $b = 1$ ,  $c = 7$



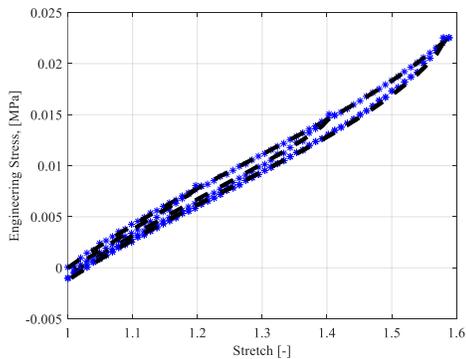
a) **Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0394$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.2393$ ,  $A2 = -0.1345$ ,  $N = 1.9752$   
 $b = 0.18$ ,  $c = 22$



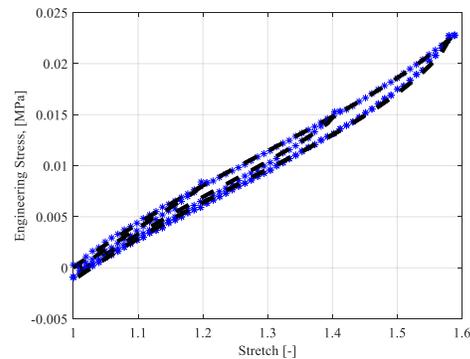
b) **Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0391$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.2353$ ,  $A2 = -0.1389$ ,  $N = 1.9556$   
 $b = 0.16$ ,  $c = 22.4$



c) **Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0393$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.23630$ ,  $A2 = -0.1404$ ,  $N = 1.9611$   
 $b = 0.15$ ,  $c = 22.6$



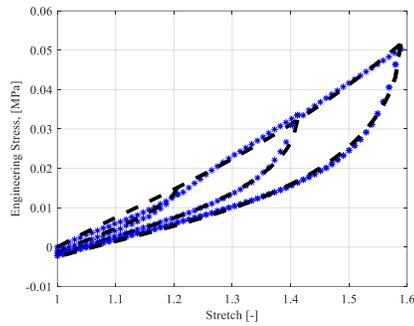
d) **Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0396$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.2354$ ,  $A2 = -0.1546$ ,  $N = 1.9385$   
 $b = 0.16$ ,  $c = 22.7$



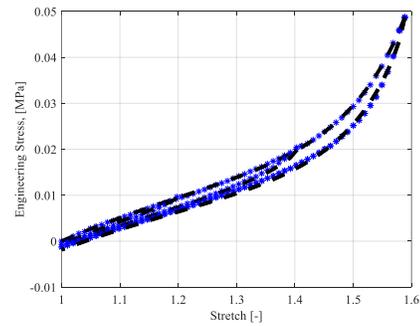
e) **Corrida 6**, valores de:  $\mu = 0.396$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.2240$ ,  $A2 = -0.1859$ ,  $N = 1.8971$   
 $b = 0.17$ ,  $c = 22.8$

Fig. 27. Curvas de energía de deformación de probeta 45\_0100 anisotrópica con 0 % de nanopartículas y 100% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

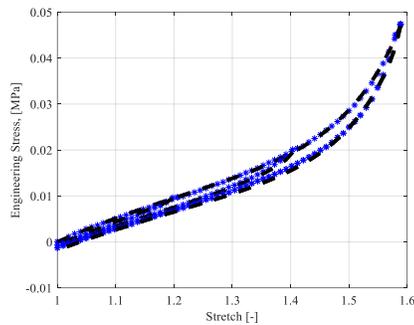
## 5.4 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_0100\_ISO



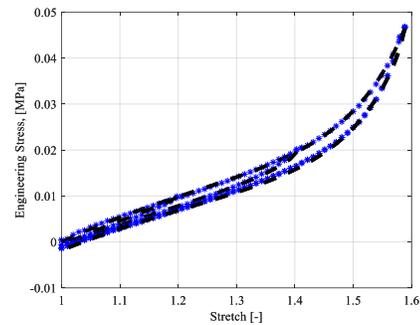
**b) Corrida 1**, valores de:  $\mu = 0.0602$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.4348$ ,  $A2 = 0.4997$ ,  $N = 1.9968$   
 $b = 1$ ,  $c = 9$ .



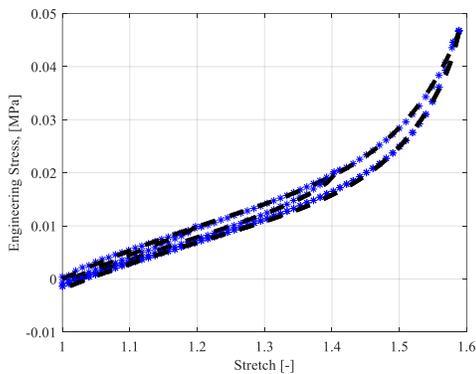
**b) Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0473$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.2592$ ,  $A2 = -0.4616$ ,  $N = 1.4567$   
 $b = 0.3$ ,  $c = 16$



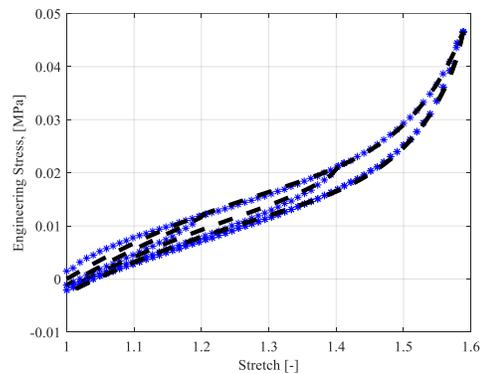
**Fig. c) Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0468$ ,  $f = 0.0945$   
 $A1 = -0.02483$ ,  $A2 = 0.4942$ ,  $N = 1.4581$   
 $b = 0.29$ ,  $c = 16.4$ .



**Fig. d) Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0466$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2335$ ,  $A2 = -0.5312$ ,  $N = 1.4577$   
 $b = 0.28$ ,  $c = 16.5$ ,



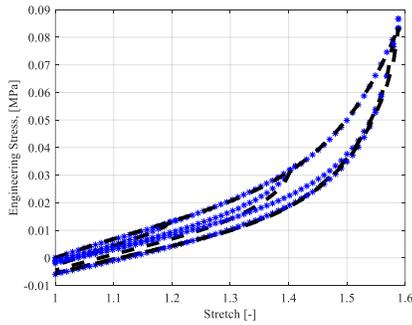
**Fig. e) Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0489$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2600$ ,  $A2 = -0.5550$ ,  $N = 1.4633$   
 $b = 0.27$ ,  $c = 16.7$



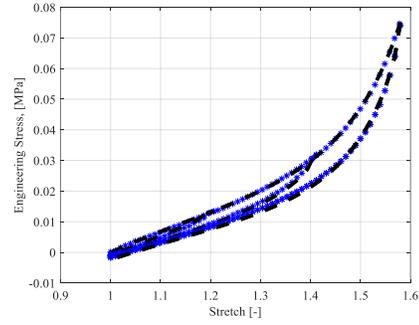
**Fig. f) Corrida 6**, valores de:  $\mu = 0.0522$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2123$ ,  $A2 = -0.8379$ ,  $N = 1.4561$   
 $b = 0.31$ ,  $c = 12$

**Fig. 28.** Curvas de energía de deformación de probeta 45\_0100 isotrópica con 0 % de nanopartículas y 100% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

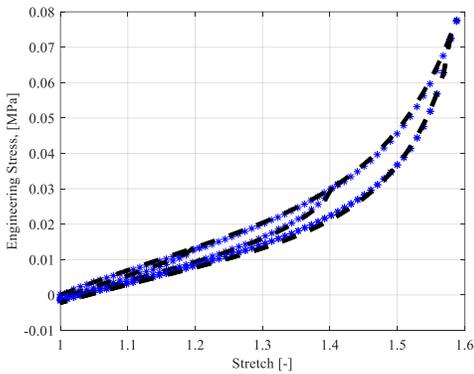
## 5.5 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_2575\_ANI



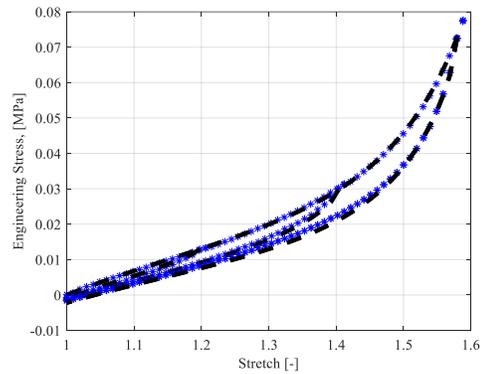
a) **Corrida 1**, valores de:  $\mu = 0.1551$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -1.4308$ ,  $A2 = -1.0425$ ,  $N = 1.5622$   
 $b = 0.7$ ,  $c = 12.5$ ,



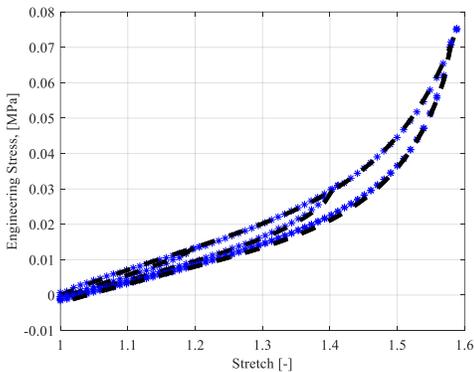
b) **Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0646$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3655$ ,  $A2 = -0.4114$ ,  $N = 1.4408$   
 $b = 0.5$ ,  $c = 14.5$



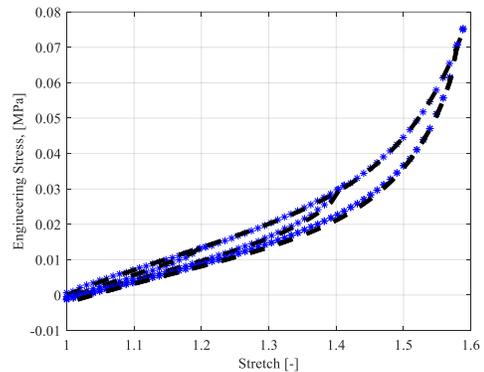
c) **Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0631$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3340$ ,  $A2 = -0.4456$ ,  $N = 1.4399$   
 $b = 0.52$ ,  $c = 14.8$



d) **Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0626$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3388$ ,  $A2 = -0.4398$ ,  $N = 1.4390$ ,  
 $b = 0.51$ ,  $c = 15.1$



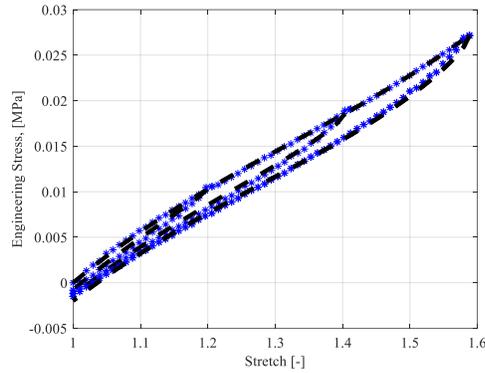
e) **Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0630$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3254$ ,  $A2 = -0.5212$ ,  $N = 1.4416$ ,  
 $b = 0.48$ ,  $c = 15.4$



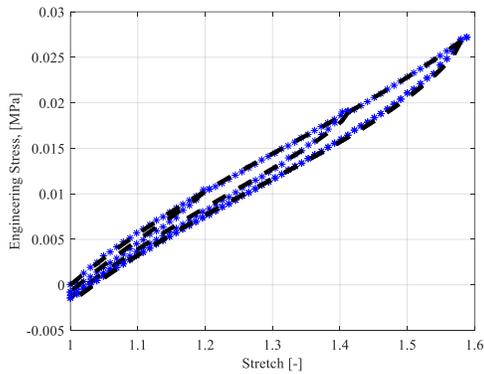
f) **Corrida 6**, valores de:  $\mu = 0.0623$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3174$ ,  $A2 = -0.5232$ ,  $N = 1.4405$ ,  
 $b = 0.47$ ,  $c = 15.5$

Fig. 29. Curvas de energía de deformación de probeta 45\_2575 anisotrópica con 25 % de nanopartículas y 75% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

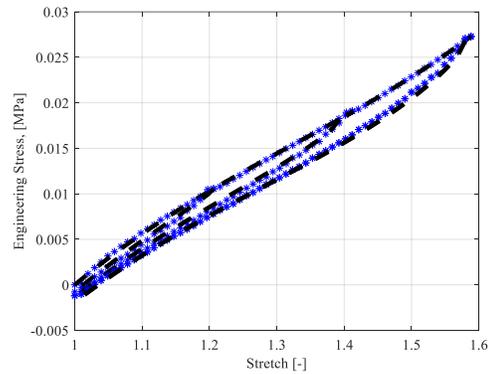
## 5.6 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_2575\_ISO



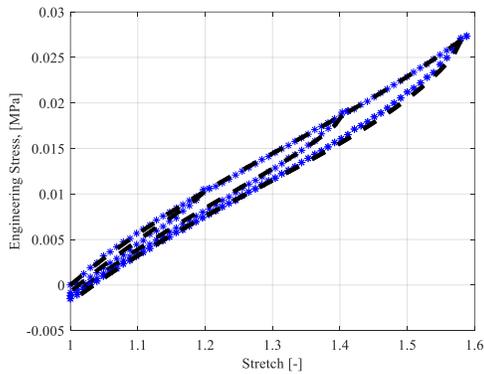
**a) Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0523$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2021$ ,  $A2 = 0.3773$ ,  $N = 0.4341$ ,  
 $b = 0.2$ ,  $c = 18$ .



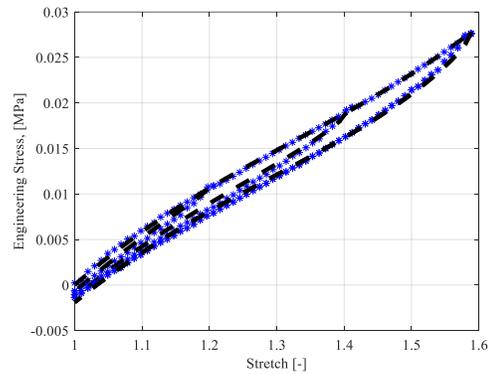
**b) Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0523$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2036$ ,  $A2 = 0.3834$ ,  $N = 0.4488$ ,  
 $b = 0.21$ ,  $c = 18.2$



**c) Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0525$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2045$ ,  $A2 = 0.3827$ ,  $N = 0.4417$ ,  
 $b = 0.22$ ,  $c = 18.3$



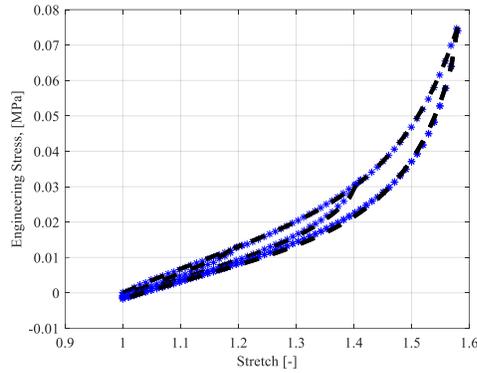
**d) Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0526$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2059$ ,  $A2 = 0.3868$ ,  $N = 0.4474$ ,  
 $b = 0.23$ ,  $c = 18.4$



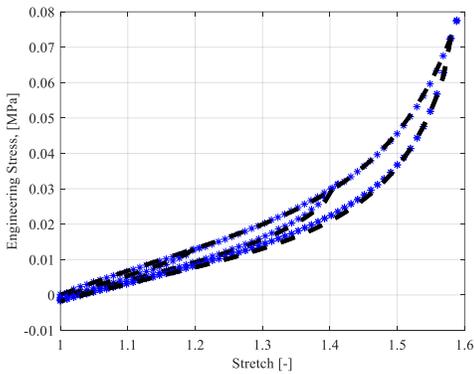
**e) Corrida 6**, valores de:  $\mu = 0.0531$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.2074$ ,  $A2 = 0.4072$ ,  $N = 0.5272$ ,  
 $b = 0.19$ ,  $c = 19.2$

Fig. 30. Curvas de energía de deformación de probeta 45\_2575 isotrópica con 25 % de nanopartículas y 75% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

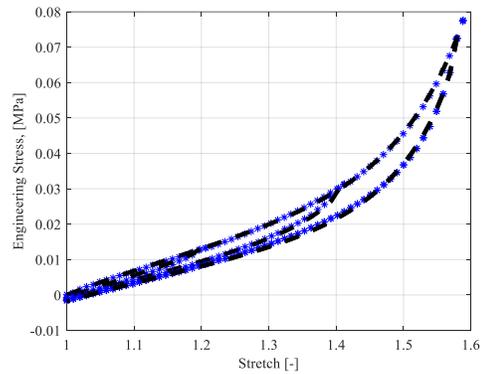
## 5.7 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_5050\_ANI



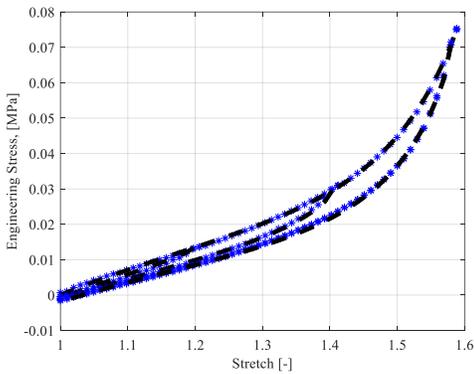
a) **Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.0646$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3655$ ,  $A2 = -0.4114$ ,  $N = 1.4408$   
 $b = 0.5$ ,  $c = 18.5$



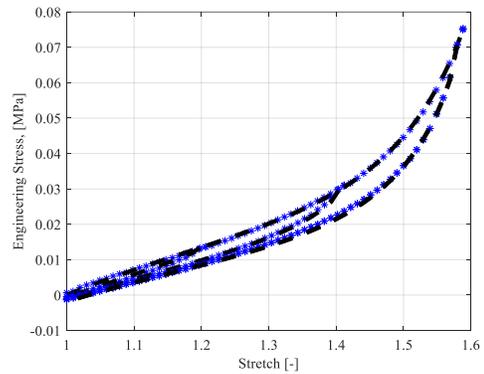
b) **Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0631$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3440$ ,  $A2 = -0.4456$ ,  $N = 1.4399$ ,  
 $b = 0.49$ ,  $c = 18.6$



c) **Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0626$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3383$ ,  $A2 = -0.4398$ ,  $N = 1.4390$ ,  
 $b = 0.47$ ,  $c = 18.9$



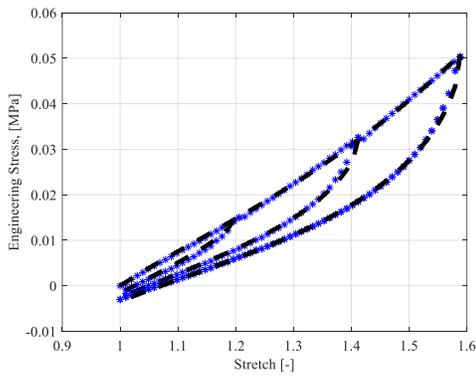
d) **Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0630$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3254$ ,  $A2 = -0.5212$ ,  $N = 1.4416$ ,  
 $b = 0.45$ ,  $c = 19$



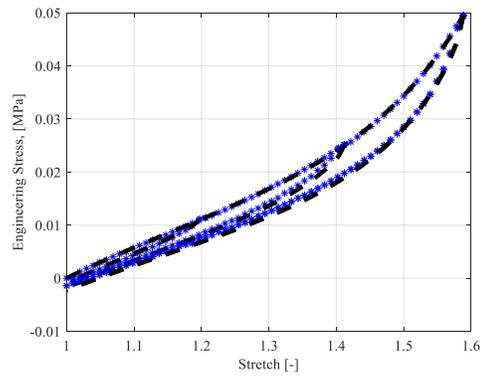
e) **Corrida 6**, valores de:  $\mu = 0.0623$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3174$ ,  $A2 = -0.5132$ ,  $N = 1.4405$ ,  
 $b = 0.46$ ,  $c = 18.8$

Fig. 31. Curvas de energía de deformación de probeta 45\_5050 anisotrópica con 50% de nanopartículas y 50% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

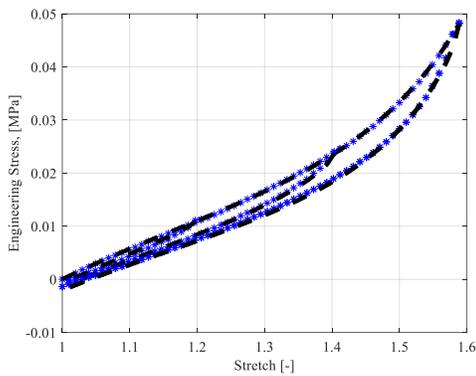
## 5.8 Curvas de energía de deformación Probeta 45\_5050\_ISO



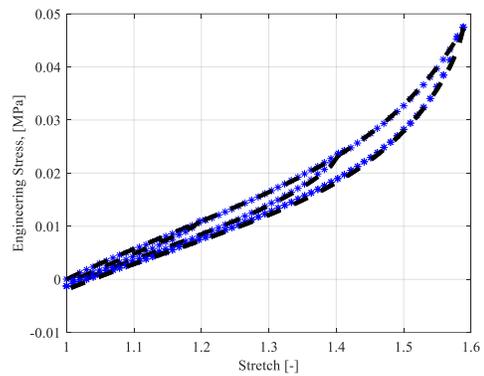
a) **Corrida 1**, valores de:  $\mu = 0.0722$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.6003$ ,  $A2 = 0.4719$ ,  $N = 9.9826$   
 $b = 0.8$ ,  $c = 9$



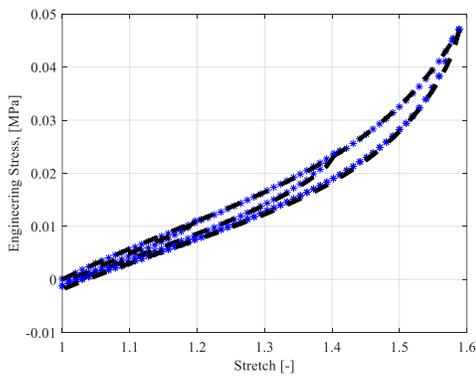
b) **Corrida 2**, valores de:  $\mu = 0.055$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3193$ ,  $A2 = -0.1942$ ,  $N = 1.5729$   
 $b = 0.4$ ,  $c = 14$



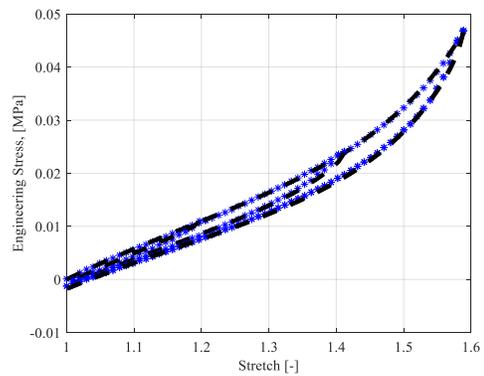
b) **Corrida 3**, valores de:  $\mu = 0.0546$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3139$ ,  $A2 = -0.2386$ ,  $N = 1.5679$   
 $b = 0.34$ ,  $c = 16$



c) **Corrida 4**, valores de:  $\mu = 0.0541$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3079$ ,  $A2 = 0.2577$ ,  $N = 1.5658$   
 $b = 0.33$ ,  $c = 17$



d) **Corrida 5**, valores de:  $\mu = 0.0541$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3053$ ,  $A2 = -0.2701$ ,  $N = 1.5669$ ,  
 $b = 0.32$ ,  $c = 18$



e) **Corrida 6** valores de:  $\mu = 0.0540$ ,  $f = 0.0945$ ,  
 $A1 = -0.3052$ ,  $A2 = -0.2723$ ,  $N = 1.5680$ ,  
 $b = 0.31$ ,  $c = 19$

Fig. 32. Curvas de energía de deformación de probeta 45\_5050 isotrópica con 50% de nanopartículas y 50% de micropartículas. a) Corrida 2 a 0 mT, b) Corrida 3 a 11.1 mT, c) Corrida 4 a 26.3 mT, d) Corrida 5 a 39.5 mT, e) Corrida 6 a 52.2 mT.

A partir de los resultados anteriores es posible observar la influencia el campo magnético en cada una de las muestras. Se ha podido observar que en los materiales con presencia de nanopartículas no se observa un cambio en el compartamiento mecánico del material, que si se puede observar en las partículas que tienen sólo micropartículas y se manifiesta aún más el efecto magnetorreológico en donde las partículas están alineadas. Las tablas 5 a 10 se muestran cada uno de los parámetros del modelo constitutivo del material y se puede apreciar la evolución de estos parámetros conforme se incrementa el campo magnético que se aplica.

Tabla 5. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_0100 Anisotrópica.

	Corrida	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A <sub>1</sub> (MPa)	A <sub>2</sub> (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
45_0100_ANI	1	0.0384	0.0945	-0.1204	0.4994	79.9997	1	7
	2	0.0394	0.0945	-0.2393	-0.1345	1.9752	0.18	22
	3	0.0391	0.0945	-0.2353	-0.1389	1.9556	0.16	22.4
	4	0.0393	0.0945	-0.2360	-0.1404	1.9611	0.15	22.6
	5	0.0396	0.0945	-0.2354	-0.1546	1.9385	0.16	22.7
	6	0.0396	0.0945	-0.2240	-0.1859	1.8971	0.17	22.8

Tabla 6. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_0100 Isotrópica.

	# CORRIDA	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
45_0100_ISO	Corrida 1	0.0602	0.0945	-0.4348	0.4997	1.9968	1	9
	Corrida 2	0.0473	0.0945	-0.2592	-0.4616	1.4567	0.3	16
	Corrida 3	0.0468	0.0945	-0.2483	-0.4942	1.4581	0.29	16.4
	Corrida 4	0.0466	0.0945	-0.2335	-0.5312	1.4577	0.28	16.5
	Corrida 5	0.0489	0.0945	-0.2600	-0.5550	1.4633	0.27	16.7
	Corrida 6	0.0522	0.0945	-0.2123	-0.8379	1.4561	0.31	12

Tabla 7. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_2575 Anisotrópica.

	# CORRIDA	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
45_2575_ANI	Corrida 1	0.1551	0.0945	-1.4308	-1.0425	1.5622	0.7	12.5
	Corrida 2	0.0646	0.0945	-0.3655	-0.4114	1.4408	0.5	14.5
	Corrida 3	0.0631	0.0945	-0.3340	-0.4456	1.4399	0.52	14.8
	Corrida 4	0.0626	0.0945	-0.3388	-0.4398	1.4390	0.51	15.1
	Corrida 5	0.0630	0.0945	-0.3254	-0.5212	1.4416	0.48	15.4
	Corrida 6	0.0623	0.0945	-0.3174	-0.5232	1.4405	0.47	15.5

Tabla 8. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_2575 Isotrópica.

45_2575_ISO	# CORRIDA	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
	Corrida 1	0	0	0	0	0	0	0
	Corrida 2	0.0523	0.0945	-0.2021	0.3773	0.4341	0.2	18
	Corrida 3	0.0523	0.0945	-0.2036	0.3834	0.4488	0.21	18.2
	Corrida 4	0.0525	0.0945	-0.2045	0.3827	0.4417	0.22	18.3
	Corrida 5	0.0526	0.0945	-0.2059	0.3868	0.4474	0.23	18.4
	Corrida 6	0.0531	0.0945	-0.2074	0.4072	0.5272	0.19	19.2

Tabla 9. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_5050 Anisotrópica.

45_5050_ANI	# CORRIDA	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
	Corrida 1	0	0	0	0	0	0	0
	Corrida 2	0.0646	0.0945	-0.3655	-0.4114	1.4408	0.5	18.5
	Corrida 3	0.0631	0.0945	-0.3440	-0.4456	1.4399	0.49	18.6
	Corrida 4	0.0626	0.0945	0-0.3383	-0.4398	1.4390	0.47	18.9
	Corrida 5	0.0630	0.0945	-0.3254	-0.5212	1.4416	0.45	19
	Corrida 6	0.0623	0.0945	-0.3174	-0.5132	1.4405	0.46	18.8

Tabla 10. Constantes de material y valores de ajuste para los datos experimentales cíclicos adaptados al modelo para predecir el Efecto de Mullins en probeta 45\_5050 Isotrópica.

45_5050_ISO	# CORRIDA	$\mu$ (Mpa)	F (-)	A1 (MPa)	A2 (MPa)	N	b (-)	c (Mpa)
	Corrida 1	0.0722	0.0945	-0.6003	0.4719	94.9826	0.8	9
	Corrida 2	0.055	0.945	-0.3193	-0.1942	1.5729	0.4	14
	Corrida 3	0.0546	0.945	-0.3139	-0.2386	1.5679	0.34	16
	Corrida 4	0.0541	0.0945	-0.3079	-0.2577	1.5658	0.33	17
	Corrida 5	0.0541	0.0945	-0.3053	-0.2701	1.5569	0.32	18
	Corrida 6	0.0540	0.0945	-0.3052	-0.2723	1.568	0.31	

## 5.9 Capacidad de disipación de energía.

El área encerrada entre las curvas representa la energía disipada por histéresis, dicha energía disipada está asociada al fenómeno de histéresis donde una región del material es intervenida por un campo magnético donde debido a los campos magnéticos anteriores la energía ya no se puede recuperar.

En la Figura 33, se muestra un ciclo de carga y descarga para el material 45\_0100\_ANI, la línea azul nos indica la carga primaria máxima alcanzada y la línea roja la descarga del punto de la tensión máxima alcanzada al inicio de la carga.

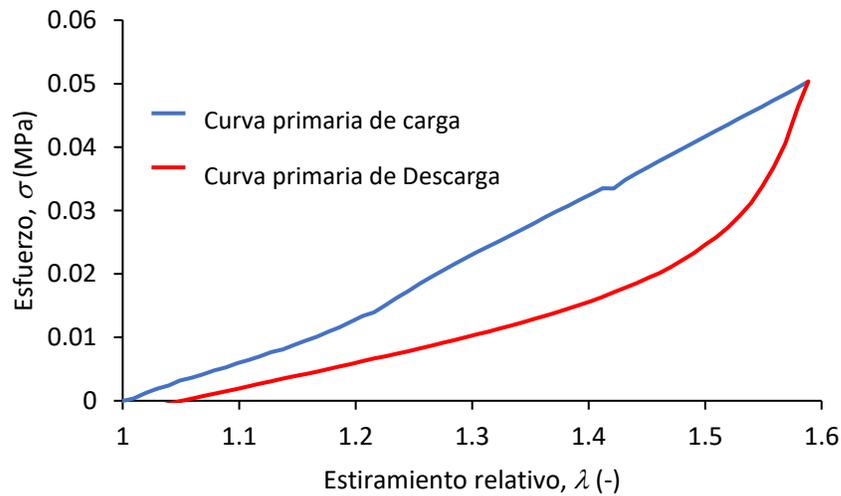


Fig. 33 Representación gráfica la carga y descarga máxima.

La Figura 34 muestra el área entre las curvas de carga y descarga que representa la energía disipada durante el proceso. Esta área está definida por el área bajo la curva de carga menos el área bajo la curva de descarga. Considerando que se cuenta con curvas experimentales discretas, el cálculo de la energía disipada por el material se calculará con la sumatoria de las áreas trapezoidales que están por debajo de la curva de carga (azul) menos la sumatoria de las áreas de la curva de descarga (roja).

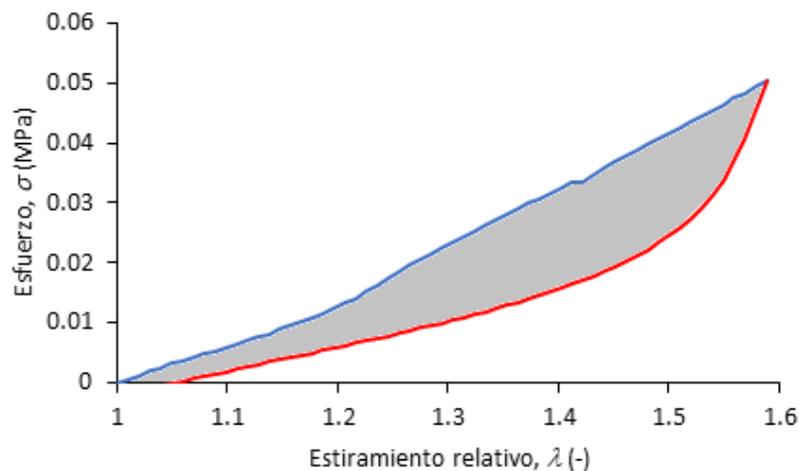


Fig. 34 Energía disipada total.

Los valores de la energía disipada para cada uno de los materiales están definidos por los valores experimentales de las curvas de carga y descarga máxima para cada uno de los materiales y se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Energía disipada por el material durante el proceso de carga y descarga.

Material	Corrida	Absorción de energía (J)
45_5050_ISO	Corrida 2	2.3
	Corrida 3	2.1
	Corrida 4	2.0
	Corrida 5	1.9
	Corrida 6	1.9
45_5050_ANI	Corrida 2	4.7
	Corrida 3	3.3
	Corrida 4	3.9
	Corrida 5	3.9
	Corrida 6	3.7
45_2575_ISO	Corrida 2	1.3
	Corrida 3	1.5
	Corrida 4	1.5
	Corrida 5	1.5
	Corrida 6	1.4
45_2575_ANI	Corrida 2	3.5
	Corrida 3	2.8
	Corrida 4	3.6
	Corrida 5	3.6
	Corrida 6	3.0
45_0100_ISO	Corrida 2	1.0
	Corrida 3	0.8
	Corrida 4	1.0
	Corrida 5	1.0
	Corrida 6	1.1
45_0100_ANI	Corrida 2	1.7
	Corrida 3	1.5
	Corrida 4	1.6
	Corrida 5	1.9
	Corrida 6	2.4

A partir de la Tabla 11 y la Figura 35 podemos observar cómo las nanopartículas incrementan de forma sensible la cantidad de energía absorbida por el material, pero sin tener aumento alguno durante la aplicación de un campo magnético. Por el contrario, las muestras que contienen sólo micropartículas incrementan su absorción de energía cuando se incrementa la intensidad del campo magnético, sin dejar de observar que esto ocurre en valores de energía menores.

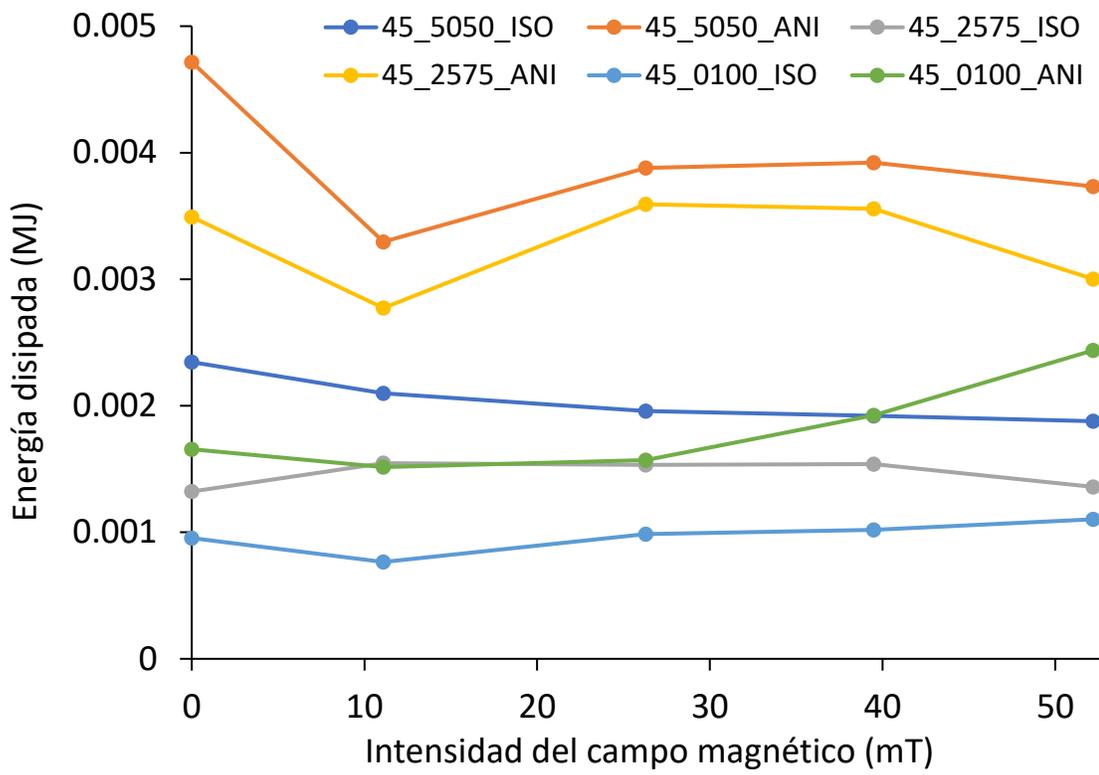


Fig. 35 Energía disipada para cada valor de campo magnético.

## Conclusiones

Los datos experimentales obtenidos de las pruebas mecánicas realizadas a los elastómeros magnetorreológicos (MRE) isotrópicos y anisotrópicos, reforzados con micro y nano partículas de carbonilo de hierro (CIP), se emplearon para caracterizar el efecto de Mullins a través del modelo constitutivo del material. Se ha podido determinar que, en general, la adición de nanopartículas de hierro mejora las propiedades mecánicas de los MRE.

La energía disipada en los ciclos de carga y descarga fue evaluada y se pudo observar la influencia del porcentaje en peso de la cantidad de CIP agregada a la matriz del elastómero en las muestras isotrópicas y anisotrópicas. Se ha observado que cuando aumenta el porcentaje en peso de CIP en el material, la capacidad del material anisotrópico de disipar energía también aumenta.

Se ha demostrado que, para las muestras anisotrópicas con adición de nanopartículas de hierro (CIP) como refuerzo en matrices con mayor dureza exhiben un módulo de rigidez mayor que las isotrópicas.

Además, se ha podido observar que el elastómero NH24 presenta los mejores valores para las deformaciones residuales y la energía disipada. Además, es posible concluir que la energía disipada durante los ciclos de carga y descarga se incrementa cuando el contenido de partículas magnéticas aumenta.

En las muestras que contienen la combinación de partículas de refuerzo nanométricas y micrométricas, se obtuvo que para las probetas anisotrópicas se tiene una mayor disipación de energía en comparación con las isotrópicas. Particularmente, en las probetas anisotrópicas con 50% de nanopartículas y 50% de micropartículas se obtiene el mayor efecto de Mullins y disipación de energía.

El modelar el efecto de Mullins permite cuantificar las propiedades físicas y mecánicas en el material cuando es sometido a cargas cíclicas. Lo anterior permite mejores diseños y aplicación de este tipo de materiales en sus aplicaciones en la industria automotriz, textil y en sistemas biomédicos.

## Referencias

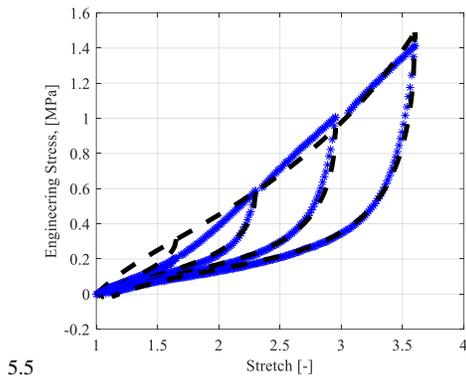
- [1] B. Mordina , R. K. Tiwari, D. K. Setua y A. Sharma, «Magnetorheology of polydimethylsiloxane,» *American Chemical Society*, p. 44, (2014).
- [2] A. Boczkowska, S. F. Awietjan, S. Pietrzko, S. Pietrzko, K. J. Kurzydłowski, A. Boczkowska, S. F. Awietjan, S. Pietrzko y K. J. Ku, «Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation,» *Science Direct*, vol. Parte B, n° 43, p. 636, (2012).
- [3] R. Castro Herreros, *Caracterización del Comportamiento Axial de Elastómeros Magnetorreológicos*, Santiago de Chile, (2014).
- [4] O. Philippova, A. Barabanova, V. Molchanov y A. Khokhlov, «Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation,» *ScienceDirect*, vol. 43, n° Parte B, pp. 636-640, (2012).
- [5] I. A. Perales Martínez, L. M. Palacios Pineda y I. M. Lozano Sanchez, «Enhancement of a magnetorheological PDMS elastomer with carbonyl,» *Polymer Testing*, n° 57, pp. 78-86, (2017).
- [6] J. Feng, Z. Yaqiong, W. Zhongkai, W. Wentao, Z. Xu y Z. Wang, «Combination of Magnetic and Enhanced Mechanical Properties for Copolymer-Grafted Magnetite Composite Thermoplastic Elastomers,» *ACS Publicación*, pp. 7-19, (2015).
- [7] L. M. Palacios Pineda, I. A. Perales Martínez, L. M. Lozano Sanchez, O. Martinez Romero, J. Puente Córdova, E. Segura Cárdenas y A. Elías Zuñiga, «Experimental Investigation of the Magnetorheological Behavior of PDMS Elastomer Reinforced with Iron Micro/Nanoparticles,» *Polymers*, n° 696, p. 12, (2017).
- [8] «Investigating the Mullins Effect and Energy Dissipation in Magnetorheological Polyurethane Elastomers,» *International Journal of Materials Science*, vol. 21, p. 15, (2020).
- [9] C. G. Soria Hernández, L. M. Palacios Pineda y A. E. Zúñiga Imperio , «Investigation of the Effect of Carbonyl Iron Micro-Particles on the Mechanical and Rheological Properties of Isotropic and Anisotropic MREs: Constitutive Magneto-Mechanical Material Model,» *Polymers*, vol. 11, n° 1705, p. 10, (2019).
- [10] O. Ashour, C. A. Rogers y W. Kordonsky, «Magnetorheological fluids: Materials, characterization, and devices,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 7, n° 2, pp. 123-130., (1996).
- [11] A. B. a. A. Spaggiari, «Magneto-mechanical characterization of magnetorheological elastomers,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, p. 10, (2019).
- [12] H. Y. Hong W y F. LE, «Field-stiffening effect of magneto-rheological elastomers.,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, p. 2281–2288., (2013).

- [13] Y. Larios Perea, *Ensayo de fatiga en materiales poliméricos reforzados con nanopartículas mediante vibraciones mecánicas*, Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Industrial, (2011).
- [14] R. G. Nisbett y K. J., *Diseño en Ingeniería Mecánica*. (Novena edición), México DF: McGraw-Hill, (2008).
- [15] J. B. Beltran Fernández, *Análisis de mecánica de la fractura en materiales polímeros.*, México, DF.: Instituto Politecnico Nacional., (2002).
- [16] M. Miñano Nuñez, *Modelado Computacional del daño en Materiales blandos.*, Madrid, España.: Universidad Politecnica de Madrid, (2016).
- [17] L. Mullins, *Effect of Stretching on the properties of rubber.*, (1948).
- [18] A. R. Tobajas, *Desarrollo de modelos de fatiga para materiales elastómeros. Aplicación a componentes de automoción.*, Universidad de Zaragoza, (2019).
- [19] A. B. Arauz Solís, *Desarrollo de materiales inteligentes, con propiedades magnetoreológicas*, Saltillo, Coahuila: CIQA, (2008).
- [20] L. K. H., L. C. y L. C. H., «Friction and wear characteristics of magneto-rheological elastomers based on silicone/polyurethane hybrid.,» *Journal of Tribology*, vol. 3, n° 031607, p. 137, (2015).
- [21] G. Córdova Jesús, Reyes Melo M. Edgar, Palacios-Pineda Luis M. <<*Fabrication and Characterization of Isotropic and Anisotropic Magnetorheological Elastomers, Based on Silicone Rubber and Carbonyl Iron Microparticles*>> *Polymers*, n° 696, p. 13, (2018).

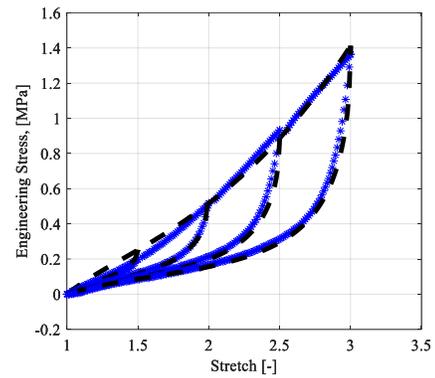
## **Anexo**

En este Anexo se presentan las caracterizaciones completas realizadas a los diferentes materiales que fueron analizados en el presente trabajo. Se muestra la correspondencia entre los datos experimentales con el modelo propuesto.

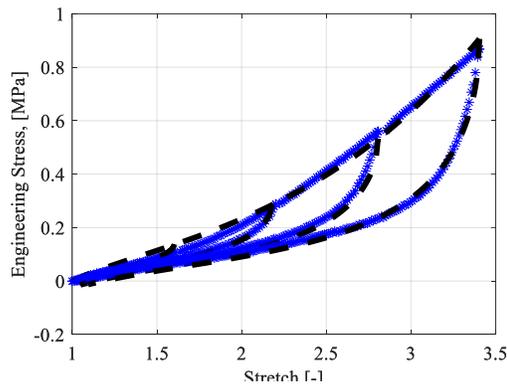
## Curvas de energía de deformación para las muestras MSO4, NSO4 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24 por método iterativo sin ecuación de pendiente.



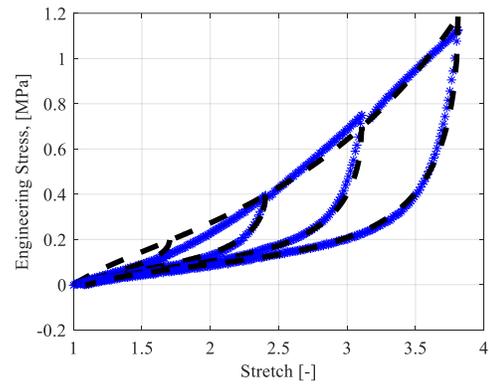
Muestra MSO4 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 1.1910$ ,  $f = 0.8023$ ,  $A1 = 0.0112$ ,  $A2 = 0.0289$ ,  
 $N = 9.9588$ ,  $b = 0.6$ ,  $c = 30$ .



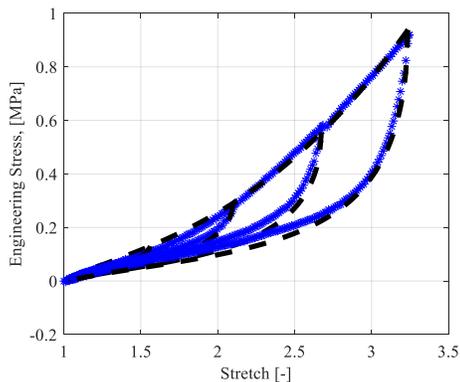
Muestra NSO4 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = -0.0259$ ,  $f = 4.7422$ ,  $A1 = 0.0389$ ,  $A2 = 0.0183$ ,  
 $N = 9.9472$ ,  $b = 0.80$ ,  $c = 5$ .



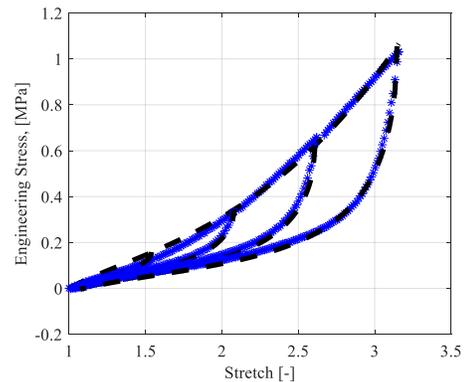
Muestra MS24 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.7362$ ,  $f = 0.8050$ ,  $A1 = -0.0699$ ,  $A2 = 0.0409$ ,  
 $N = 9.9938$ ,  $b = 0.5$ ,  $c = 40$ .



Muestra NS24 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.1176$ ,  $f = -0.1572$ ,  $A1 = -0.0183$ ,  $A2 = -0.1474$ ,  
 $N = 10.0730$ ,  $b = 0.6$ ,  $c = 7$ .



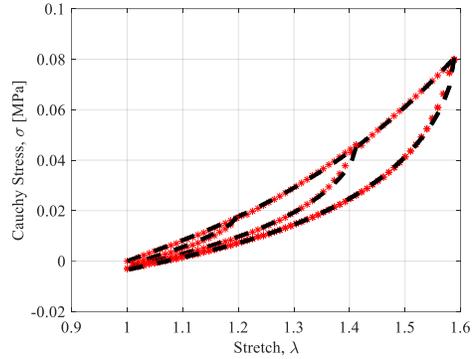
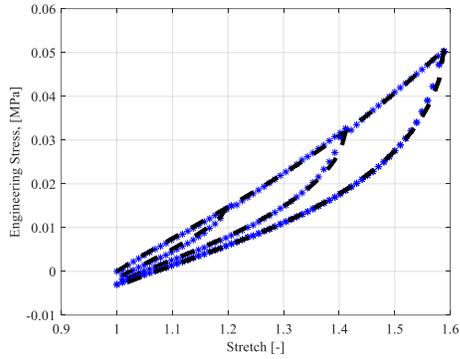
Muestra MH04 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.0222$ ,  $f = 3.3553$ ,  $A1 = 0.0645$ ,  $A2 = 0.0177$ ,  
 $N = 11.3870$ ,  $b = 0.5$ ,  $c = 30$ .



Muestra NH04 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.2018$ ,  $f = -0.1031$ ,  $A1 = 1.2880$ ,  $A2 = -0.5179$ ,  
 $N = 9.9883$ ,  $b = 0.65$ ,  $c = 10$ .

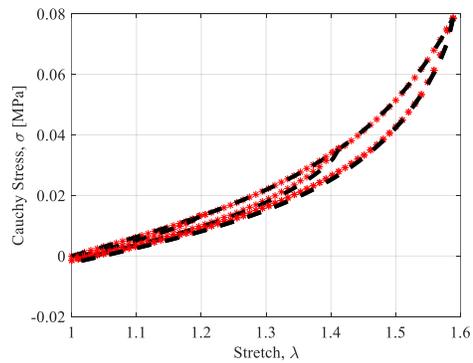
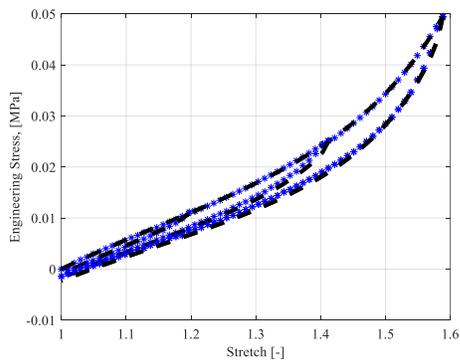
## Graficas 45\_5050\_ISO

### Corrida 1



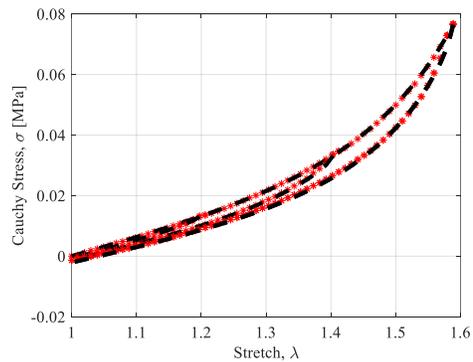
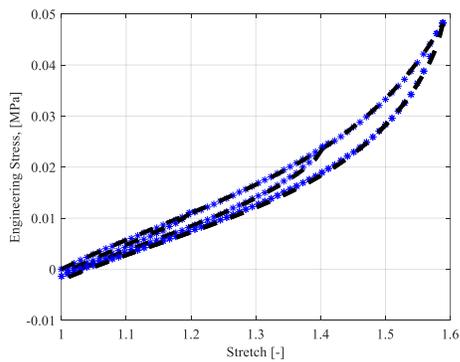
MIU=0.095;  
 f=1.09445;  
 A1=0.9193;  
 A2=0.1682;  
 N=3.5729;  
 b=0.98;  
 c=16;

### Corrida 2



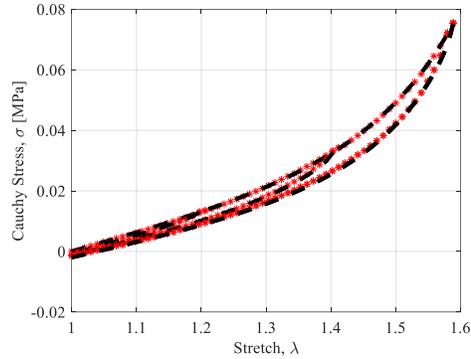
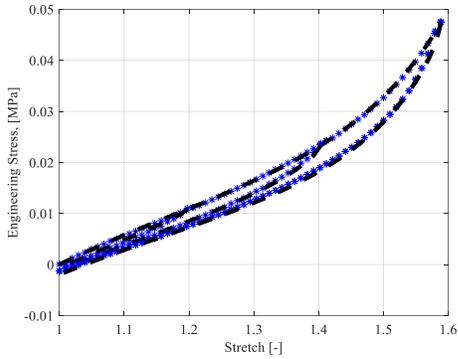
MIU=0.055;  
 f=0.09445;  
 A1=-0.3193;  
 A2=-0.1942;  
 N=1.5729;  
 b=0.4;  
 c=14;

### Corrida 3



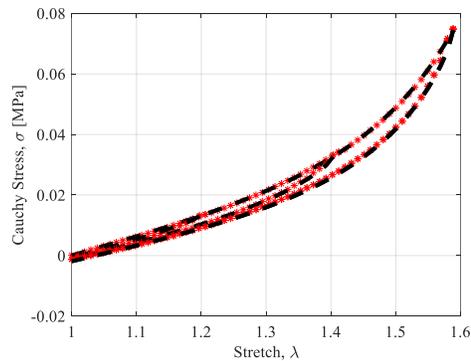
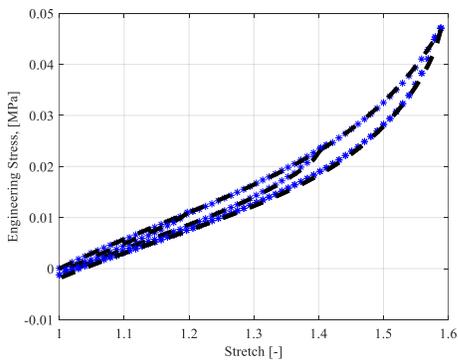
MIU=0.0546;  
 f=0.09445;  
 A1=-0.3139;  
 A2=-0.2386;  
 N=1.5679;  
 b=0.34;  
 c=16;

Corrida 4



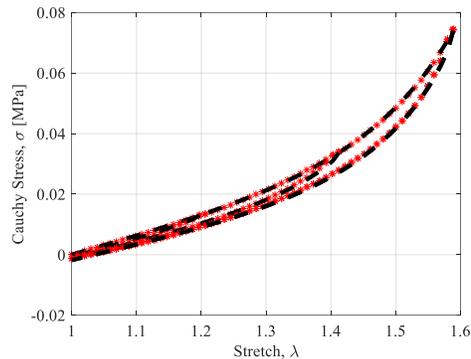
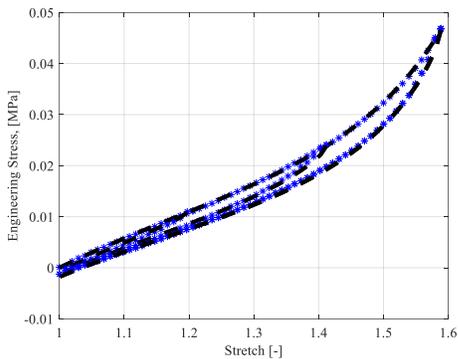
MIU=0.0541;  
 f=0.09445;  
 A1=-0.3079;  
 A2=-0.2577;  
 N=1.5658;  
 b=0.33;  
 c=17;

Corrida 5



MIU=0.0541;  
 f=0.09445;  
 A1=-0.3053;  
 A2=-0.2701;  
 N=1.5669;  
 b=0.32;  
 c=18;

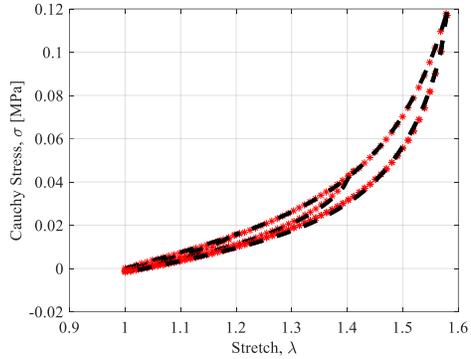
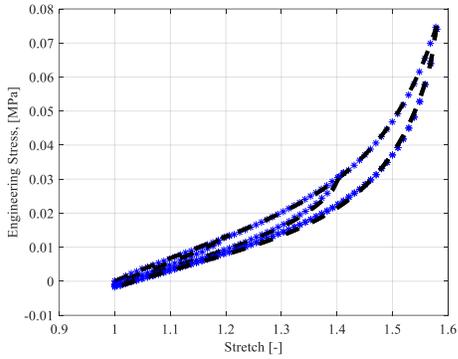
Corrida 6



MIU=0.0540;  
 f=0.09445;  
 A1=-0.3052;  
 A2=-0.2723;  
 N=1.5680;  
 b=0.31;  
 c=19;

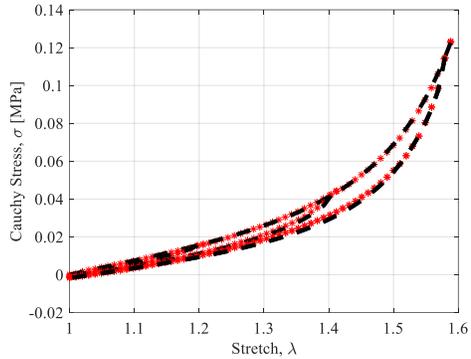
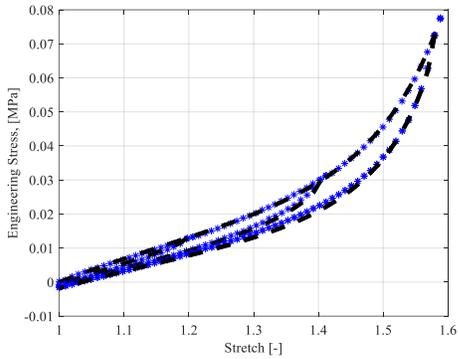
**Graficas 45\_5050\_ANI**

**Corrida 2**



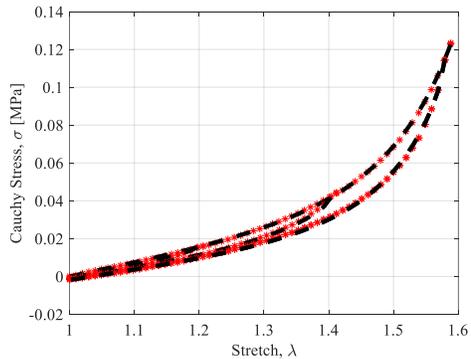
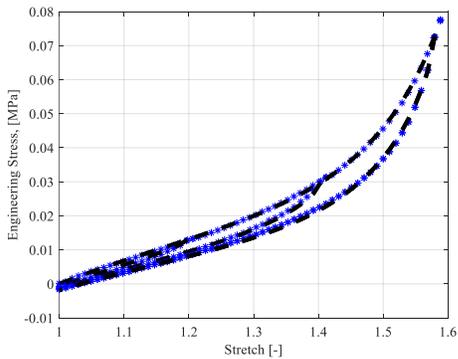
MIU=0.0646;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3655;  
 A2=-0.4114;  
 N=1.4408;  
 b=0.5;  
 c=18.5;

**Corrida 3**



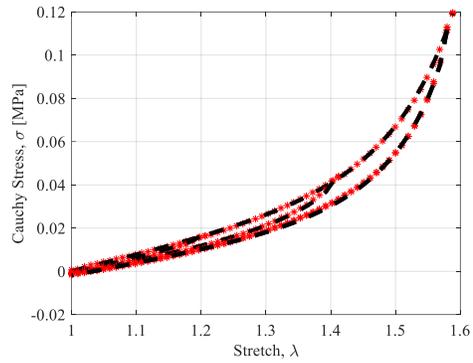
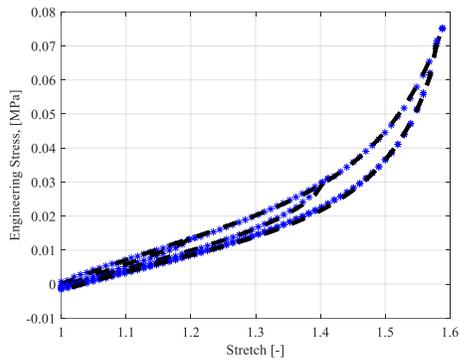
MIU=0.0631;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3440;  
 A2=-0.4456;  
 N=1.4399;  
 b=0.49;  
 c=18.6;

**Corrida 4**



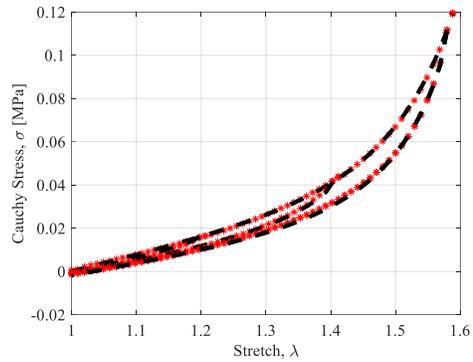
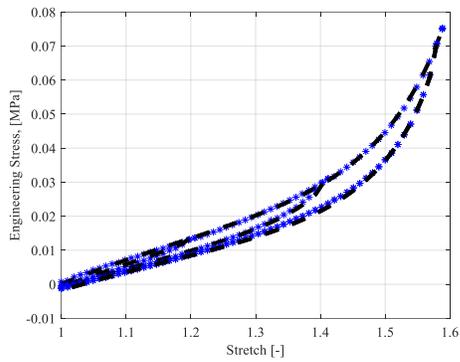
MIU=0.0626;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3383;  
 A2=-0.4398;  
 N=1.4390;  
 b=0.47;  
 c=18.9;

Corrida 5



MIU=0.0630;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3254;  
 A2=-0.5212;  
 N=1.4416;  
 b=0.45;  
 c=19;

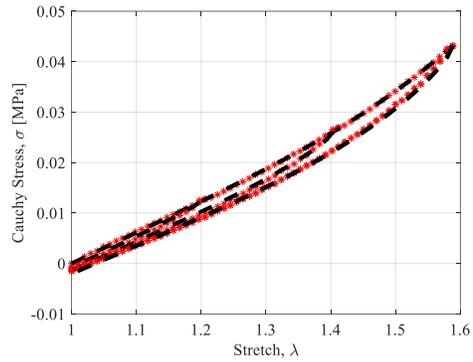
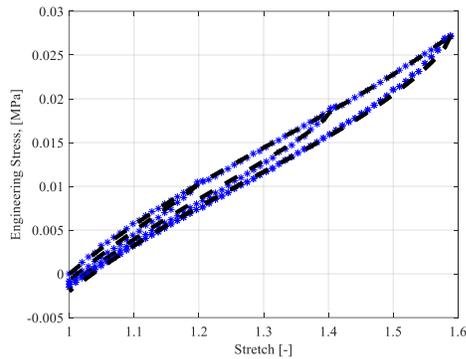
Corrida 6



MIU=0.0623;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3174;  
 A2=-0.5132;  
 N=1.4405;  
 b=0.46;  
 c=18.8;

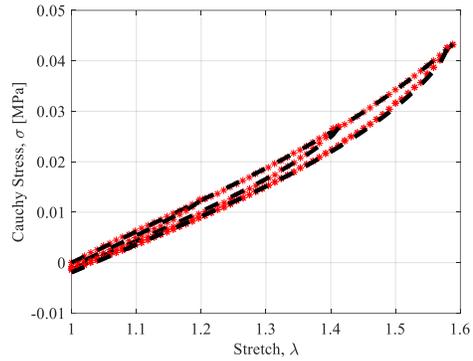
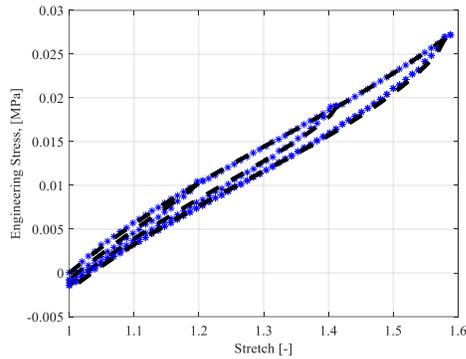
## Graficas 45\_2575\_ISO

### Corrida 2



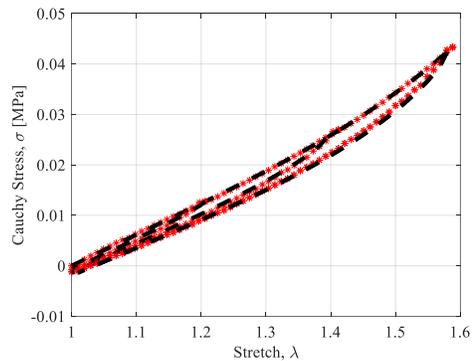
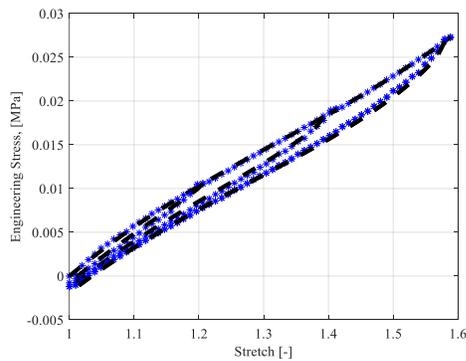
$\text{MIU}=0.0523;$   
 $f=0.09447;$   
 $A1=-0.2021;$   
 $A2=0.3773;$   
 $N=0.4341;$   
 $b=0.2;$   
 $c=18;$

### Corrida 3



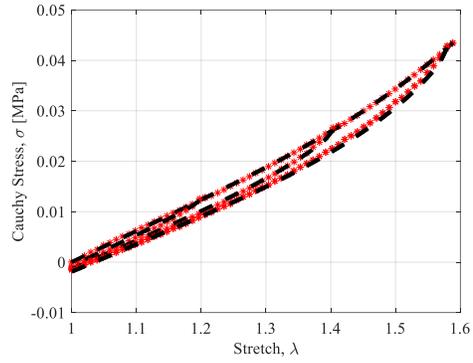
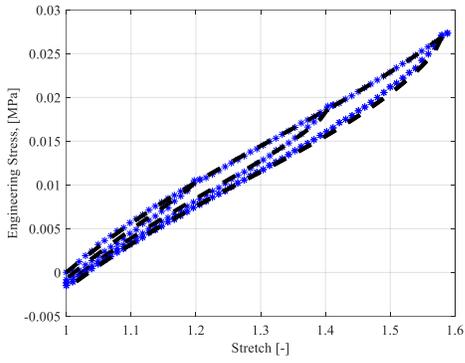
$\text{MIU}=0.0523;$   
 $f=0.09447;$   
 $A1=-0.2036;$   
 $A2=0.3834;$   
 $N=0.4488;$   
 $b=0.21;$   
 $c=18.2;$

### Corrida 4



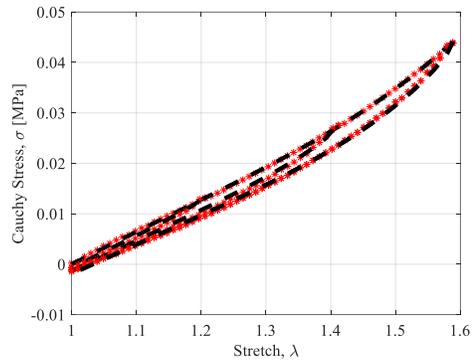
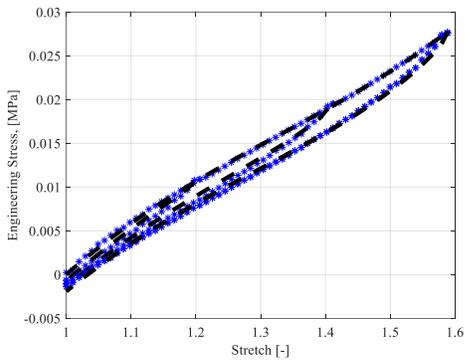
$\text{MIU}=0.0525;$   
 $f=0.09447;$   
 $A1=-0.2045;$   
 $A2=0.3827;$   
 $N=0.4417;$   
 $b=0.22;$   
 $c=18.3;$

Corrida 5



MIU=0.0526;  
 f=0.09447;  
 A1=-0.2059;  
 A2=0.3868;  
 N=0.4474;  
 b=0.23;  
 c=18.4;

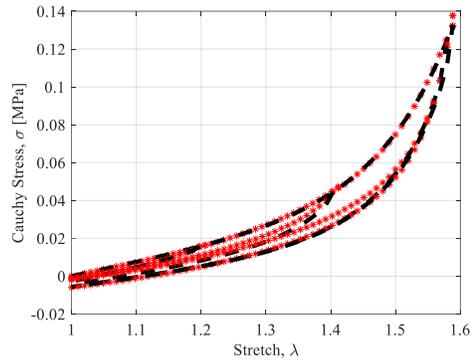
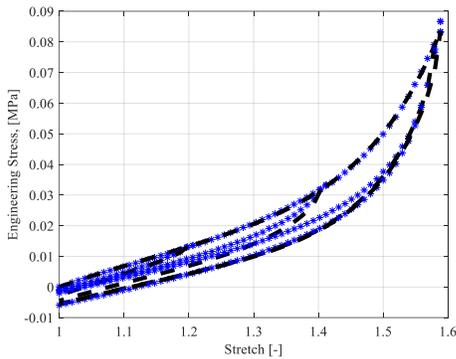
Corrida 6



MIU=0.0531;  
 f=0.09447;  
 A1=-0.2074;  
 A2=0.4072;  
 N=0.5272;  
 b=0.19;  
 c=19.2;

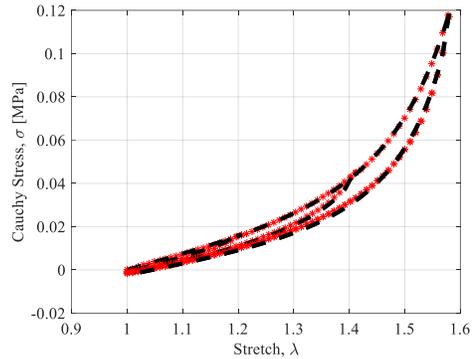
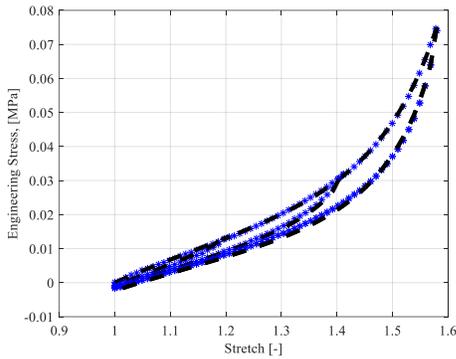
### Graficas 45\_2575\_ANI

#### Corrida 1



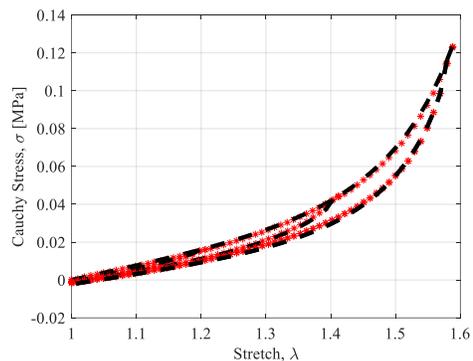
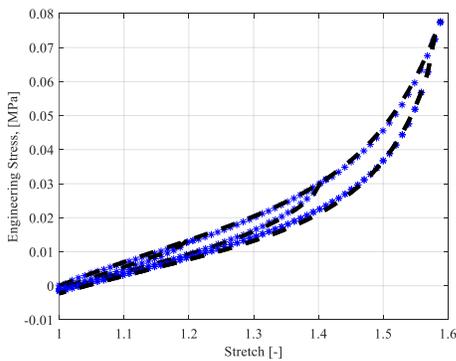
MIU=0.1551;  
 f=0.0945;  
 A1=-1.4308;  
 A2=-1.0425;  
 N=1.5622;  
 b=0.7  
 c=12.5;

#### Corrida 2



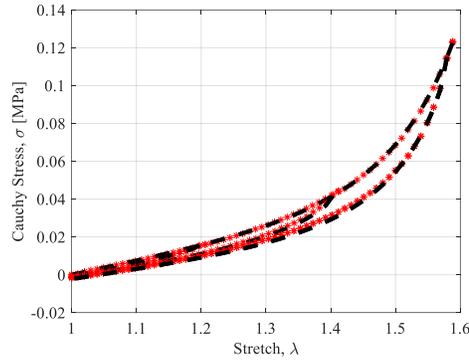
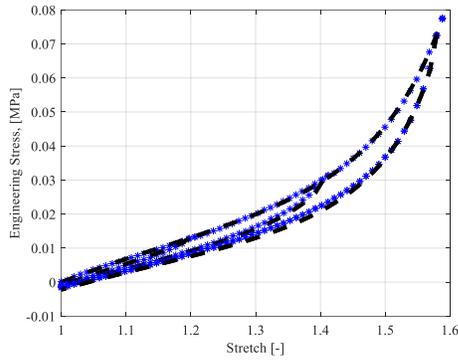
MIU=0.0646;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3655;  
 A2=-0.4114;  
 N=1.4408;  
 b=0.5  
 c=14.5;

#### Corrida 3



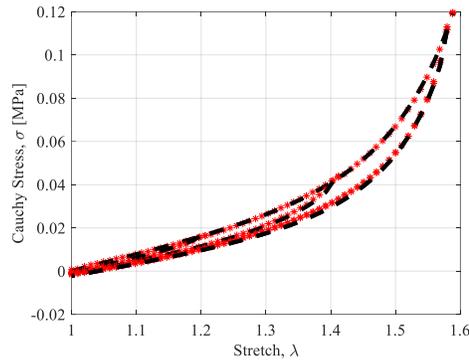
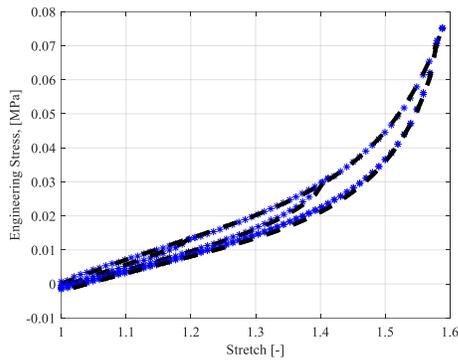
MIU=0.0631;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3340;  
 A2=-0.4456;  
 N=1.4399;  
 b=0.52  
 c=14.8;

Corrida 4



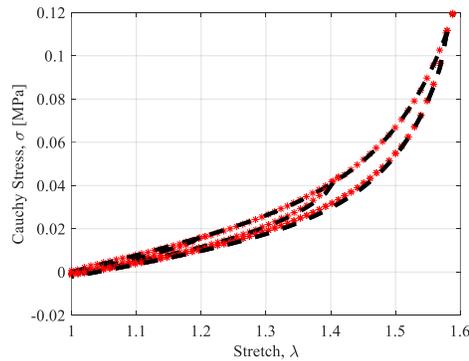
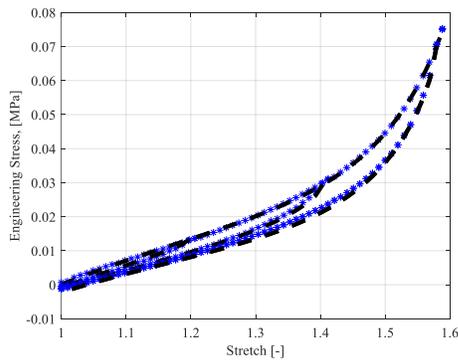
MIU=0.0626;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3388;  
 A2=-0.4398;  
 N=1.4390;  
 b=0.51  
 c=15.1;

Corrida 5



MIU=0.0630;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3254;  
 A2=-0.5212;  
 N=1.4416;  
 b=0.48  
 c=15.4;

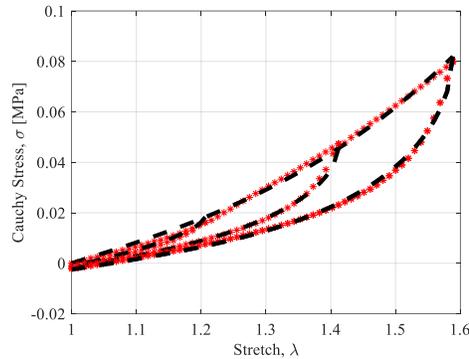
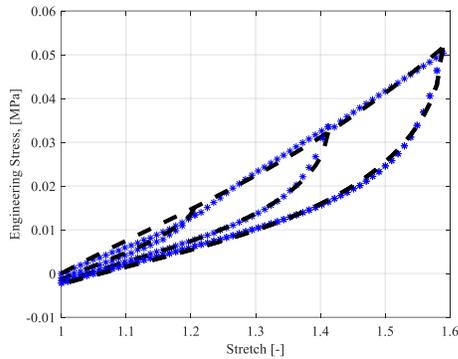
Corrida 6



MIU=0.0623;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.3174;  
 A2=-0.5232;  
 N=1.4405;  
 b=0.47  
 c=15.5;

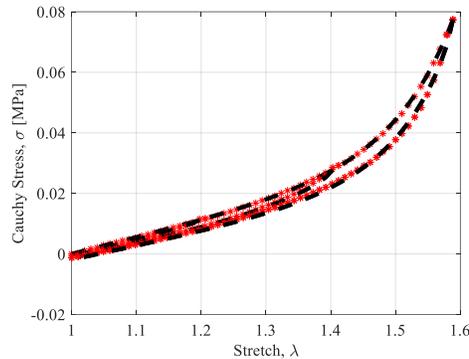
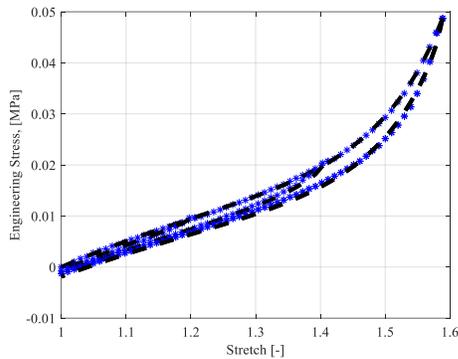
## Graficas 45\_0100\_ISO

### Corrida 1



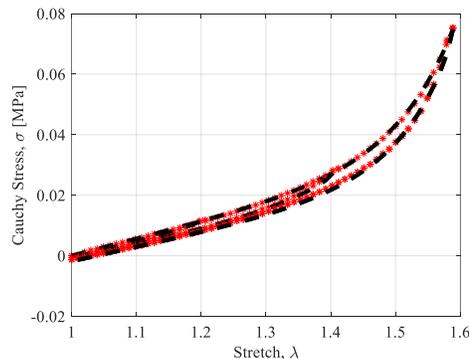
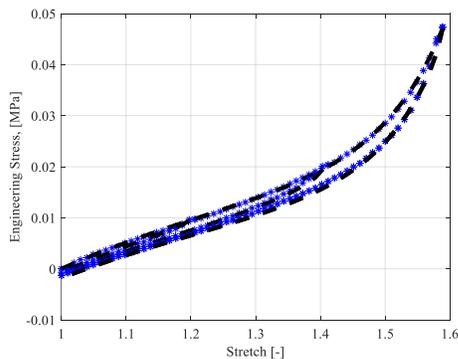
MIU=0.0602;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.4348;  
 A2=0.4997;  
 N=159.9968;  
 b=1;  
 c=9;

### Corrida 2



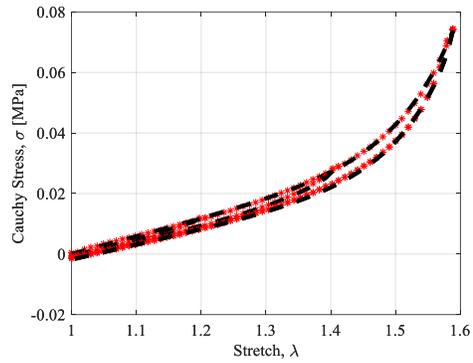
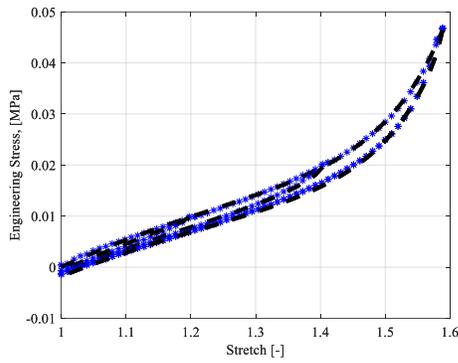
MIU=0.0473;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2592;  
 A2=-0.4616;  
 N=1.4567;  
 b=0.3;  
 c=16;

### Corrida 3



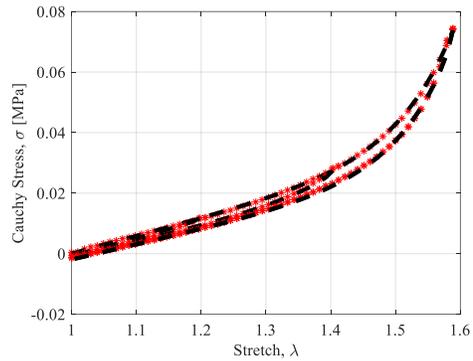
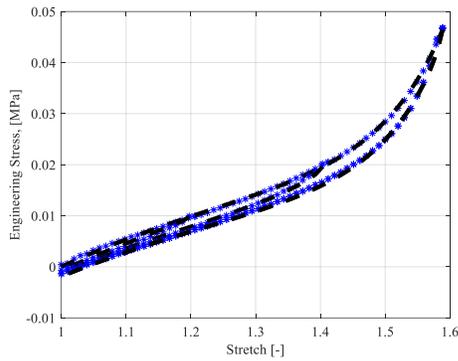
MIU=0.0468;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2483;  
 A2=-0.4942;  
 N=1.4581;  
 b=0.29;  
 c=16.4;

Corrida 4



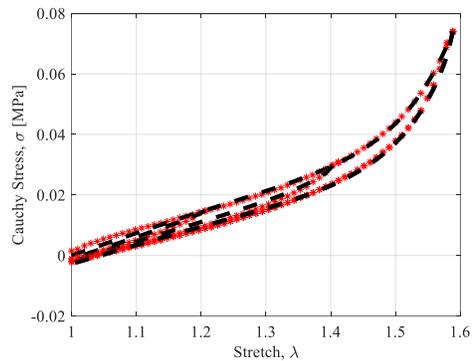
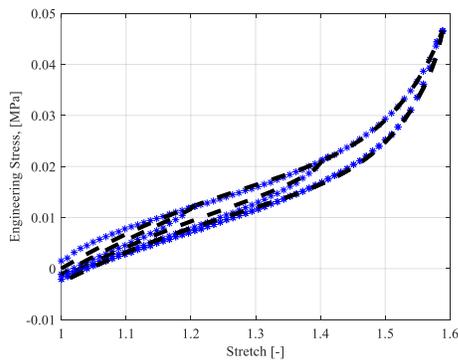
MIU=0.0466;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2335;  
 A2=-0.5312;  
 N=1.4577;  
 b=0.28;  
 c=16.5;

Corrida 5



MIU=0.0489;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2600;  
 A2=-0.5550;  
 N=1.4633;  
 b=0.27;  
 c=16.7;

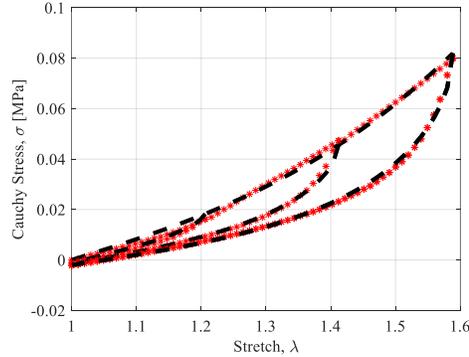
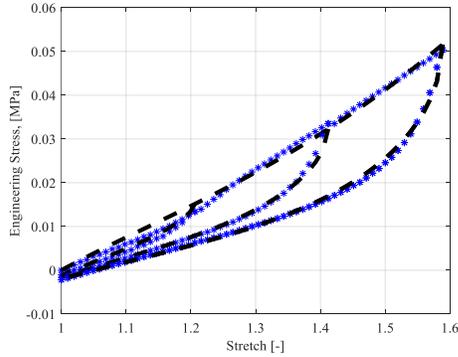
Corrida 6



MIU=0.0522;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2123;  
 A2=-0.8379;  
 N=1.4561;  
 b=0.31;  
 c=12;

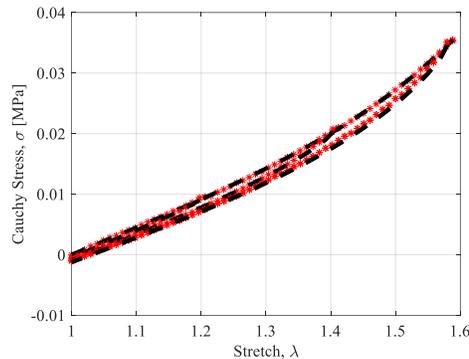
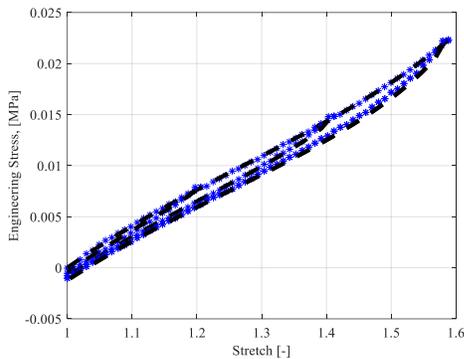
**Graficas 45\_0100\_ANI**

**Corrida 1**



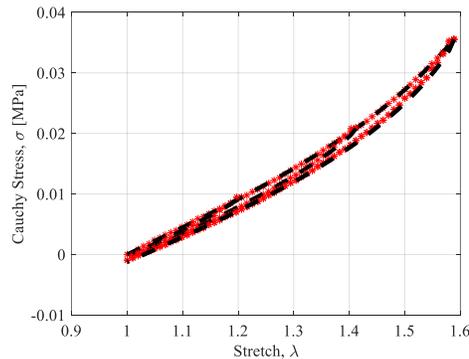
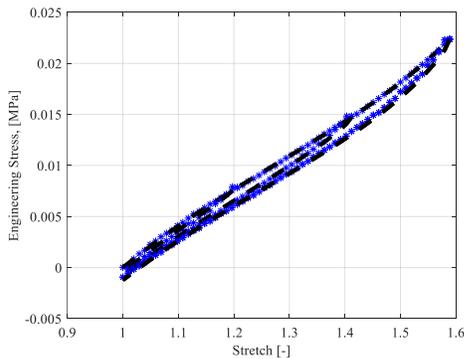
MIU=0.0384;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.1204;  
 A2=0.4994;  
 N=79.9997;  
 b=1;  
 c=7;

**Corrida 2**



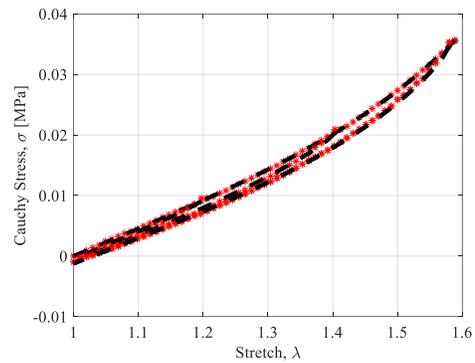
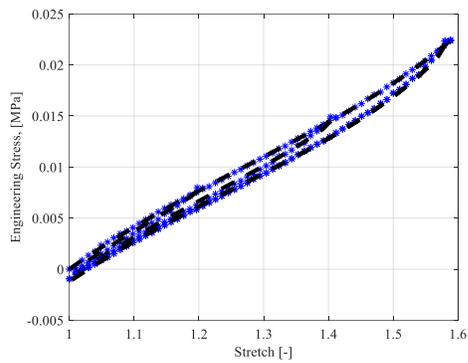
MIU=0.0394;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2393;  
 A2=-0.1345;  
 N=1.9752;  
 b=0.18;  
 c=22;

**Corrida 3**



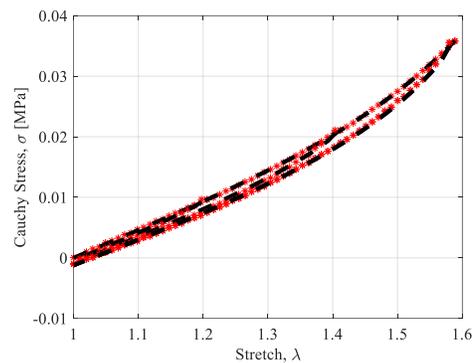
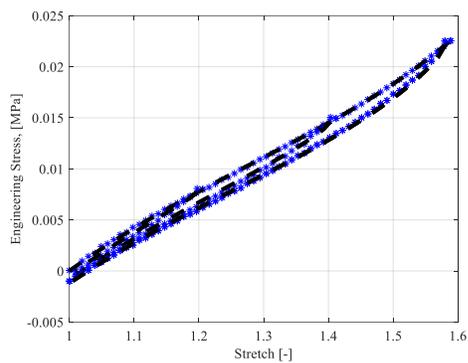
MIU=0.0391;  
 f=0.0945;  
 A1=-0.2353;  
 A2=-0.1389;  
 N=1.9556;  
 b=0.16;  
 c=22.4;

## Corrida 4



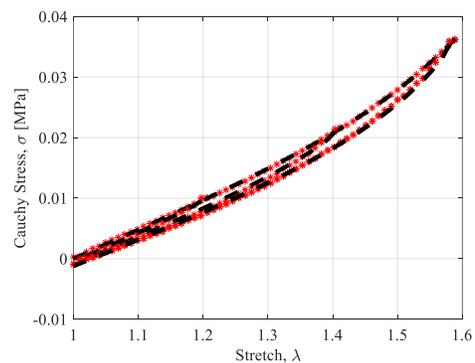
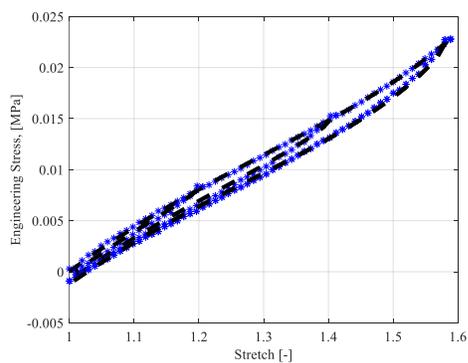
MIU=0.0393;  
 $f=0.0945$ ;  
 $A1=-0.2360$ ;  
 $A2=-0.1404$ ;  
 $N=1.9611$ ;  
 $b=0.15$ ;  
 $c=22.6$ ;

## Corrida 5



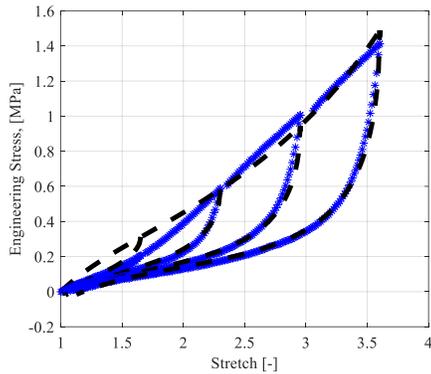
MIU=0.0396;  
 $f=0.0945$ ;  
 $A1=-0.2354$ ;  
 $A2=-0.1546$ ;  
 $N=1.9385$ ;  
 $b=0.16$ ;  
 $c=22.7$ ;

## Corrida 6

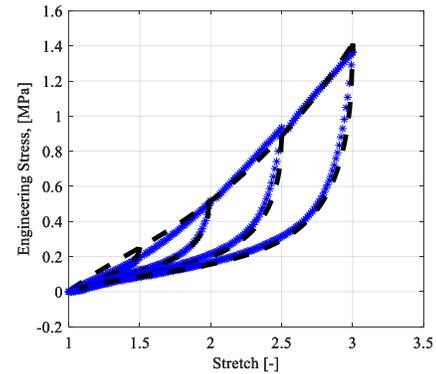


MIU=0.0396;  
 $f=0.0945$ ;  
 $A1=-0.2240$ ;  
 $A2=-0.1859$ ;  
 $N=1.8971$ ;  
 $b=0.17$ ;  
 $c=22.8$ ;

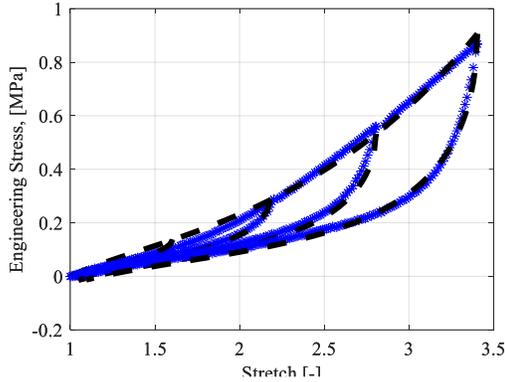
## Curvas de energía de deformación para las muestras MS04, NS04 MS24, NS24, MH04, NH04, MH24 Y NH24 sin ajuste de pendiente.



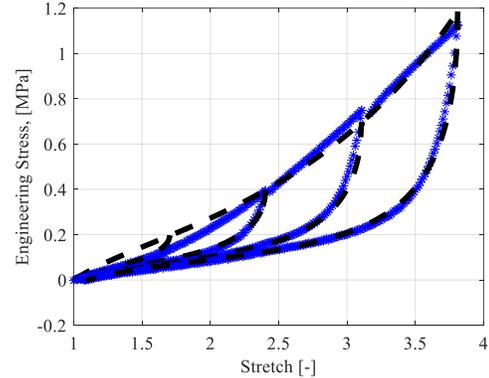
Muestra MS04 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 1.1910$ ,  $f = 0.8023$ ,  $A1 = 0.0112$ ,  $A2 = 0.0289$ ,  
 $N = 9.9588$ ,  $b = 0.6$ ,  $c = 30$ .



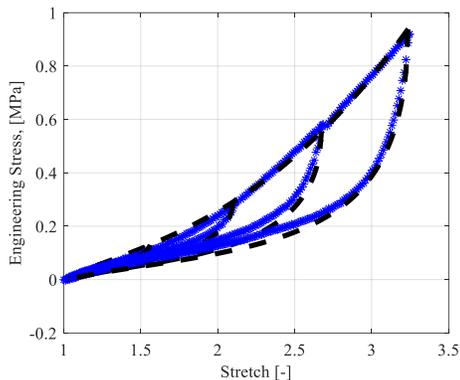
Muestra NS04 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = -0.0259$ ,  $f = 4.7422$ ,  $A1 = 0.0389$ ,  $A2 = 0.0183$ ,  
 $N = 9.9472$ ,  $b = 0.80$ ,  $c = 5$ .



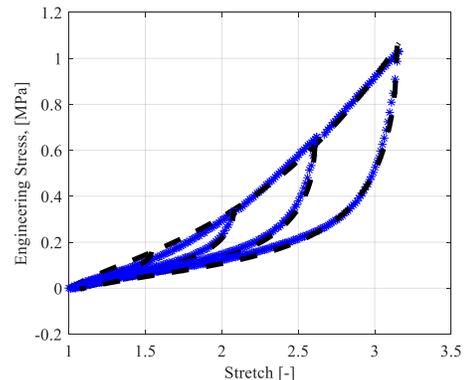
Muestra MS24 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.7362$ ,  $f = 0.8050$ ,  $A1 = -0.0699$ ,  $A2 = 0.0409$ ,  
 $N = 9.9938$ ,  $b = 0.5$ ,  $c = 40$ .



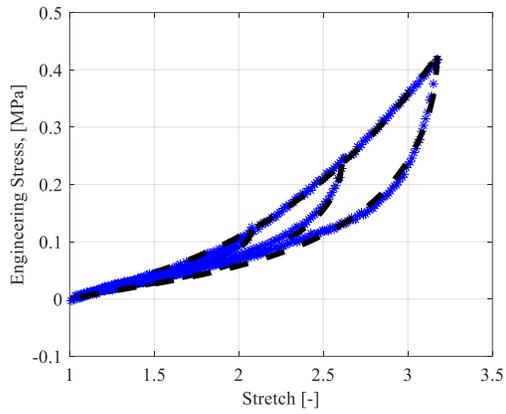
Muestra NS24 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.1176$ ,  $f = -0.1572$ ,  $A1 = -0.0183$ ,  $A2 = -0.1474$ ,  
 $N = 10.0730$ ,  $b = 0.6$ ,  $c = 7$ .



Muestra MH04 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.0222$ ,  $f = 3.3553$ ,  $A1 = 0.0645$ ,  $A2 = 0.0177$ ,  
 $N = 11.3870$ ,  $b = 0.5$ ,  $c = 30$ .



Muestra NH04 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.2018$ ,  $f = -0.1031$ ,  $A1 = 1.2880$ ,  $A2 = -0.5179$ ,  
 $N = 9.9883$ ,  $b = 0.65$ ,  $c = 10$ .



Muestra MH24 con Micropartículas y valores:  
 $\mu = 0.0187$ ,  $f = -1.3262$ ,  $A1 = 0.0051$ ,  $A2 = -0.0203$   
 $N = 10.0160$ ,  $b=0.4$ ,  $c= 40$ .

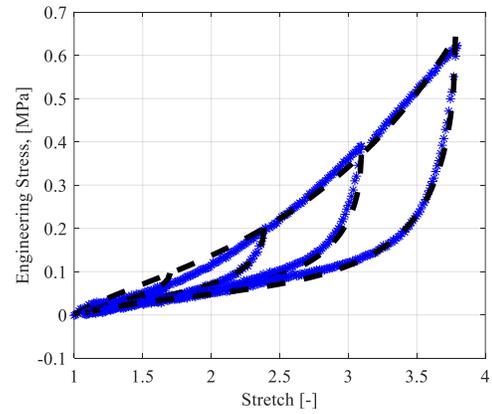


Fig. 25 Muestra NH24 con Nanopartículas y valores:  
 $\mu = 0.0689$ ,  $f = -0.2127$ ,  $A1 = 0.1125$ ,  $A2 = -0.0654$   
 $N = 10.0362$ ,  $b=0.6$ ,  $c= 10$ .