

Resumen

Los fluidos magneto-reológicos (MR), clasificados dentro de la categoría de no newtonianos, son sustancias compuestas de un líquido portador y algún tipo de micro-partículas con propiedades magnéticas; estos fluidos cambian drásticamente sus propiedades físicas, mecánicas y ópticas, principalmente, al aplicarles un campo magnético. Las partículas se alinean formando cadenas orientadas en dirección del campo aplicado; la formación de estas cadenas de partículas restringe el movimiento del fluido. Al cambiar la intensidad del campo, la atracción entre las partículas aumenta o disminuye permitiendo el control continuo de las características reológicas del líquido.

En el presente trabajo se realizaron varios estudios de reometría sobre un sistema MR en presencia de campo magnético. Se usó un reómetro Brookfield de geometría cono-plato al que se le adaptó un solenoide para generar y controlar el campo magnético. El material magnético para preparar el sistema MR es magnetita mineral, la cual fué sometida a distintos tiempos de molienda mecánica, obteniendo muestras de partículas de diferentes tamaños. Se prepararon muestras MR bajo diferentes condiciones de concentración y de tamaños de partícula. Se estudió su comportamiento al someterlos a diferentes condiciones de campo magnético y velocidad de deformación.

De las pruebas realizadas se observó que a bajas velocidades de corte, los sistemas alcanzaron variaciones en su viscosidad de hasta dos órdenes de magnitud respecto al valor correspondiente con campo nulo, en un régimen de concentración y campo magnético moderados. Se estudió el comportamiento pseudo-plástico y se midió indirectamente, en algunos casos, el módulo de cedencia por extrapolación del esfuerzo cortante a bajas velocidades de corte. Se realizó un estudio de simulación numérica del comportamiento de un modelo simple de amortiguador MR en el cual se varía la constante de amortiguación, que simula el cambio en la viscosidad del líquido inducido por el campo magnético, y se compara con el que tendría sin el control de la misma en un amortiguador convencional.

Contenido

Resumen	i
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	viii
Introducción	ix
1 Antecedentes.	1
1.1 Introducción a los fluidos MR	5
1.1.1 Características	6
1.1.2 Componentes de los fluidos MR	7
1.2 Propiedades físicas	10
1.2.1 Propiedades mecánicas	13
1.2.2 Propiedades ópticas	13
1.2.3 Propiedades magnéticas	15
2 Reometría con campo magnético	18
2.1 Reómetros	21
2.2 Sistema de reometría Brookfield	23
2.3 Diseño del solenoide	26
3 Estudio de propiedades físicas	32
3.1 Reología del sistema en función del campo a concentración fija	34
3.2 Reología del sistema en función del tamaño de partícula . . .	37
3.3 Análisis de resultados	44
4 Aplicaciones	47
4.1 Amortiguamiento de vibraciones a través de un medio viscoso	48
4.2 Amortiguador MR	53

Contenido

4.3 Simulación numérica del comportamiento del amortiguador	
MR	55
Síntesis y conclusiones	63
Glosario	65
Bibliografía	68

Lista de Figuras

1.1	Gráfica del comportamiento de un fluido newtoniano bajo un gradiente de velocidad v entre dos placas paralelas [4].	2
1.2	Gráfica del comportamiento de un fluido newtoniano comparado con los tipos de comportamiento no-newtoniano [5].	2
1.3	Diagrama del comportamiento reológico para un fluido plástico de Bingham [4].	3
1.4	Diagrama del comportamiento reológico para un fluido que obedece al modelo de Herschel-Buckley [4].	5
1.5	Comparación de diferentes modelos de estructuras formadas por partículas dispersas, en presencia de un campo magnético (H) y/o uno eléctrico (E) [19].	10
1.6	Estudio de estructuras de partículas magnéticas bajo la acción de un campo magnético rotante, se consideran varias frecuencias. Imágenes obtenidas por microscopía con un campo de visión de $35 \times 26 \mu$, la fracción de volumen ocupado por las partículas es 0.0005. Con valores de $H = 12.4$ kA/m y $d = 0.87$ mm [21].	12
1.7	Comparación de la distribución de partículas con y sin campo magnético. Nótese la formación de estructuras alargadas orientadas en la dirección del campo magnético [21].	14
1.8	Comportamiento de la transmisión de luz en una dispersión MR. Obsérvese la existencia de un umbral en el valor del campo magnético para la observación de los efectos y la existencia de un valor asintótico [22].	14
1.9	Densidad de flujo magnético dentro de fluidos MR como función del campo aplicado [11].	16
1.10	Alineación de las partículas bajo un campo magnético [23].	17
2.1	Representación gráfica de la deformación de un fluido al estar sometido a un esfuerzo cortante [6].	19
2.2	Variación del módulo cortante como función de la velocidad de deformación [24].	20
2.3	Variación de la viscosidad aparente como función de la velocidad de deformación [24].	20
2.4	Representación gráfica de los diferentes tipos de reómetros [6].	22
2.5	Representación gráfica de las principales partes del reómetro LVDV-III Ultra de Brookfield. También se muestra la conexión a un baño térmico [25].	24
2.6	Detalle del baño térmico y el plato del reómetro.	25

2.7	Dimensiones del solenoide usado para el sistema de reometría con campo magnético.	27
2.8	Fotografía del solenoide construido.	27
2.9	Vista de la sección transversal de un solenoide infinito. El campo en el interior es uniforme y en el exterior es cero.	28
2.10	Valores de campo magnético generados por el solenoide a diferentes distancias y voltajes aplicados.	30
2.11	Sistema de reometría con campo magnético. Se muestra el solenoide y el reómetro acoplados. También se muestra el baño térmico y las fuentes de voltaje.	31
3.1	Detalle del cilindro donde se vierte el material a moler. También se observan los balines.	33
3.2	Detalle del sistema de rotación que hace girar el molino de bolas.	33
3.3	Partículas provenientes de la molienda de 60 minutos, el tamaño promedio de partícula es de $19.1 \pm 3.4 \mu m$	34
3.4	Gráfica de viscosidad bajo la acción del campo magnético (concentración $0.3 \text{ gr magnetita}/10 \text{ ml}$ de aceite de silicona). Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.	35
3.5	Comportamiento de la viscosidad bajo un campo magnético (concentración $0.1 \text{ gr magnetita}/10 \text{ ml}$ de aceite de silicona). Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.	35
3.6	Comportamiento de la viscosidad frente al módulo cortante. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.	37
3.7	Partículas obtenidas de una molienda de 2.5 minutos con un tamaño promedio de partícula de $149.9 \pm 41.9 \mu m$	38
3.8	Partículas obtenidas de una molienda de 8 minutos con un tamaño promedio de partícula de $126.3 \pm 13.2 \mu m$	38
3.9	Partículas obtenidas de una molienda de 30 minutos, con un tamaño promedio de partícula de $46.5 \pm 10.8 \mu m$	39
3.10	Partículas obtenidas de una molienda de 45 minutos, con un tamaño promedio de partícula de $25.5 \pm 4.1 \mu m$	39
3.11	Gráfica de viscosidad en función del campo magnético para varias rpm de una molienda de 8 minutos. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.	41
3.12	Comportamiento de la viscosidad en función del campo para diferentes tiempos de molienda. Todas las mediciones fueron tomadas a 1 rpm. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.	42

3.13	Comportamiento del módulo cortante como función del campo magnético para diferentes tiempos de molienda. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos. Datos correspondientes a 1.5 rpm.	43
3.14	Comportamiento del módulo cortante como función del campo magnético para varios tiempos de molienda. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos. Datos correspondientes a 7 rpm.	44
3.15	Comportamiento de la viscosidad como función de la velocidad de deformación (rpm) para varios voltajes aplicados. La muestra fue preparada usando la molienda de 2.5 minutos. Obsérvese el comportamiento pseudoplástico.	45
3.16	Comportamiento del módulo cortante como función de la velocidad de deformación. Obsérvese que los valores tienden a un valor dado para velocidades de deformación pequeñas, este valor es el módulo de cedencia. Datos obtenidos para la molienda de 2.5 minutos con un voltaje de 15, 20 y 25 V.	45
3.17	Comportamiento de la viscosidad como función del campo magnético para varias velocidades de deformación. Las líneas sólidas representan los ajustes cuadráticos de los valores originales, representados por puntos. Obsérvese el efecto de adelgazamiento.	46
4.1	Comportamiento de la posición respecto al punto de equilibrio de un sistema oscilatorio sin fricción.	49
4.2	Comportamiento de un sistema oscilatorio amortiguado.	50
4.3	Representación gráfica de un modelo sencillo de un sistema oscilatorio amortiguado con un grado de libertad [35].	51
4.4	Sistema oscilatorio sub-amortiguado [37].	52
4.5	Sistema oscilatorio críticamente amortiguado [37, 36].	52
4.6	Sistema oscilatorio sobreamortiguado [37].	52
4.7	Partes de un amortiguador convencional [39].	53
4.8	Partes de un amortiguador MR simple.	53
4.9	Gráfica obtenida para la aproximación de c (ver texto).	56
4.10	Geometría del tope usado en la simulación del comportamiento de un modelo de amortiguador.	57
4.11	Movimiento vibratorio considerando un solo tope, sin amortiguamiento.	58
4.12	Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se considera un tope.	59
4.13	Comportamiento del sistema vibratorio al ser sometido a 2 topes sin considerar amortiguamiento.	60
4.14	Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran dos topes.	60
4.15	Comportamiento del sistema vibratorio al considerar 3 topes, sin amortiguamiento.	61

4.16	Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran tres topes.	61
4.17	Comportamiento del sistema vibratorio al ser sometido a 4 topes, sin amortiguamiento.	62
4.18	Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran cuatro topes.	62
4.19	Comparación del tiempo durante el cual el sistema estuvo alejado de su posición de equilibrio para los tres casos de la constante de amortiguamiento c y para los casos 1, 2, 3 y 4 topes.	62

Lista de Tablas

1.1	Comparación de la composición de algunos fluidos MR comerciales a base de hierro como partícula magnetizable [9].	7
1.2	Composiciones representativas y propiedades de fluidos MR, fluidos electro-reológicos (ER) y ferrofluidos [14].	8
1.3	Comparación de la densidad de partículas comúnmente utilizadas para preparar fluidos MR [17].	8
1.4	Comparación de la composición de algunos sistemas MR usados en investigaciones, así como las concentraciones de partículas y el campo magnético usado [15].	9
1.5	Sistema de Unidades (SI) para los fluidos. Los datos correspondientes del agua y el aire se indican sólo como referencia [1].	11
2.1	Tiempo utilizado para la toma de mediciones de acuerdo a la velocidad de deformación (ver texto).	26
2.2	Sistema de unidades disponible en el reómetro Brookfield [25].	26
2.3	Campo generado por el solenoide a diferentes medidas respecto de uno de sus extremos.	29

Introducción

El desarrollo de materiales “inteligentes” o la búsqueda de los mismos ha sido foco de atención para los países del primer mundo donde se han gestado la mayoría de los conocimientos que se tienen hasta ahora.

Los fluidos MR son un ejemplo de estos materiales “inteligentes”. Éstos consisten en dispersiones de micropartículas magnetizables en líquidos tales como aceites inorgánicos. El campo de aplicaciones de estos fluidos es muy extenso, la explotación de sus propiedades y usos aún no se han explorado ampliamente. Se pueden encontrar estudios en el campo de la medicina, la robótica y en diferentes ramas de la ingeniería tales como la civil, industrial, alimenticia y química, entre otras.

Investigaciones recientes han permitido la aplicación de estos fluidos en sistemas de amortiguación en la industria automotriz; se ha encontrado que éstos nuevos sistemas presentan un nivel de respuesta más eficaz que los dispositivos convencionales.

Justificación. Uno de los problemas a los que se enfrenta actualmente la tecnología y la ciencia en la mayoría de países tercermundistas es desarrollo de líneas de investigación que generen su propia tecnología. La incursión en algunas líneas de investigación es extremadamente difícil debido al alto grado de desarrollo que han alcanzado en países tecnológicamente avanzados, en cambio en otras, aun no desarrolladas, se podría contribuir a su desarrollo y participar de su tecnología. Una de tales líneas de investigación es la relacionada con la ciencia y la tecnología de los fluidos MR. La utilización de la tecnología basada en fluidos MR no ha sido completamente controlada ya que se presentan algunos problemas relacionados con la síntesis de partículas y la elaboración de dispersiones estables, también se carece de modelos teóricos que describan adecuadamente el comportamiento de estos materiales.

Nuestra propuesta es desarrollar una línea de investigación que ha sido poco explorada en este campo, donde las mezclas comúnmente están compuestas de aceite de silicona y ferrita (Fe_2O_3); una de las variantes fundamentales que pretendemos

introducir es el uso de magnetita mineral (Fe_3O_4) como material magnético, un material abundante en la naturaleza y que nos permitirá realizar estudios usando diferentes tamaños de partículas.

La utilización de la tecnología basada en los fluidos MR depende en gran medida de sus propiedades físicas, principalmente de su viscosidad y el tiempo de respuesta del fluido. Por otra parte estas cantidades dependen de forma no trivial de varios factores, tales como el campo magnético, las propiedades magnéticas, el tamaño y forma de las partículas. El desarrollo de la tecnología basada en los fluidos MR requiere de la propuesta de los sistemas que presenten este comportamiento y de la caracterización de los propiedades de la mismos.

El desarrollar este tipo de tecnología permitirá incursionar en una gran infinidad de aplicaciones entre los que están algunos sistemas de frenado, absorbedores de impactos, control de vibraciones, robots controlados a través de campos magnéticos, entre otros, y crear tecnología propia a un costo más bajo comparado con el que resulta de importarla. El presente trabajo de investigación pretende ser parte del desarrollo en este campo de la investigación en nuestro país y directamente al interior de nuestra Universidad.

El objetivo de este trabajo es estudiar las propiedades físicas (reológicas) de un fluido MR a base de magnetita mineral, mediante un sistema de reometría adaptado para obtener mediciones en presencia de campo magnético. En particular, investigar la dependencia de los cambios en la viscosidad que sufre el sistema bajo diferentes condiciones de campo magnético, velocidad de deformación y tamaño de partícula.

En el capítulo de *Antecedentes* se muestra el contexto teórico de los fluidos MR, así como sus características y los elementos que los conforman; además, se analizan algunas de las investigaciones realizadas hasta ahora.

En el capítulo 2, nombrado *Reometría con campo magnético*, se estudian los distintos tipos de reómetros y sus características, de manera específica, las características del reómetro LVDV-III + CP de Brookfield, así como el procedimiento a seguir para su utilización. También se estudian los principales conceptos de la Reometría. Posteriormente se explica el proceso para el diseño de un solenoide utilizado junto con el reómetro para realizar mediciones de viscosidad en presencia de campo magnético.

El capítulo 3, titulado *Estudio de propiedades físicas* es de carácter experimental. A través del uso de nuestro sistema de reometría se estudia el comportamiento reológico del fluido MR al someterlo a diferentes condiciones de campo

magnético, tamaño de partícula y de velocidad de deformación. Para la obtención de los distintos tamaños de partícula se realizaron moliendas de magnetita con diferentes tiempos de molienda.

El cuarto y último capítulo *Aplicaciones* se aborda una posible aplicación de esta tecnología, en relación a su uso en sistemas de amortiguación de vibraciones. En este capítulo se muestran resultados de simulación numérica de un modelo simple de amortiguador MR, donde se observa gráficamente el comportamiento del sistema, analizado bajo distintas condiciones de amortiguación y de control que simulan el efecto del uso del fluido MR.

Capítulo 1

Antecedentes.

La materia se puede clasificar desde distintos puntos de vista, uno de ellos es aquél que la caracteriza por su comportamiento físico ante situaciones especiales, tales como el tiempo, la temperatura y el esfuerzo cortante. De acuerdo a esto, se encuentra en estado sólido, plástico, fluido y plasma.

Entre las propiedades que diferencian el estado de la materia, la que permite una mejor clasificación desde el punto de vista mecánico, es la que hace referencia a la forma en que reacciona el material cuando es sometido a una fuerza externa [1].

Así, con base en el comportamiento que presenta un fluido, se define de la siguiente manera: Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea, se escurre cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial [2]. Dado que la reología es la ciencia que trata de la deformación y flujo de la materia, es la encargada de estudiar el comportamiento mecánico de los fluidos. El comportamiento viscoso que presentan los fluidos los clasifica en newtonianos y no-newtonianos [3]. Los newtonianos son aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación, la función de viscosidad es constante, algunos ejemplos son el agua, el aire y la gasolina en condiciones normales (ver figura 1.1). Estos fluidos cumplen con la siguiente relación [4]:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} \quad (1.1)$$

Donde:

τ es el módulo cortante

η es la viscosidad plástica y

$\frac{dv}{dh}$ ó $\dot{\gamma}$ es la velocidad v con la que se desplaza una placa respecto a otra, separadas transversalmente por una distancia h

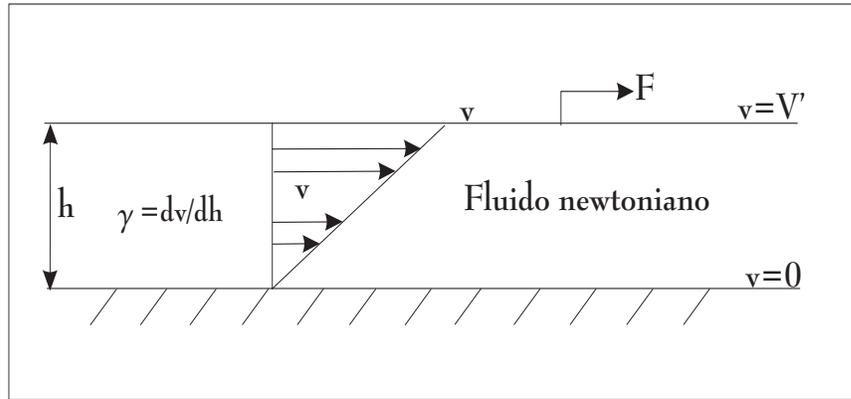


Figura 1.1: Gráfica del comportamiento de un fluido newtoniano bajo un gradiente de velocidad v entre dos placas paralelas [4].

La figura 1.2 muestra el comportamiento general del módulo cortante (τ) y la viscosidad (η) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) de un fluido newtoniano comparado con el de un fluido no-newtoniano (FNN) [5].

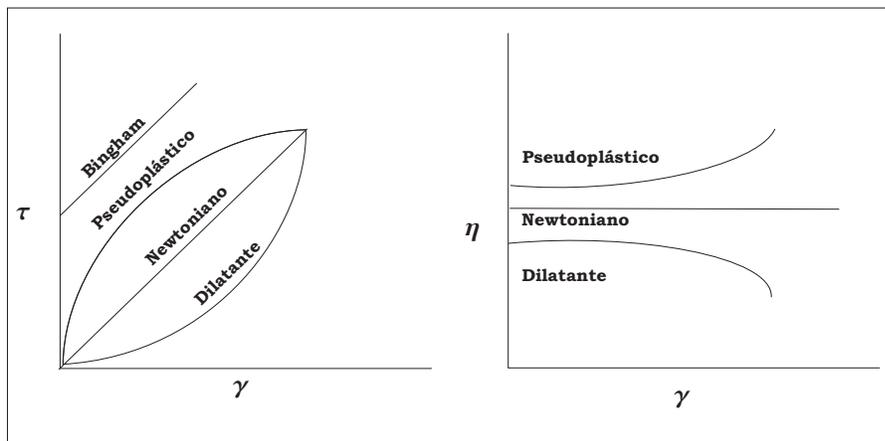


Figura 1.2: Gráfica del comportamiento de un fluido newtoniano comparado con los tipos de comportamiento no-newtoniano [5].

En los FNN, el módulo cortante no es directamente proporcional a la velocidad de deformación y su comportamiento obedece principalmente a la presencia de partículas mezcladas con el líquido, las variaciones reológicas de estos fluidos van cambiando con el paso del tiempo mientras el fluido sea sometido a un gradiente de

deformación constante o variable [4].

Se han propuesto modelos para representar el comportamiento de los FNN, de los cuales se pueden mencionar:

El *plástico de Bingham* sólo difiere de los newtonianos en que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no pasa por el origen; para comenzar a fluir requieren de un esfuerzo cortante inicial diferente de cero (véase figura 1.3). Algunos ejemplos de este comportamiento se presentan en suspensiones de roca y arcilla, la margarina y las mezclas de chocolate. El comportamiento de estos materiales se puede definir por [4, 6]:

$$\tau = \tau_c + \eta \frac{dv}{dh} \quad (1.2)$$

Donde:

τ es el módulo cortante

τ_c es el módulo de cedencia

η es la viscosidad plástica

$\frac{dv}{dh}$ es la velocidad de deformación

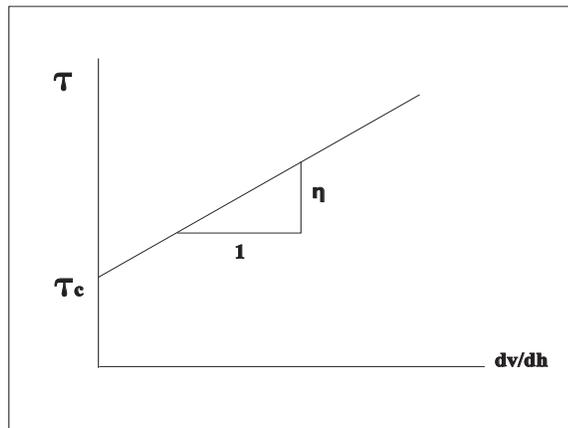


Figura 1.3: Diagrama del comportamiento reológico para un fluido plástico de Bingham [4].

Estos fluidos son importantes en el contexto de este trabajo de investigación ya que los fluidos MR pueden aproximarse a esta clase de fluidos.

Otro tipo de fluidos tienen un comportamiento que está descrito por medio de una Ley de potencias [7]:

$$\tau = K \left[\frac{dv}{dh} \right]^n \quad (1.3)$$

Donde:

K es el índice de consistencia

n es el índice de comportamiento

Cuando el índice de comportamiento es $n < 1$ el fluido es un *seudoplástico*, los cuales se vuelven menos viscosos a medida que se incrementa el esfuerzo cortante que se les imprime para que fluyan, es decir, se adelgazan a medida que aumenta la intensidad de agitación (ver figura 1.2). La mayoría de los FNN, incluidos los alimenticios, se encuentran dentro de esta categoría. Los jugos de frutas pasan generalmente de un comportamiento newtoniano a un seudoplástico cuando se concentran [4].

Cuando se presenta el caso donde el índice de comportamiento es $n > 1$ se dice que se trata de un fluido *dilatante* (veáse figura 1.2); son mucho menos comunes que los seudoplásticos y contrario a ellos incrementan su viscosidad al ser sometidos a un mayor esfuerzo cortante; algunos ejemplos de éstos, son las soluciones de silicato de potasio, soluciones de goma arábica, muchos polvos en agua en elevadas concentraciones y algunas mieles de especies de eucaliptus [4, 6].

El modelo de *Herschel-Buckley* (veáse figura 1.4); combina el comportamiento de los plásticos de Bingham y los descritos por la Ley de Potencias, la ecuación que representa el comportamiento de estos fluidos es la siguiente [4]:

$$\tau = \tau_c + K * \left[\frac{dv}{dn} \right]^n \quad (1.4)$$

Donde:

τ_c es el módulo de cedencia

K es el índice de consistencia

n es el índice de comportamiento

En los FNN, al graficar τ vs $\frac{dv}{dh}$, existe una relación que no es una recta que pasa por el origen. De acuerdo a esto, se puede seleccionar uno de los modelos anteriores

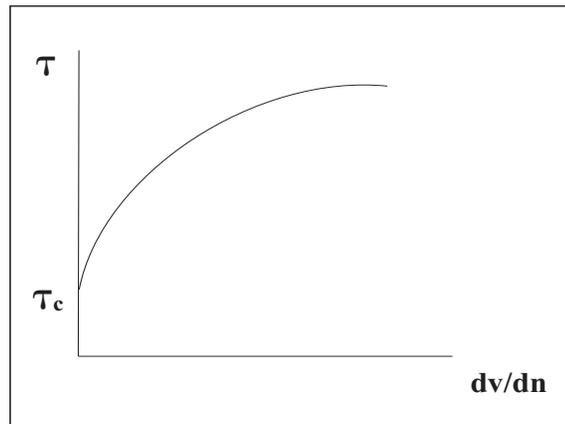


Figura 1.4: Diagrama del comportamiento reológico para un fluido que obedece al modelo de Herschel-Buckley [4].

y determinar sus propiedades reológicas a través de un procedimiento numérico [8].

Atendiendo a su comportamiento en el tiempo, los fluidos pueden dividirse en dos categorías: dependientes e independientes del tiempo. Los fluidos dependientes del tiempo son los *reopécticos* que exhiben un aumento reversible del módulo cortante, cuando la velocidad de deformación es constante. Son muy raros, algunos ejemplos de ellos los encontramos en suspensiones de arcilla bentonítica y las suspensiones de yeso. Los fluidos *tixotrópicos* tienen un comportamiento contrario, es decir, que si se agitan a velocidad constante, disminuye su módulo cortante (viscosidad relativa) con el tiempo. Ejemplos de éstos son la leche condensada, la mayonesa y la clara de huevo [4].

1.1 Introducción a los fluidos MR

Dentro de los FNN, encontramos una clase de ellos denominada fluidos MR, los cuales son dispersiones de micropartículas magnetizables en líquidos tales como aceites inorgánicos, agua, etc. Existen algunos fluidos MR que se encuentran presentes de manera natural como la sangre; sin embargo, la mayoría son elaborados por el hombre.

Una característica esencial de los fluidos MR es que pueden cambiar sus propiedades reológicas, pueden pasar de un simple fluido a un semi-sólido y este proceso puede ser controlado a través de un campo magnético. Ésto los hace ideales para

el control de mandos electrónicos y sistemas mecánicos [9]. Cuando un fluido MR no se encuentra sometido a un campo magnético es sólo una dispersión aleatoria de partículas exhibiendo un comportamiento reológico newtoniano, que está dado por [4]:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} \quad (1.5)$$

Al aplicarle un campo magnético su comportamiento reológico cambia comportándose, en primera aproximación, como un plástico Bingham [4, 6]:

$$\tau = \tau_c + \eta \frac{dv}{dh} \quad (1.6)$$

Los primeros estudios sobre sistemas semejantes los realizó W.M. Winslow que trabajó durante los años '40 con fluidos que cambiaban sus propiedades reológicas al aplicarles un campo eléctrico [10], pero los primeros estudios sobre fluidos controlables mediante un campo magnético se le atribuyen a Jacob Rabinow en el US National Bureau of Standards en la misma década [11]. En los últimos años los fluidos MR han sido objeto de gran interés en la investigación, en especial en el diseño de materiales inteligentes.

1.1.1 Características

Cuando un fluido MR es sometido a la influencia de un campo magnético, las partículas son magnetizadas por el efecto del mismo y se comportan como pequeños imanes. Las partículas se alinean paralelas al campo, éstas ejercen fuerzas entre sí, atrayéndose polos opuestos y repeliéndose polos iguales. El resultado es la formación de estructuras columnares paralelas a las líneas del campo [12]. Estos agregados columnares son los responsables del aumento de la viscosidad en el fluido. Las cadenas oponen resistencia a la deformación del sistema, generando aumento en su resistencia al corte o cizalladura dependiente de la intensidad del campo. Las fuerzas entre las partículas magnéticas son suficientes para que lleguen a comportarse como sólidos.

El tiempo de respuesta de estas suspensiones ante este fenómeno es del orden de milisegundos [9]. Los efectos en algunos casos son reversibles, al retirar el campo magnético las partículas se distribuyen aleatoriamente y el comportamiento del sistema vuelve a ser newtoniano. En otros casos, al retirar el campo magnético las partículas continúan unidas, debido al fenómeno de remanencia magnética y esto

se refleja en que el sistema no adquiere su viscosidad inicial [13]. Comercialmente existen fluidos MR con características ya definidas por el productor. En la tabla 1.1 se pueden apreciar algunas características de cuatro tipos de fluidos MR que contienen hierro como partícula magnetizable, elaborados por Lord, Company.

<i>Fluido MR</i>	<i>Porcentaje de volumen de hierro</i>	<i>Fluido Portador</i>	<i>Densidad</i>
MRX-126 PD	26	Aceite de hidrocarburo	2.66
MRX-140 D	40	Aceite de hidrocarburo	3.64
MRX-242 AS	42	Agua	3.88
MRX-336 AG	36	Aceite de silicona	3.47

Tabla 1.1: Comparación de la composición de algunos fluidos MR comerciales a base de hierro como partícula magnetizable [9].

1.1.2 Componentes de los fluidos MR

El interés por el estudio de estos fluidos ha conducido a la realización de varios trabajos de investigación teóricos y experimentales. El estudio de estas investigaciones nos permite ahora identificar características generales asociadas a estos sistemas, como son el material y tamaño de partículas, las características del líquido portador, campo aplicado y en algunos casos el tipo de surfactante. A continuación se describirán estas características, puesto que el conocimiento de éstas servirá de pauta para la elaboración de dispersiones MR, para su estudio y aplicación.

En la tabla 1.2 se muestra la composición representativa y las propiedades físicas de fluidos MR, ER (electro-reológicos) y ferrofluidos, comparadas por P. Phulé y M. Ginder en [14].

Partículas magnetizables

En la preparación de la mayoría de los fluidos MR se han utilizado micro partículas de ferrita o magnetita, normalmente con tamaño de partícula entre 1 y 30 μm [15]. El utilizar partículas de mayor tamaño ocasiona que sea más difícil su suspensión, en el caso de las partículas más pequeñas facilita su suspensión pero su fabricación es muy complicada y costosa, además, el nivel de respuesta reológica disminuye.

Los resultados de los trabajos experimentales apuntan a que una clave para que un fluido MR experimente cambios reológicos notables es que se elijan partículas con

Caraterística	Fluidos MR	Fluidos ER	Ferrofluidos
Material de la partícula	Hierro	Polímeros, Cerámicas piezoeléctricas	Ferritas
Tamaño de partícula	0.1-10 μm	0.1-10 μm	2-10 nm
Fluido portador	Aceites no polares, líquidos polares	Aceites	Aceites, agua
Densidad g/cm^3	3-5	1-2	1-2
Rango de viscosidad ($mPa * s$)	100-1,000	50-1,000	2-500
Campo requerido	$\sim 3kOe$	$\sim 3 kV/mm$	$\sim 1 kOe$
Cambios por la inducción del campo	τ_y (B) $\sim 100 kPa$	τ_y (E) $\sim 5 kPa$	$\Delta\eta$ (B)/ η (0) ~ 2
Medio de excitación	Electro-magnetismo	Alto voltaje	Imanes permanentes

Tabla 1.2: Composiciones representativas y propiedades de fluidos MR, fluidos electro-reológicos (ER) y ferrofluidos [14].

una magnetización de saturación elevada [16]. Las aleaciones de hierro y cobalto son las mejores, su magnetización es aproximadamente de 2.4 *teslas*; sin embargo, la utilización de estas partículas es muy costosa por lo que su utilización en aplicaciones no es económicamente rentable; además, muestran problemas de remanencia, lo cual implica que los cambios en las cantidades físicas de los sistemas MR no sean totalmente reversibles [9].

Se encuentran presentes en el mercado partículas de hierro-carbón, es barato y se producen partículas en tamaños que se encuentran en un rango de 1 a 2 micras. Existen también métodos para obtener partículas ferromagnéticas en forma de óxidos que son mucho más pequeñas, entre los que se encuentra la magnetita. En la tabla 1.3 se muestra la densidad correspondiente de algunas partículas que han sido utilizadas como partículas magnetizables en los fluidos MR [17].

Partículas	Densidad gr/cm^3
Hierro	7.9
Magnetita	5.8
Fe_2O_3	5.24
Hierro-carbón	3.4

Tabla 1.3: Comparación de la densidad de partículas comúnmente utilizadas para preparar fluidos MR [17].

Fluido portador

El líquido que se utiliza como elemento portador de las partículas magnetizables influye de gran manera en los cambios reológicos que presentará el fluido MR, ya que los cambios reológicos que se presenten dependerán en gran medida de las estructuras que se formen y de la interacción de éstas con el líquido portador.

Dentro de los principales líquidos que se emplean para la fabricación de fluidos MR se encuentran el aceite mineral y el aceite de silicona (ver tabla 1.4). Dependiendo principalmente de la aplicación que se le da al fluido MR se selecciona el valor de viscosidad que debe tener el líquido portador [15].

<i>Partículas</i>	<i>Líquido</i>	<i>Tamaño (μm)</i>	<i>Frac. de vol. (ϕ)</i>	<i>Campo B (kA/mm)</i>
Hierro-carbón	aceite de silicona	5	0.46	0-0.6
γFe_2O_3	aceite de transformador	0.6-1.0	0.06, 0.08 y 0.1	0-8
Fe_2O_3	aceite nafténico	0.8	0.1	0-2
keroseno- Fe	agua	0.51	0.06	-

Tabla 1.4: Comparación de la composición de algunos sistemas MR usados en investigaciones, así como las concentraciones de partículas y el campo magnético usado [15].

Surfactante

Los surfactantes son sustancias que se agregan a una dispersión o suspensión para mantener separados los componentes y estabilizar el sistema. El surfactante actúa en la interface de los componentes de la dispersión. En un fluido MR son importantes ya que se desea que una vez que se retire el campo las partículas se separen completamente, incluso si mantienen alguna magnetización remanente [18].

Los surfactantes son moléculas que están compuestas por dos segmentos: uno liposoluble, es decir que es soluble en aceite, y otro que es hidrofílico, soluble en agua; gracias a estos dos segmentos el surfactante ocupa la interface entre los componentes de una dispersión. Hay varios tipos de surfactantes, que se clasifican, de acuerdo a la naturaleza iónica de la parte superficialmente activa de la molécula, en: agentes aniónicos, catiónicos, iónicos y anfóteros. El uso de cada uno de ellos depende de sus características y de las componentes del sistema MR.

Campo aplicado

La formación de estructuras dentro de los fluidos MR depende en gran medida de la intensidad del campo y la dirección en que se aplique (véase figura 1.5). Usualmente el campo que se induce a estos fluidos es alrededor de 3 kO [14], ya que si se le aplica de mayor intensidad puede ocasionar una saturación magnética y como consecuencia el consumo innecesario de energía [19].

El incrementar de manera gradual la intensidad de campo ocasiona que se formen estructuras más compactas debido a que la magnetización de las partículas se realiza de manera más lenta y los cambios ocasionados en la viscosidad son mayores. Cuando se aplica un campo grande de manera rápida, se forman estructuras de mayor tamaño y más complejas, pero los cambios que ocurren en la viscosidad son menores [15].

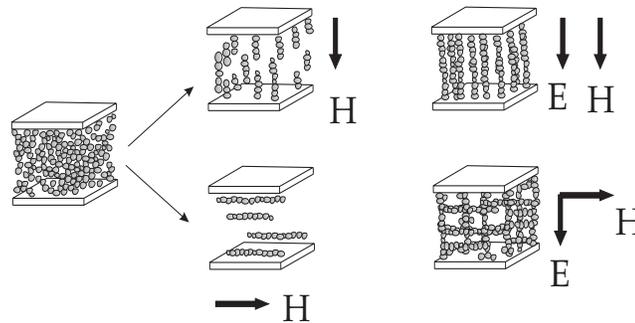


Figura 1.5: Comparación de diferentes modelos de estructuras formadas por partículas dispersas, en presencia de un campo magnético (H) y/o uno eléctrico (E) [19].

1.2 Propiedades físicas

El estudio de las propiedades de los fluidos MR tiene un gran interés desde dos puntos de vista: 1) Por una parte el conocimiento de sus propiedades y el comportamiento que presentan son de crucial importancia para su manejo durante los procesos de producción en que éstos intervienen. 2) Por otro lado, su caracterización y la elaboración de modelos que proyecten su comportamiento es importante para el desarrollo del conocimiento científico.

La naturaleza y la proporción de los elementos que forman el fluido MR determinará el comportamiento que presente la dispersión. El estudio de las propiedades

de una dispersión implica el conocimiento de las características de sus componentes, tales como el punto de ebullición del líquido portador, el nivel de potencial magnético aplicable a las partículas magnetizables, la efectividad del surfactante, entre otras. Este análisis previo a la observación directa del comportamiento de un fluido MR bajo la acción del campo magnético nos permitirá realizar mediciones más precisas.

Para cuantificar el comportamiento de los fluidos se utilizan ciertas magnitudes de referencia para las dimensiones básicas. Para ello se utiliza el Sistema Internacional de Medidas (SI), el cual se basa en el sistema MKS. A continuación se muestra una tabla que muestra las unidades correspondientes a algunas propiedades de los fluidos.

PROPIEDADES	SIGNACIÓN	UNIDADES	AGUA	AIRE
Masa específica	P	k/m^3	1.00	1.2
Viscosidad	β ó (η)	g/ms o cP	1.0	0.02
Calor específico	Cp	$J/Kg K$	4.200	1.008
Presión de vapor 20	Pv	bar	0.023	—
Tensión superficial	δ	N/m	72.8	—

Tabla 1.5: Sistema de Unidades (SI) para los fluidos. Los datos correspondientes del agua y el aire se indican sólo como referencia [1].

Empezamos analizando la viscosidad, propiedad cuyo cambio con el campo magnético caracteriza a los fluidos MR. La viscosidad de un fluido MR en ausencia de un campo magnético es más significativamente una función del fluido portador y de la concentración de partículas en el fluido [15].

La viscosidad se puede calcular haciendo uso de la aproximación de Einstein ¹:

$$\eta_{efec} = \eta_{fluid}(1 + 2.5\phi) \quad (1.7)$$

Donde:

η_{efec} es la viscosidad efectiva de la dispersión

η_{fluid} es la viscosidad del fluido

ϕ es la fracción de volumen ocupado por las partículas

¹Se considera que esta aproximación de Einstein sólo es aplicable a concentraciones de 0.02 pero algunos datos demuestran su validez en gradientes de concentración en volumen de 0.12 [20].

Cuando se ve afectado por un campo magnético, el sistema experimenta cambios en su viscosidad que son consecuencia de la interacción de las partículas magnetizadas debido al campo aplicado. Se han empleado diversas técnicas que permiten observar el comportamiento de los fluidos MR y de esta manera poder caracterizarlos.

En el Laboratorio de Sistemas Complejos del Departamento de Física Fundamental UNED, en Madrid, se han desarrollado varias líneas de investigación que recurren a diversas técnicas como la videomicroscopía, el dicroísmo lineal, la birrefringencia y la dispersión de luz a bajo ángulo (SALS), para estudiar el comportamiento de los fluidos MR [21]. En dichos experimentos se estudió el comportamiento de los fluidos MR compuestos de microesferas super-paramagnéticas de magnetita dispersos en una matriz de PS/PDVB (Poliestireno/polidivinilbenzeno) adicionadas con un surfactante SDS (dodecil sulfato de sodio), al aplicarles un campo rotante. Se observó la agregación de las partículas para formar cadenas, las cuales bajo la acción del campo rotante están sometidas a un par de giro, pero por otra parte se opone la fricción viscosa, debido a esta competición se limita el tamaño máximo admisible de cadenas. Las cadenas estables siguen la rotación del campo con una cierta deformación y un desfase (véase figura 1.6).

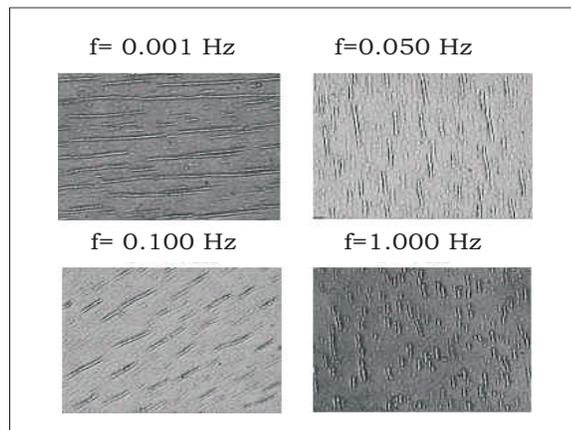


Figura 1.6: Estudio de estructuras de partículas magnéticas bajo la acción de un campo magnético rotante, se consideran varias frecuencias. Imágenes obtenidas por microscopía con un campo de visión de $35 \times 26 \mu$, la fracción de volumen ocupado por las partículas es 0.0005. Con valores de $H = 12.4 \text{ kA/m}$ y $d = 0.87 \text{ mm}$ [21].

1.2.1 Propiedades mecánicas

Al alterar el orden aleatorio de las partículas magnetizables en el interior de un sistema MR se modifican drásticamente sus propiedades estructurales y por consecuencia las características mecánicas y ópticas de las mismas. A partir de la formación de cadenas de partículas magnetizables y a medida que aumenta el campo magnético las estructuras se van adhiriendo, aglomerándose de tal forma que se generan agregados de mayor grosor y con mayor fuerza interpartícula. Estas estructuras generan una mayor resistencia a la deformación a cualquier fuerza aplicada y confieren propiedades mecánicas poco convencionales entre las que destacan una viscosidad no constante que depende de la velocidad de deformación (debido a su carácter no-newtoniano), una componente recuperable de la deformación (módulo de cesión) y diferencias de tensiones normales no nulas. Al aplicar el campo magnético a un fluido MR la viscosidad medida perpendicularmente a las líneas del campo presenta un aumento considerable. Los cambios también se reflejan en variaciones del módulo de cedencia que alcanzan valores desde 80 hasta 100 *kPa*. Al realizar la medición de la viscosidad en dirección paralela a las líneas generadas por el campo, la viscosidad permanece aparentemente invariable debido a que en este sistema la viscosidad es una propiedad anisotrópica [14].

1.2.2 Propiedades ópticas

Otra de las características de los fluidos MR es que al estar sometido al campo magnético cambia la propiedad de permitir o inhibir el paso de la luz. Este proceso de variación se describe a continuación. En el proceso de aglomeración, al interior de los fluidos MR, los espacios generados entre las cadenas permiten el paso de luz con menor dificultad, que cuando las partículas están dispersas (véase figura 1.7). En este aspecto, el fluido MR funge como un regulador lumínico, puesto que la intensidad de campo altera la distancia entre las cadenas modificando la dispersión de la luz [21].

Las investigaciones realizadas en el *Institute of Gas Technology* en Chicago, Illinois, revelan que la apariencia de las diferentes fases depende de varios parámetros incluyendo la magnitud del campo aplicado, la fracción de volumen ocupado por las partículas y la densidad de las mismas. Los resultados reportados en dicho artículo describen el análisis de las propiedades estructurales empleando un microscopio óptico [22]. De este estudio se desprende que de acuerdo a la longitud de la cadena y fracción de volumen, las cadenas pueden quedarse separadas o gradualmente pueden unirse para formar las columnas.

El trabajo consistió en realizar mediciones de transmisión de luz en un fluido

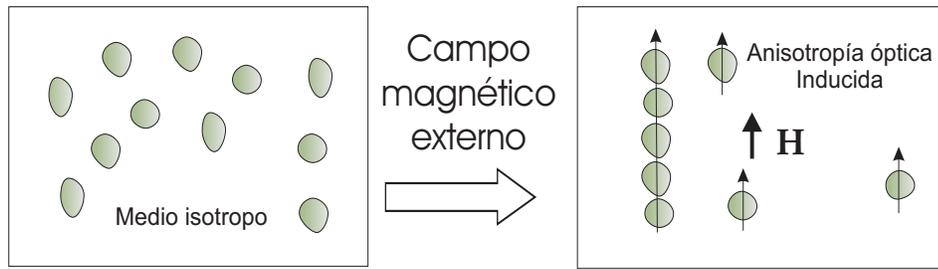


Figura 1.7: Comparación de la distribución de partículas con y sin campo magnético. Nótese la formación de estructuras alargadas orientadas en la dirección del campo magnético [21].

MR usando un rayo láser paralelo al campo magnético y directamente dirigido a la superficie del fluido, siendo colocado un foto-diodo detrás de la mezcla. Los resultados de la luz transmitida se muestran en la figura 1.8.

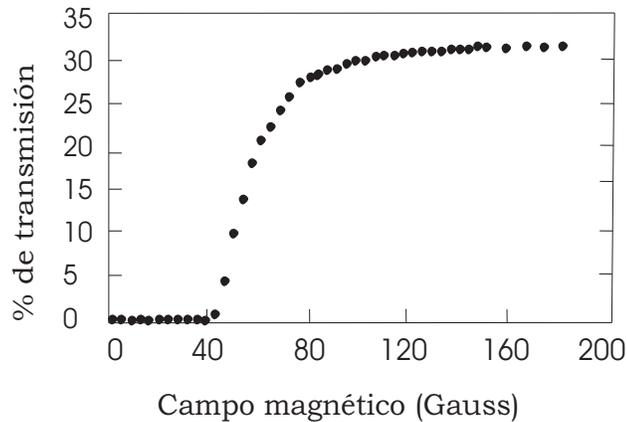


Figura 1.8: Comportamiento de la transmisión de luz en una dispersión MR. Obsérvese la existencia de un umbral en el valor del campo magnético para la observación de los efectos y la existencia de un valor asintótico [22].

Los resultados obtenidos para $\phi = 0.10$ y $L = 100 \mu m$ muestran que la transmisión comienza a incrementarse bruscamente cuando H se aproxima a $4 mT$ (esto es, cuando λ excede 1.5). La transmisión alcanza el máximo valor cuando H tiende a $8 mT$ (lo que corresponde a $\lambda = 6$). La transmisión de luz se incrementa en un orden de 3 con un valor de λ en un rango de 0 a 10. Al reducir el campo de 10 a $0 mT$ no

resulta ningún valor de histéresis. Mediante la observación directa del microscopio se llegó a la conclusión de que el proceso de condensación al interior de las columnas es muy similar a una transición de fase de primer orden en un sistema donde dos fases diferentes coexisten.

1.2.3 Propiedades magnéticas

El conocimiento de las propiedades magnéticas de los fluidos MR es importante para el diseño de los dispositivos basados en estos fluidos. En muchos dispositivos, el fluido representa la mayor reluctancia magnética dentro del circuito magnético. Estas propiedades son determinantes en la formación de las estructuras columnares de partículas dentro del fluido [11].

Según estudios realizados por Cupich y Elizondo, los fluidos MR exhiben propiedades magnéticas lineales hasta un campo aplicado de alrededor de $0.02/\mu_0$ A/m, donde μ_0 es la permeabilidad del vacío. Ésto se debe a que en esta región la permeabilidad de los fluidos (la pendiente de $B(H)$) es relativamente constante. Estas permeabilidades pueden variar entre 5 y 9 veces respecto a la del vacío. Los fluidos MR comienzan a exhibir una saturación magnética gradual por arriba del régimen lineal. Una saturación completa ocurre típicamente en campos por arriba de $0.04/\mu_0$ A/m, ver figura 1.9 [11].

En la figura 1.10 se muestra la vista esquemática de tres partículas alineadas en cadena al interior de un fluido MR con una aplicación de campo inducido B_{ave} a lo largo del eje z . Se asume que las partículas son esferas del mismo radio R . El eje simétrico de la partícula se representa con la línea punteada. Las partículas tienen campo magnético inicial relativamente bajo con permeabilidad μ_p y una saturación de magnetización M_s mientras el fluido tiene una permeabilidad μ_0 [23].

Para resumir el contenido de este capítulo mencionamos que: las propiedades características de los fluidos MR en ausencia de campo magnético (comportamiento similar al newtoniano) varían de manera radical cuando se someten a un campo magnético, actuando en primera aproximación como un plástico de Bingham. El comportamiento de estos sistemas, está determinado por las características de sus componentes ya sea por la permeabilidad magnética de las partículas magnetizables y su tamaño, el tipo del fluido portador, la efectividad del surfactante y por la intensidad del campo aplicado, además de otros factores como la temperatura. Cuando a una dispersión MR se le aplica campo magnético, comienzan a formarse estructuras columnares de partículas, ésto altera las propiedades de estos fluidos. Los cambios que experimentan los fluidos MR en función del campo magnético son objeto de estu-

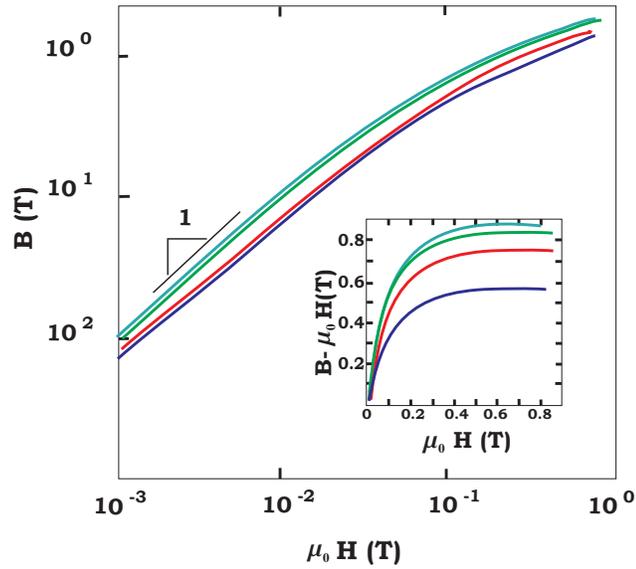


Figura 1.9: Densidad de flujo magnético dentro de fluidos MR como función del campo aplicado [11].

dio y pueden dar origen a distintas líneas de investigación y/o campos de aplicación.

La importancia de conocer la naturaleza y algunos referentes de los fluidos MR radica en el desarrollo de estudios que, con base en lo anterior, generen nuevos conocimientos respecto a esta área dentro de la reología, por lo cual, este capítulo aborda un panorama general en relación a los fluidos MR. En el siguiente capítulo se desarrollará un sistema de reometría con campo magnético, para el estudio de los parámetros reológicos de un fluido MR.

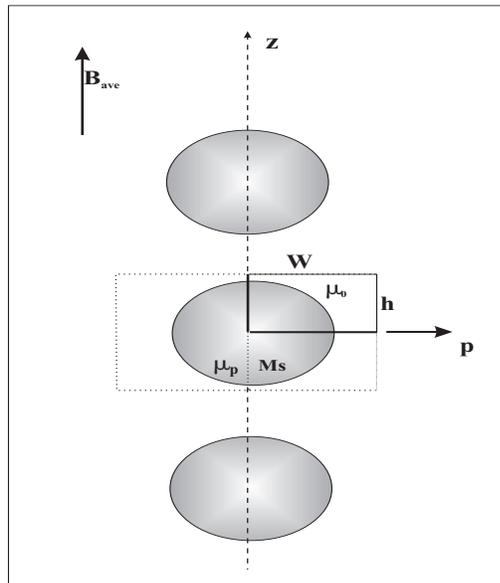


Figura 1.10: Alineación de las partículas bajo un campo magnético [23].

Capítulo 2

Reometría con campo magnético

En presencia de un campo magnético, varias propiedades físicas de los fluidos MR sufren cambios notables. En particular, estos sistemas son interesantes por los cambios que presenta su viscosidad, dichos cambios pueden ser medidos usando diferentes técnicas e instrumentos de laboratorio. Los equipos tradicionalmente usados para el cálculo de la viscosidad están diseñados para líquidos puros, es decir, sin partículas suspendidas, o bien, suspensiones de partículas muy pequeñas. Además, no es común realizar mediciones en presencia de campo magnético. En nuestro caso necesitamos realizar mediciones de la reología de un sistema de partículas relativamente grandes y además en presencia de un campo magnético. Esto quiere decir que necesitamos modificar alguno de los instrumentos actuales para incluir el campo magnético.

En este capítulo se abordará principalmente la parte experimental que hemos implementado para lograr el estudio de la reología de nuestros sistemas MR en presencia de campo magnético. También se estudian algunas cantidades relacionadas con el estudio de la reología y los instrumentos que se utilizan para medir la viscosidad, de manera específica el reómetro Brookfield LVDV-III+CP Ultra, debido a que es el instrumento utilizado para el análisis nuestro fluido MR. Empezamos el capítulo definiendo algunas cantidades físicas que son relevantes en el contexto de este trabajo de investigación. En particular, revisamos los conceptos de módulo cortante, velocidad de deformación y viscosidad. También se revisan algunas características de los reómetros más usados.

Módulo cortante o de cizalla (τ)

La fórmula siguiente define al módulo cortante como la fuerza tangencial por unidad de área, es decir, es la fuerza necesaria para desplazar una capa de un fluido respecto de otra (ver figura 2.1). Las unidades de esta magnitud se dan en *dinas/cm²* [6].

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \quad (2.1)$$

Donde:

F es la fuerza

A representa el área

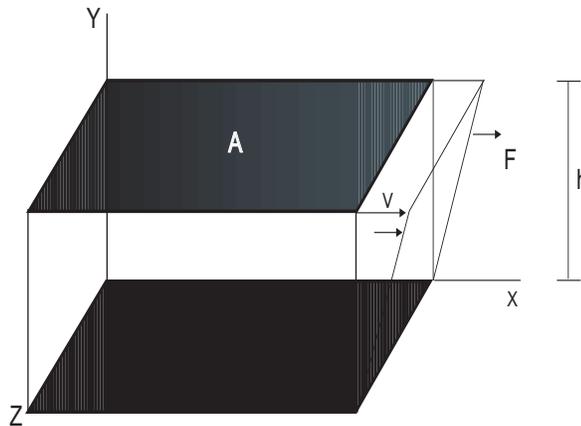


Figura 2.1: Representación gráfica de la deformación de un fluido al estar sometido a un esfuerzo cortante [6].

Como ejemplo de la información que puede obtenerse al estudiar el módulo cortante en fluidos MR, observemos las figuras 2.2 y 2.3, donde se muestra la variación del módulo cortante y la viscosidad aparente, respectivamente, en un sistema MR a base de hierro y aceite de silicona. La viscosidad aparente es definida como la división entre el módulo cortante y la velocidad de deformación. El sistema ahí estudiado es un fluido MR que contiene partículas de hierro que ocupan una fracción de volumen $\phi = 0.4$. Cuando se aplica una densidad de flujo $B = 1 T$ se incrementa la tensión y la viscosidad aparente por arriba de tres órdenes de magnitud.

Cuando el campo es nulo ($B = 0$), el fluido es un plástico de Bingham con una viscosidad de $250 Pa$ a una temperatura de $23^\circ C$ y presenta un módulo de cedencia de aproximadamente $50 Pa$. Con una aplicación de densidad de flujo de $1.0 T$, el módulo de cedencia incrementa a $\sim 100kPa$. El fluido presenta un comportamiento pseudoplástico, esto significa que presenta un decremento en la viscosidad aparente y un incremento en el módulo cortante a medida que aumenta la velocidad de de-

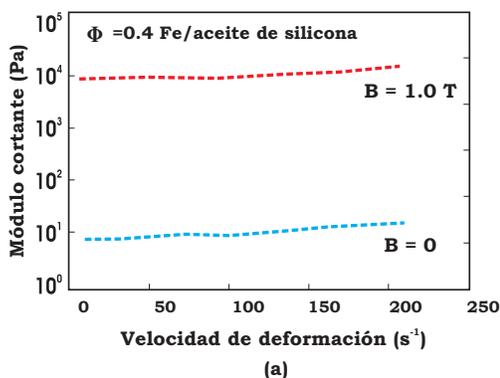


Figura 2.2: Variación del módulo cortante como función de la velocidad de deformación [24].

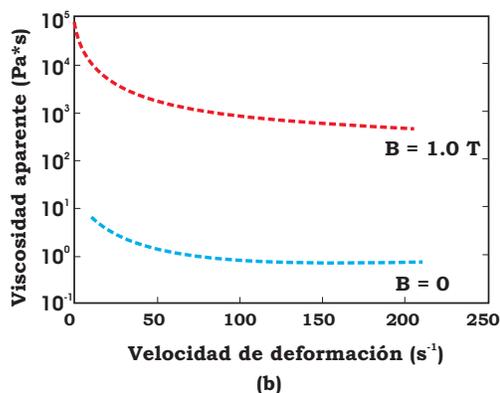


Figura 2.3: Variación de la viscosidad aparente como función de la velocidad de deformación [24].

formación, para todos los campos aplicados [24].

Velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$)

Se define como el cambio de velocidad v , a través de la distancia h , entre dos placas. Las unidades son $1/\text{segundo}$. La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad de la placa superior aumenta y la distancia entre las dos placas se hace más pequeña. El fluido entre las placas resiste el movimiento de la placa superior y esta resistencia al flujo es determinada por la viscosidad del fluido (η). La velocidad de deformación se define matemáticamente como:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh} \quad (2.2)$$

La figura 2.1 muestra un fluido sometido a una deformación simple entre dos placas paralelas. La placa inferior es estacionaria, mientras que la placa superior se mueve a una velocidad v , como consecuencia de una fuerza F aplicada al mismo [6].

Cuando un material se somete a una variación de velocidad de deformación durante un proceso, es esencial conocer la viscosidad que genera a esta velocidad de deformación. Por lo que es conveniente hacer mediciones de viscosidad tomando en cuenta rangos de velocidades de deformación, esto para detectar comportamientos reológicos que puedan alterar un proceso o uso. Algunos ejemplos de materiales

que son sometidos a estas observaciones debido a que son afectados por diferentes velocidades de deformación cuando son utilizados durante un proceso son: pinturas, cosméticos, líquidos de látex, la sangre en el sistema circulatorio humano, entre otras.

Viscosidad (η)

La viscosidad, como se mencionó en el capítulo 1, es uno de los principales parámetros reológicos que serán objeto de estudio para poder determinar posibles aplicaciones. El valor de la viscosidad está determinado por la relación de corte aplicado y la velocidad de deformación a la que se somete el fluido [6], matemáticamente esto es:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

Donde:

η es la viscosidad

τ es el módulo cortante

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación

2.1 Reómetros

El reómetro es el instrumento utilizado para la obtención de los parámetros reológicos de los fluidos MR, con él se miden y cuantifican de manera electrónica estos parámetros, que son resultantes del comportamiento de microestructuras no perceptibles a simple vista de materiales y fluidos.

Los reómetros son conocidos o identificados por factores geométricos característicos, los más usuales son de cono y plato (A), platos paralelos (B), cilindros concéntricos (C) y los de capilar (D) (veáse fig 2.4).

De acuerdo a su utilización encontramos reómetros para el control de calidad y reómetros para el desarrollo de investigación. Los primeros tienen un principio de funcionamiento más simple, ya que son fabricados para cumplir con los requerimientos de un proceso industrial predeterminado, por lo que su velocidad de corte de igual manera ya fue previamente establecida para determinadas características. Los reómetros utilizados para fines de investigación son instrumentos con una mayor complejidad en su funcionamiento debido a que la velocidad de corte puede ser manipulada y definida para la obtención de valores bajo diferentes rangos de la

misma; además que se pueden analizar diferentes sustancias [6].

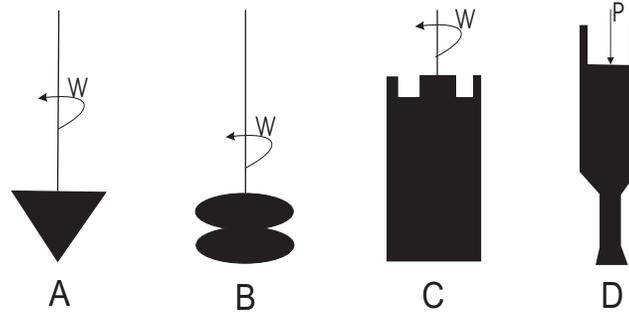


Figura 2.4: Representación gráfica de los diferentes tipos de reómetros [6].

La utilización del tipo de reómetro varía de acuerdo a los requerimientos del proceso que se quiere analizar, en algunos casos es necesario usar varios de ellos. Por ejemplo, en la observación del comportamiento reológico en pinturas, las muestras son sometidas a una amplia gama de velocidades de deformación, desde aquellas que son extremadamente pequeñas hasta las relacionadas con los diferentes tipos de aplicación que son considerablemente mayores.

La medida de la viscosidad efectiva de un fluido MR en presencia de campo magnético se hace mediante la utilización de reómetros modificados para incluir el campo magnético. La precisión de los datos arrojados por el reómetro determinará el grado de confiabilidad de un sistema basado en estos fluidos.

Una característica importante a tomarse en cuenta al realizar mediciones de viscosidad en fluidos MR es su alta anisotropía; se observa que al realizar la medición de la viscosidad en un fluido MR en una posición paralela al campo aplicado, no se presentan valores considerablemente distintos a la lectura tomada en ausencia de campo; por el contrario, al realizar mediciones transversales al campo, se observan cambios notables. Una vez seleccionado el instrumento y considerando la anisotropía del sistema se debe seleccionar un método para medir la viscosidad. Uno de ellos consiste en variar la velocidad de deformación y obtener la fuerza resultante, estos instrumentos son llamados de deformación controlada. Un segundo método consiste en aplicar una fuerza controlada a la muestra y medir la deformación que resulte, este diseño es especial para mediciones a muy bajas velocidades de deformación [6]. En este trabajo utilizamos el primer método.

Los reómetros *tubulares* tienen la capacidad de medir mezclas con partículas de mayor tamaño comparadas con las recomendadas para los rotacionales (de placas paralelas o de cono y placa); los problemas más frecuentes con este tipo de reómetros es el resbalamiento de la mezcla. La degradación de materiales estructuralmente sensitivos puede ser minimizado con el uso del viscosímetro de mezcla. Los de tipo capilar de alta presión operan a altos gradientes de deformación, pero generalmente presentan problemas de corrección de presión en los extremos, este reómetro sólo permite una sola pasada del material a través del instrumento.

Los reómetros *rotacionales* pueden operarse a una velocidad angular constante (esfuerzo estacionario) o en forma oscilatoria (dinámica). Algunos de ellos trabajan a esfuerzo o tensión controlada facilitando la investigación del umbral de fluencia y en la colección de datos de relajamiento. Los instrumentos rotacionales generalmente se usan para realizar investigaciones sobre tixotropía.

Los sistemas de placas paralelas y los de cono y plato son comúnmente utilizados para la medición de bajos gradientes y los cálculos a realizar son simples, cuando el ángulo del cono es relativamente bajo. El sistema de cono y plato aplica una velocidad de deformación uniforme a toda la muestra, aunque presenta algunos problemas como los efectos de borde y efectos resultantes de la fuerza centrífuga [6].

2.2 Sistema de reometría Brookfield

El tipo de reómetro utilizado para las mediciones de los parámetros reológicos y el análisis de las características de los fluidos MR en este trabajo de investigación, es el Brookfield LVDV-III Ultra de cono-plato. El reómetro Brookfield es un reómetro tipo rotacional de esfuerzo estacionario y se utiliza comúnmente para control de calidad, es utilizado para mediciones a bajas velocidades de corte. El reómetro programable genera resultados del módulo cortante, velocidad de deformación y de la viscosidad [25].

El Reómetro LVDV-III Ultra consta de una base sobre la cual se apoya toda la estructura; un cono, con características particulares para el uso que se desee dar; un plato o contenedor de la mezcla, los mecanismos electrónicos de control y procesamiento de información; además de otros accesorios de ensambles y adicionales (ver figura 2.5).

Baño Refrigerante. Dado que la viscosidad es una cantidad física que depende sensiblemente de la temperatura, es necesario realizar las mediciones de la viscosidad a una temperatura dada y estable, es decir, necesitamos controlar la temperatura

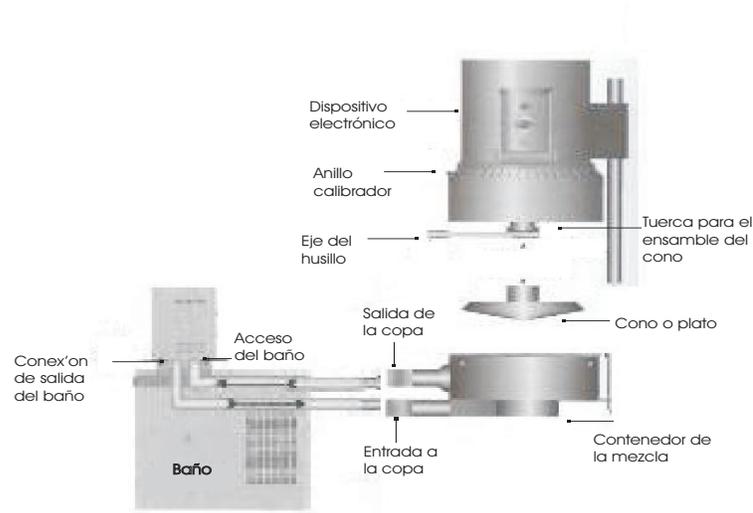


Figura 2.5: Representación gráfica de las principales partes del reómetro LVDV-III Ultra de Brookfield. También se muestra la conexión a un baño térmico [25].

para que las mediciones sean repetibles. Para ésto se emplea un baño refrigerante TC-6021 de Brookfield el cual nos permite un control de la temperatura con una precisión de ± 0.1 °C. Emplea como refrigerante agua desionizada que se hace circular a través del plato por medio de dos mangueras de hule (veáse la figura 2.6). Antes de realizar las mediciones se permite que la muestra esté en contacto térmico con el baño refrigerante durante 3 minutos, con el fin de permitir que la muestra alcance el equilibrio térmico [25].

Las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para el cálculo de los parámetros reológicos utilizando la geometría de cono y plato [25]:

Velocidad de deformación (seg^{-1})

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{sen\theta} \quad (2.4)$$

Módulo cortante ($dinas/cm^2$)

$$\tau = \frac{M}{\frac{2}{3}\pi r^3} \quad (2.5)$$



Figura 2.6: Detalle del baño térmico y el plato del reómetro.

Viscosidad (poise)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

Donde:

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación

τ es el módulo cortante

η es la viscosidad

ω corresponde a la velocidad angular de la aguja (*rad/seg*)

θ es el ángulo del cono que está dado en grados

M fuerza de torque

r es el radio del cono (*cm*)

El principio de operación del reómetro Brookfield LVDV-III Ultra consiste en un sistema electrónico que recibe y procesa las señales emitidas por un sensor unido al cono, el cual se sumerge en el fluido de prueba. Se mide la viscosidad del fluido a través de la resistencia que éste presenta ante el movimiento rotacional del cono y es medida por la deflexión que ocurre en un resorte calibrado. La deflexión del resorte es medida con un sensor rotatorio. El rango de medidas de viscosidad que se presenta el reómetro está dada en centipoises (*cP*) y está determinada por la velocidad de rotación de la aguja, el tamaño y forma de la misma, el contenedor donde la aguja se introduce y de la escala total de torque del resorte calibrado [25].

Para obtener resultados certeros se debe calibrar el reómetro utilizando aceite de viscosidad estándar, en el presente trabajo utilizamos el aceite estándar de Brook-

field con 95.2 cP a 25°C ± 0.10%.

Velocidad (rpm)	Tiempo (seg)
1	150
1.5	120
2	120
3	90
5	60
7	50
10	30

Tabla 2.1: Tiempo utilizado para la toma de mediciones de acuerdo a la velocidad de deformación (ver texto).

Los parámetros resultantes de la medición se despliegan en la pantalla del reómetro. Es importante señalar que se recomienda esperar un tiempo determinado para cada velocidad de deformación (rpm) antes de tomar la lectura para permitir que la mezcla responda y alcance un equilibrio de acuerdo a cada rpm. En la tabla 2.1 se indica el tiempo de espera que hemos asignado para algunas de las velocidades de corte utilizadas.

Todas las unidades de medida que se despliegan en la pantalla pueden ser en el sistema inglés (cgs) o en el sistema internacional (SI). En la presente investigación se utilizó el sistema de medida cgs.

PARÁMETRO	cgs	SI
Viscosidad	Centipoisse (<i>cP</i>)	milli.Pascal.Segundo (<i>m.Pa.s</i>)
Módulo cortante	<i>Dinas/cm²</i>	<i>Newton/m²</i>
Velocidad de deformación	<i>1/seg</i>	<i>1/seg</i>
Torque	<i>dinas · cm</i>	<i>N · m</i>

Tabla 2.2: Sistema de unidades disponible en el reómetro Brookfield [25].

2.3 Diseño del solenoide

El viscosímetro descrito no incluye accesorios para mediciones con campo magnético, por lo tanto, fue necesario diseñar un solenoide para generar el campo magnético en nuestros experimentos, con la particularidad de que debe generar una región de

campo constante en donde se coloca la muestra.

Para calcular las dimensiones del solenoide que se utilizó para la aplicación del campo magnético, se consideraron las dimensiones del dispositivo electrónico y del contenedor de la mezcla, la longitud total entre ambos es de 15.5 cm . Se consideró también que el contenedor de la mezcla tiene un diámetro externo de 6.3 cm (lugar donde se deposita el fluido MR). Además, se debió tomar en cuenta un par de tubos que salen del contenedor y están conectados por medio de mangueras al baño térmico y que permiten que la muestra esté a una temperatura estable, otro elemento que se consideró fue el sujetador que sostiene al contenedor y lo une con el dispositivo electrónico, este sujetador ocupa un espacio de 0.9 cm de forma horizontal. Después de las consideraciones anteriores, se construyó un solenoide con las características que se muestran en la figura 2.7 y puede observarse físicamente en la figura 2.8.

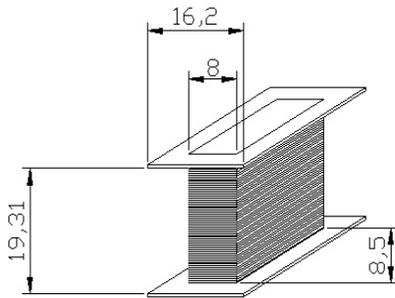


Figura 2.7: Dimensiones del solenoide usado para el sistema de reometría con campo magnético.



Figura 2.8: Fotografía del solenoide construido.

Como sabemos, el campo magnético producido por un solenoide puede considerarse prácticamente constante en la región central del mismo y es paralelo al eje axial del solenoide [26].

Para calcular el campo modelamos nuestro solenoide de longitud finita, en primera aproximación, como un solenoide de longitud infinita. Usamos la Ley de Ampere sobre un circuito rectangular C , orientado paralelamente al eje axial (véase figura 2.9).

En la aproximación de solenoide infinito, el campo magnético fuera de él es cero; en el interior el campo es paralelo al eje axial. La Ley de Ampere establece que [27]:

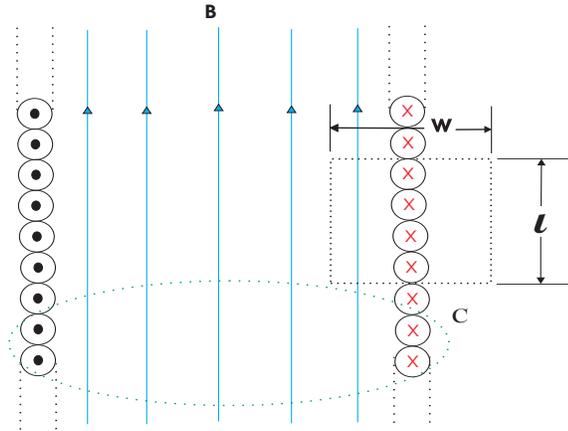


Figura 2.9: Vista de la sección transversal de un solenoide infinito. El campo en el interior es uniforme y en el exterior es cero.

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 i' \quad (2.7)$$

Donde:

$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl}$ es una integral de trayectoria del campo magnético sobre el circuito C

μ_0 es la permeabilidad magnética

i' es la corriente encerrada por el circuito

Resolviendo la integral, considerando lo mencionado en el párrafo anterior y suponiendo que el largo del circuito C es l tenemos que:

$$\oint B \cdot dl = Bl = \mu_0 i' \quad (2.8)$$

La corriente encerrada es:

$$i' = nli \quad (2.9)$$

Donde:

n son vueltas por unidad de longitud

i es la intensidad de corriente

Sustituyendo 2.9 en 2.8 y simplificando, tenemos que:

$$B = \mu_0 n i \tag{2.10}$$

Aplicando una diferencia de potencial de 50 V a nuestro solenoide y considerando que la resistencia es de 13.17 Ω, obtenemos un valor de la corriente:

$$i = \frac{V}{R} = 1.5A \tag{2.11}$$

Volviendo a la expresión de 2.10, sustituyendo, $i = 1.5A$, $n = 1500$ vueltas/m, obtenemos un valor de $B = 0.203$ G

Distancia a partir de la base (cm)						Voltaje (V)	Intensidad de corriente (Ampere)
0	4	8	12	16	20	0	0
0.026	0.044	0.052	0.048	0.04	0.028	10	0.6
0.053	0.085	0.101	0.092	0.068	0.03	20	1.2
0.086	0.124	0.145	0.137	0.104	0.05	30	1.75
0.113	0.154	0.19	0.182	0.133	0.068	40	2.26
0.132	0.196	0.228	0.22	0.161	0.078	50	2.73

Tabla 2.3: Campo generado por el solenoide a diferentes medidas respecto de uno de sus extremos.

El solenoide finito genera un campo magnético que puede considerarse constante en su región central, pero disminuye en los extremos [28]. En la tabla 2.3 se exponen los valores del campo a una determinada distancia con una cantidad de voltaje aplicado, esto en el solenoide que construimos.

En la figura 2.10 observamos la gráfica de los valores del campo magnético conforme nos alejamos de la región central, esto para un voltajes de 10, 20, 30, 40 y 50 V. En la región central se obtiene el valor máximo del campo que es de 0.22 kG, con una tolerancia de alrededor de 3 cm de esta área. En la figura 2.11 podemos observar al reómetro y el solenoide preparados para tomar medidas.

Para realizar las mediciones correspondientes se coloca el solenoide y se baja el tubo del reómetro hasta que se encuentre en la región central. Para asegurar que

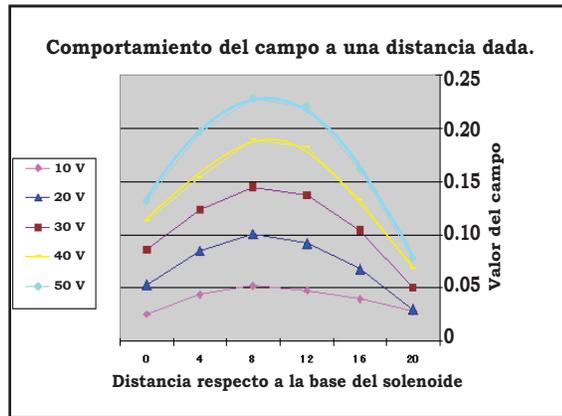


Figura 2.10: Valores de campo magnético generados por el solenoide a diferentes distancias y voltajes aplicados.

las condiciones sean semejantes entre prueba y prueba se mide la separación entre la caja electrónica del reómetro y el borde superior del solenoide, esta separación es de 8.3 cm (veáse la figura 2.11).

De este modo, al reómetro Brookfield le fue adaptado un solenoide, necesario para la medición de los parámetros reológicos de un fluido MR bajo la acción de un campo magnético. Este sistema de reometría con campo magnético se utilizará para el análisis de los cambios reológicos que sufre el fluido MR que hemos preparado a base de magnetita mineral. La forma de preparar el fluido y los resultados del estudio de la reología se presentan en el capítulo siguiente.



Figura 2.11: Sistema de reometría con campo magnético. Se muestra el solenoide y el reómetro acoplados. También se muestra el baño térmico y las fuentes de voltaje.

Capítulo 3

Estudio de propiedades físicas

En este capítulo se estudian las propiedades reológicas de un fluido magneto-reológico a base de partículas de magnetita dispersas en un líquido portador. Se realizan estudios bajo diferentes condiciones de campo magnético aplicado, velocidad de corte, concentración y tamaño de partículas. Para su estudio se usó el sistema experimental descrito en el capítulo anterior donde se controla la temperatura. También se estudia el módulo de cedencia, de manera indirecta a través de extrapolaciones del módulo cortante a bajas velocidades de deformación.

Obtención del material. El material magnético usado para estos estudios es magnetita mineral extraída de la arena común por medio de un imán. Este material se lava y luego con ayuda de un imán se procede a separar el material de las impurezas. Las partículas son relativamente grandes, alrededor de $500 \mu m$, lo que significa que son notablemente más grandes que el tamaño considerado como óptimo para la preparación de fluidos MR. Las partículas son sometidas a un proceso de reducción de tamaño por medio de molienda mecánica. Para moler el material se usó un molino de bolas de acero *Boston Gear W8-94*, que consiste en un cilindro de acero de 10 cm de diámetro en el cual se colocan balines de acero y el material que se desea triturar (ver figuras 3.1 y 3.2).

En las muestras que se prepararon se realizó el siguiente procedimiento: en un el cilindro se colocan balines, 25 gr de magnetita y se agregan 3 ml de alcohol, se cierra herméticamente y el cilindro se coloca sobre rodillos. Para obtener nuestras muestras es necesario fijar el tiempo, denominado tiempo de molienda, durante el cual funcionará el molino a una velocidad de rotación constante de 1750 rpm . Este tiempo, así como la cantidad de material a moler y el alcohol, determinan el tamaño de partícula.

Las muestras posteriormente son lavadas y con ayuda de un imán se elimina la mayor parte de sílice que queda en suspensión y que es una impureza común de la



Figura 3.1: Detalle del cilindro donde se vierte el material a moler. También se observan los balines.

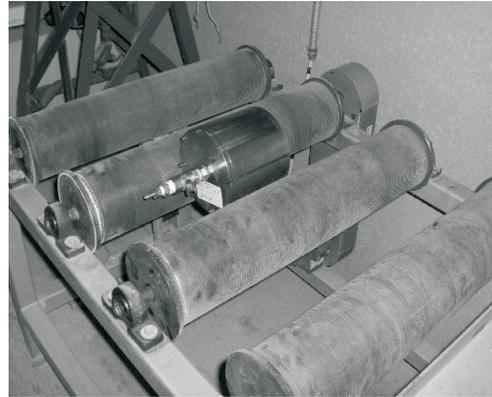


Figura 3.2: Detalle del sistema de rotación que hace girar el molino de bolas.

magnetita. Usando una parrilla se logra eliminar los restos de agua empleada para el lavado, la muestra se retira cuando las partículas están completamente secas. Finalmente las partículas son extendidas en una hoja de papel limpio y con ayuda de un imán se realiza el último proceso de selección. Se prepararon muestras para los siguientes tiempos de molienda: 2.5, 8, 30, 45 y 60 minutos.

La metodología utilizada para la elaboración de las muestras que se estudiaron bajo diferentes condiciones se describen en cada sección. Posterior a la preparación de la mezcla, se vierte la dispersión en el plato del reómetro teniendo precaución de que no salpique las paredes o salga del plato. Se coloca el plato en el reómetro y se coloca el solenoide como se indicó en la sección 2.3 (véase figura 2.11).

Una vez que el plato y el solenoide son colocados, se espera 3 minutos para iniciar la prueba, permitiendo que la dispersión alcance el equilibrio térmico. Las pruebas se realizaron a diferentes rpm, aplicándolas siempre de manera ascendente. Se acciona el reómetro, se selecciona la velocidad de corte y se espera a que transcurra el tiempo recomendado indicado en la tabla 2.1. Se toman las medidas que el reómetro proporciona, estas primeras medidas son a 0 V, es decir, en ausencia de campo magnético. A continuación, se acciona la fuente de voltaje y se aplica el primer voltaje de 5 V, después del tiempo recomendado se toman las nuevas medidas de cada parámetro reológico (ver tabla 2.1). Lo anterior se repite a intervalos de 5 V, cuidando de no pasar de un valor de 100% en el rango del torque, ya que si ocurre ésto, las lecturas están fuera del rango del reómetro y las lecturas que muestra el reómetro son indefinidas. Si el valor de torque mostrado en la pantalla es menor

al 10%, los valores de los parámetros reológicos no pueden tomarse como confiables para el experimento, lo recomendable es tomar los valores centrales de cada rango de acuerdo a las rpm [25].

3.1 Reología del sistema en función del campo a concentración fija

Para el estudio de esta sección, las muestras son elaboradas a concentración fija, provenientes de partículas de una misma molienda (60 minutos). En estos experimentos se varía el campo magnético. Se tomó una muestra de la molienda para ser observada en el microscopio y obtener el valor aproximado del tamaño de partícula (véase figura 3.3).

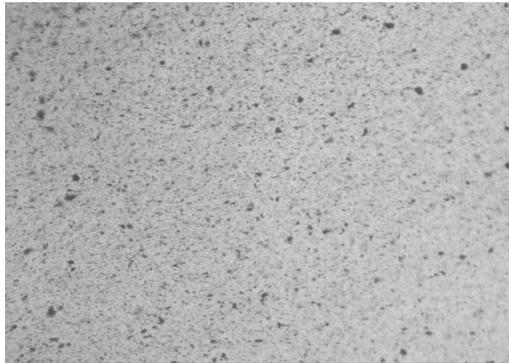


Figura 3.3: Partículas provenientes de la molienda de 60 minutos, el tamaño promedio de partícula es de $19.1 \pm 3.4 \mu m$.

Se midió la viscosidad del aceite estándar, para ello se usó 2 ml del mismo y el cono No. 41 a una temperatura de 20°C, obteniendo una viscosidad de 95.2 cP. El procedimiento de preparación de las muestras MR consistió en tomar 10 ml de aceite estándar que se vierte en un vaso de precipitado y se le agrega la cantidad necesaria de magnetita para obtener una concentración masa-volumen dada. En nuestro caso, utilizamos concentraciones desde 0.1 gr hasta 1 gr dispersos en 10 ml de líquido portador. El sistema fue sometido a agitación constante durante 30 minutos usando un agitador de aspas. De la dispersión elaborada se toma una muestra de 2 ml y se vierte en el plato del reómetro. Posteriormente se sigue el procedimiento para accionar el reómetro y el baño térmico, se nivela el reómetro, se realiza el procedimiento de auto-ajuste y se procede a la toma de mediciones [25].

Para una dispersión con una concentración de 0.3 gr de Fe_3O_4 en 10 ml de líquido se puede observar que el valor de la viscosidad a campo cero es casi la misma que la correspondiente a la del líquido portador puro (ver gráfica 3.4). Es decir, la inclusión de las partículas provoca un ligero aumento en la viscosidad, aún en ausencia de campo magnético. Ésto es de esperar ya que las partículas, más densas que el líquido portador, dificultan el movimiento relativo entre las diferentes capas del fluido debido al carácter inercial de las partículas.

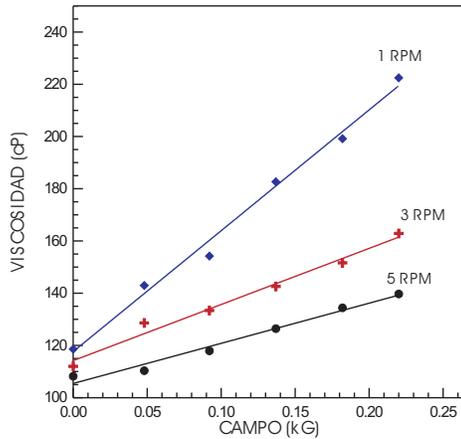


Figura 3.4: Gráfica de viscosidad bajo la acción del campo magnético (concentración 0.3 gr magnetita/ 10 ml de aceite de silicona). Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.

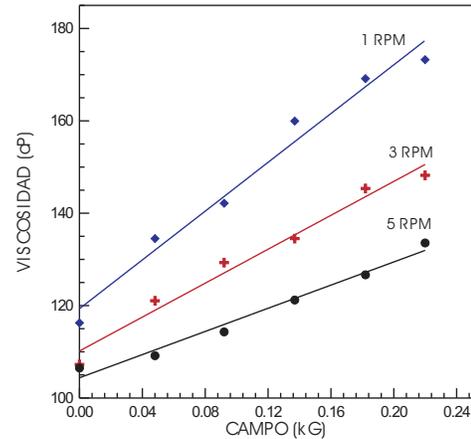


Figura 3.5: Comportamiento de la viscosidad bajo un campo magnético (concentración 0.1 gr magnetita/ 10 ml de aceite de silicona). Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.

A continuación se analiza el comportamiento de la dispersión MR al aplicar un campo magnético manteniendo la concentración y la velocidad de deformación constante. En la figura 3.4 se muestran resultados para 3 diferentes velocidades de deformación. Observamos un incremento monótono de los valores de la viscosidad al aumentar el campo magnético. A un campo de aproximadamente 0.22 kG observamos un incremento de la viscosidad hasta llegar a 210 cP , aproximadamente el 200% del valor original de 120 cP . Para el rango de mediciones realizados la relación puede considerarse lineal. Debemos hacer notar que el valor del campo alcanzado es sólo una fracción del campo considerado como óptimo, y aún así nos permite identificar el comportamiento de nuestro sistema a bajas concentraciones.

Para una velocidad de deformación de 3 rpm se observa un comportamiento

similar al observado a 1 rpm, excepto que el valor de la pendiente es menor, es decir, los incrementos son menores siendo el valor máximo cercano a 160 *cP*. Lo mismo sucede para una velocidad de corte de 5 rpm donde los cambios son aún menores siendo 125 *cP* el valor máximo representando el 131% del valor original.

Observando las gráficas podemos obtener algunas conclusiones generales: dado un valor de campo magnético la viscosidad medida disminuye con el aumento de la velocidad de deformación. También se observa que los cambios son más notables al aplicarse valores mayores de campo magnético. Para valores del campo superiores a 150 *G* se observa que las diferencias son mayores entre las gráficas correspondientes a 1 rpm y 3 rpm que entre las correspondientes a 3 rpm y 5 rpm. Esta observación es indicativo de que los valores más altos de viscosidad se obtienen a velocidades de deformación pequeñas. Es probable que los factores que determinan los cambios de la viscosidad, específicamente la formación de estructuras, dependan de la velocidad de deformación. Dado que la viscosidad está relacionada con el esfuerzo necesario para formar y reformar las estructuras en forma de cadenas, podemos proponer la hipótesis de que la formación y reformación de estructuras es más difícil a mayores velocidades de corte y por tanto, los cambios que pueden producirse por efecto del campo son menores.

Para una concentración menor, a 1 *gr* de Fe_3O_4 en 10 *ml*, se observa un comportamiento general similar al descrito para una concentración de 0.3 *gr/10 ml*; sólo que los cambios que se experimentan en la viscosidad son menores (véase figura 3.5). Para una velocidad de 1 rpm la viscosidad máxima alcanzada es aproximadamente 180 *cP*, comparado con la viscosidad correspondiente a la dispersión de 0.3 *gr/10 ml* que es cercana a los 210 *cP*, claramente notamos que el cambio es menor. También observamos que la diferencia entre las gráficas correspondiente a 1 rpm y 3 rpm presentan una diferencia mayor que las correspondientes a 3 y 5 rpm aunque un poco menor que en el caso de mayor concentración.

En la figura 3.5 podemos observar que al retirar el campo magnético de la muestra, después del tiempo considerado para la toma de mediciones con campo, los valores de viscosidad arrojados indican un aumento de la misma; el valor es mayor al obtenido antes de aplicar el campo, este fenómeno se debe al principio de remanencia magnética que mantiene unidas algunas de las cadenas de partículas de magnetita.

En otros estudios se ha analizado la clase de estructuras que forman las partículas cuando son sometidas a un campo magnético (ver figura 1.6). Para bajas concentraciones se observa la formación de estructuras como cadenas orientadas en la dirección del campo. Al aumentar la concentración se espera la formación de mayor

de número de cadenas. Experimentalmente se observa esta formación, la cual es inmediatamente seguida de una agregación de ellas para formar agregados aún más grandes y complejos [21]. Por lo que se espera que el aumento de concentración de partículas implique un aumento en la viscosidad.

En la figura 3.6 se grafica el comportamiento del *módulo cortante* contra la viscosidad para varios valores del campo magnético, se observa una relación prácticamente lineal cuya constante de proporcionalidad varía para las diferentes velocidades de corte siendo mayor la pendiente mientras menor sea la velocidad de deformación. Este comportamiento está relacionado con el observado en la gráfica corroborando lo que se dedujo en el análisis de la figura 3.2.

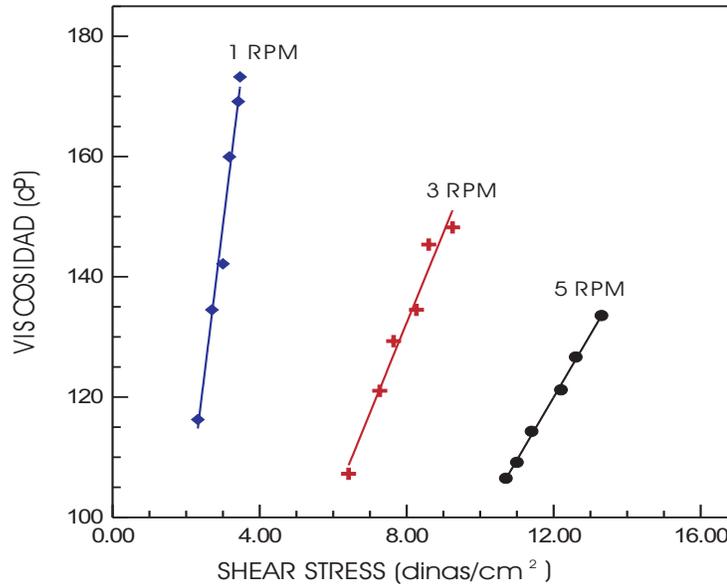


Figura 3.6: Comportamiento de la viscosidad frente al módulo cortante. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.

3.2 Reología del sistema en función del tamaño de partícula

Uno de los aspectos de gran interés en el estudio de fluidos MR es el estudio del efecto del tamaño de las partículas sobre la viscosidad. Este aspecto no ha sido ampliamente explorado, como muestra es la escasa bibliografía que existe relacionada con el tema [29]. Ésto radica en la dificultad de obtener partículas magnéticas homogéneas y en un amplio rango de tamaños. Nosotros utilizaremos partículas de

diferentes tamaños que han sido obtenidas por molienda mecánica, cabe mencionar que son altamente polidispersas. En otros estudios se podría analizar el efecto de la polidispersión.

Consideramos cinco tamaños diferentes de partículas asociados a muestras que provienen de moliendas con diferente tiempo de duración. Los tiempos que se consideraron para las moliendas son de 2.5, 8, 30, 45 y 60 minutos. Para cada una de ellas se realizaron experimentos para observar su comportamiento con el campo magnético y con la velocidad de deformación.

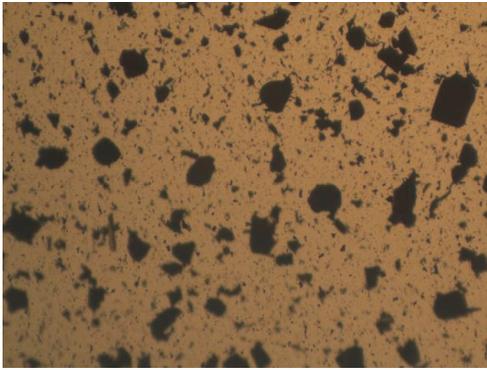


Figura 3.7: Partículas obtenidas de una molienda de 2.5 minutos con un tamaño promedio de partícula de $149.9 \pm 41.9 \mu m$.

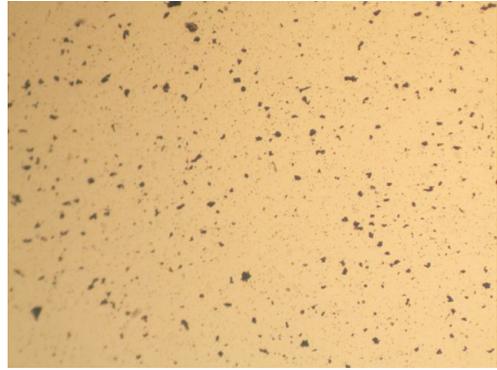


Figura 3.8: Partículas obtenidas de una molienda de 8 minutos con un tamaño promedio de partícula de $126.3 \pm 13.2 \mu m$.

De las partículas obtenidas de las moliendas se tomaron pequeñas muestras para analizarlas bajo el microscopio óptico. Las figuras 3.7 a la 3.10, muestran la estructura física de las moliendas de 2.5, 8, 30, 45 y 60 minutos. En las fotografías se observa el tamaño de las partículas resultante de cada molienda.

Para la realización de los experimentos de esta sección fue necesario modificar la metodología de la preparación de las dispersiones debido a que ahora se emplearon partículas de distintos tamaños producto de cada tipo de molienda. También se modificó el arreglo experimental para medir la viscosidad debido a que por el uso de tiempos de molienda menores obtuvimos partículas más grandes. Fue necesario cambiar la separación cono-plato ajustando la distancia de separación entre los mismos aumentándola a 3 mm en lugar de los $13 \mu m$ que recomienda el fabricante [25].

Para preparar las muestras estudiadas en esta sección se dispersó el material en líquido para frenos *SIQUEM Universal*, ya que mostró resultados satisfactorios y es más accesible en el mercado, así como por su bajo costo. Para cuantificar la

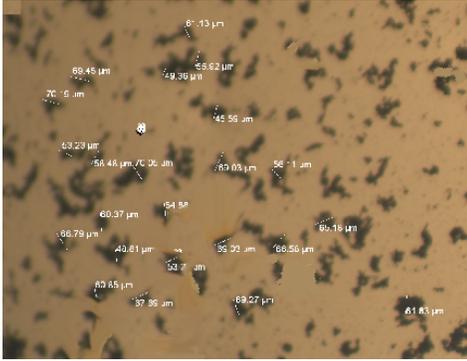


Figura 3.9: Partículas obtenidas de una molienda de 30 minutos, con un tamaño promedio de partícula de $46.5 \pm 10.8 \mu m$.

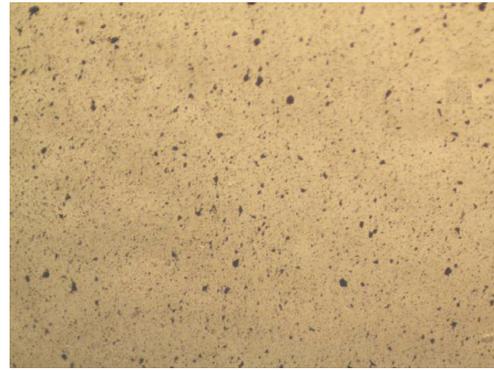


Figura 3.10: Partículas obtenidas de una molienda de 45 minutos, con un tamaño promedio de partícula de $25.5 \pm 4.1 \mu m$.

concentración de las partículas se usó la llamada fracción de volumen. Para preparar un volumen de fluido MR a una concentración dada consideremos que, por definición, la fracción de volumen está dada por:

$$\phi = \frac{V_P}{V_T}, \quad (3.1)$$

Donde:

V_P es el volumen que ocupan las partículas

V_T es el volumen total

ϕ es la fracción de volumen ocupado por las partículas.

Para partículas de densidad ρ el volumen ocupado se encuentra usando $V_P = m/\rho$, sustituyendo en la fórmula anterior tenemos la relación:

$$\phi = \frac{m}{\rho V_T} \quad (3.2)$$

Esta relación nos permitirá saber la masa del material m , necesaria para preparar un volumen V_T de fluido MR, es decir $m = \phi \rho V_T$. La cantidad de líquido portador necesario es $V_T - V_P$.

Para preparar 15 ml de dispersión MR de acuerdo a la fórmula 3.2, a una concentración de $\phi = 0.05$, se usó el siguiente procedimiento. Se pesaron 4.05 gr de magnetita, el material se dispersó en 14.25 ml del aceite de frenos (de viscosidad 6.0 cP). La dispersión se realizó en un vaso de precipitados con ayuda de un agitador

de vidrio, la acción se realiza cuidadosamente para no producir el desprendimiento de partículas de vidrio. Se toman 10 *ml* con una pipeta graduada y se coloca la dispersión en el plato del reómetro.

El volumen de la muestra que se vierte en el contenedor debe ser diferente debido a la nueva y necesaria separación del cono-plato. Para realizar este cálculo medimos el diámetro interno del plato, el cual es 5.3 *cm*, de lo que resulta un área de 22.1 *cm*². Dado que separamos 3 *mm* el cono del plato, el volumen extra es de 8 *ml*, a esto hay que agregar los 2 *ml* que originalmente están considerados como volumen mínimo necesario para realizar pruebas, de acuerdo a las recomendaciones del proveedor cuando se usa el cono No. 41 [25], así pues el volumen total será de 10 *ml*.

Debido a que las partículas magnetizables empleadas son más densas que el aceite, éstas tienden a sedimentarse. Las partículas en un medio viscoso están expuestas al efecto de rozamiento provocado por la viscosidad y a su propio peso; además, están expuestas al empuje, resultado del fluido que desplazan de acuerdo al principio de Arquímedes. Así, las partículas pronto alcanzan una velocidad terminal, la cual depende del tamaño y forma de las mismas. Para los tamaños que manejamos se obtienen tiempos de deposición de varias decenas de minutos. Los experimentos que se llevan a cabo demoran aproximadamente 5 minutos desde que se vierte la dispersión en el contenedor hasta que inicia la prueba, es decir, la medición con campo cero y 2 minutos más para aplicar el campo. Después de comenzar la aplicación del campo magnético la sedimentación se detiene ya que las interacciones magnéticas entre las partículas comienzan a formar cadenas y el comportamiento del fluido ahora depende de éstas. Estas consideraciones justifican que no usemos surfactantes en nuestros sistemas para nuestros estudios. La búsqueda y empleo de surfactantes caen fuera del ámbito de este trabajo.

Se realizan mediciones a velocidad constante del cono y sólo se cambian los valores del campo magnético. Al terminar las mediciones para cada velocidad se retira el plato del interior de la bobina y se separa del dispositivo electrónico para volver a dispersar las partículas y se repiten los pasos del párrafo anterior para cada una de las velocidades en orden ascendente. Se consideran 1, 1.5, 2, 3, 5, 7 y 10 rpm, para las muestras que se analizaron. Se estudió el comportamiento de 5 muestras diferentes con partículas con tiempos de molienda de 2.5, 8, 30, 45 y 60 minutos.

Primero, usando las dispersiones como se describió anteriormente, se realizaron la misma clase de estudios que en la sección 3.1. El comportamiento cualitativo es semejante. Dado que la concentración que usamos es mayor, los valores de la viscosidad alcanzados fueron mayores comparados a los alcanzados con las muestras de la sección anterior. También se estudió el comportamiento variando la velocidad de de-

formación y manteniendo la concentración y el campo constante. Como se esperaba, los valores medidos disminuyen con una velocidad de corte mayor (véase figura 3.11).

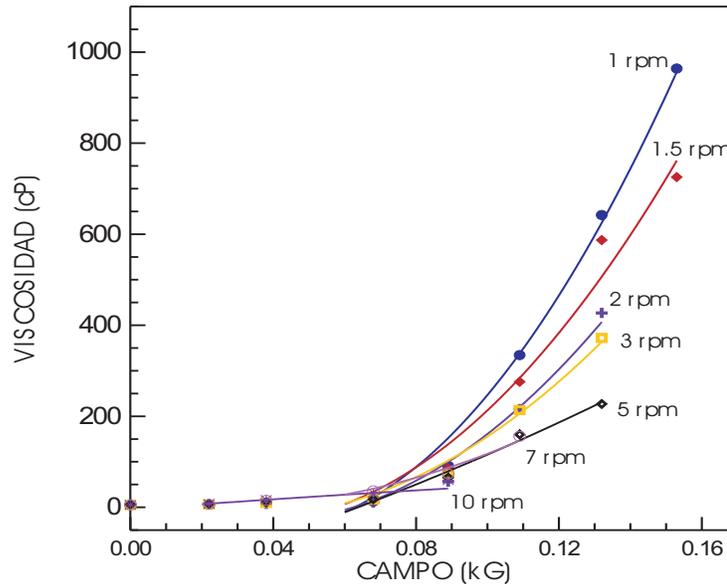


Figura 3.11: Gráfica de viscosidad en función del campo magnético para varias rpm de una molienda de 8 minutos. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.

En esta sección nos interesa comparar el comportamiento de la viscosidad en función del tamaño de las partículas. Para ésto, se realizaron varios experimentos a varias velocidades de corte y usando partículas de diferentes moliendas, posteriormente se comparan los resultados correspondientes a una velocidad fija. En seguida describimos el resultado de las comparaciones.

1 rpm. Para una velocidad de 1 rpm con valores de voltaje de 0, 5, 10, 15 V no observamos aumentos significativos en la viscosidad (véase la figura 3.12). En cambio, para valores del campo asociados a 20 V y en adelante, observamos incrementos notables en la viscosidad cuando se aumenta el campo. Esto quiere decir que, existe un umbral en el campo magnético por encima del cual el sistema experimenta aumentos significativos de su viscosidad. Para voltajes de 35 V se alcanzan valores aproximadamente de 1200 cP considerando que la viscosidad inicial es de 6 cP , entonces tenemos cambios de 20,000%, es decir, 200 veces más grande, más de dos órdenes de magnitud. Para esta velocidad no se notan cambios significativos entre las moliendas.

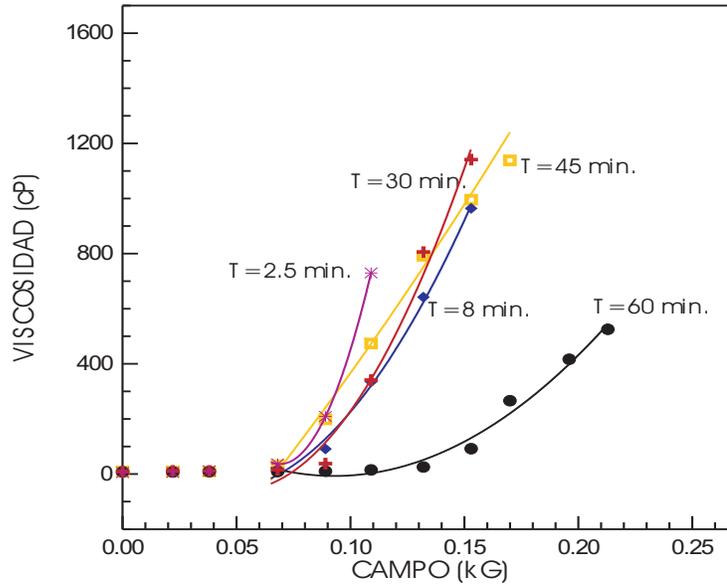


Figura 3.12: Comportamiento de la viscosidad en función del campo para diferentes tiempos de molienda. Todas las mediciones fueron tomadas a 1 rpm. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos.

1.5 rpm. En esta prueba se observa que las moliendas de 2.5, 8 y 30 minutos muestran resultados similares a los de la molienda analizada con 1 rpm, de hecho podemos observar indicios, aunque no contundentes, que mientras mayor sea el tiempo de molienda la curva de viscosidad contra campo está por debajo de las correspondientes a tiempos menores (ver figura 3.13). También observamos que el valor del umbral sigue siendo, aproximadamente, a partir de la aplicación de 15 V. Aquí los valores máximos de la viscosidad están alrededor de 800 cP lo que equivale a 133 veces ó 13,000 %.

2 rpm. Para esta velocidad podemos observar un comportamiento similar, acentuándose un poco más las diferencias en cuanto a la viscosidad en las muestras con partículas con tiempos de molienda más grandes. Los valores más altos de viscosidad son alrededor de 500 cP, 80 veces más que la viscosidad del líquido sin campo. Las muestras asociadas en las moliendas de 45 y 60 minutos no muestran diferencias notables entre ellos.

3 rpm. Para esta velocidad de deformación empiezan a manifestarse diferencias entre las distintas moliendas. Siendo que a mayor tiempo de molienda mayores cambios en la reología que experimentan estos sistemas. Los máximos valores de la viscosidad son de alrededor de 400 cP. Los resultados obtenidos para 5 rpm no

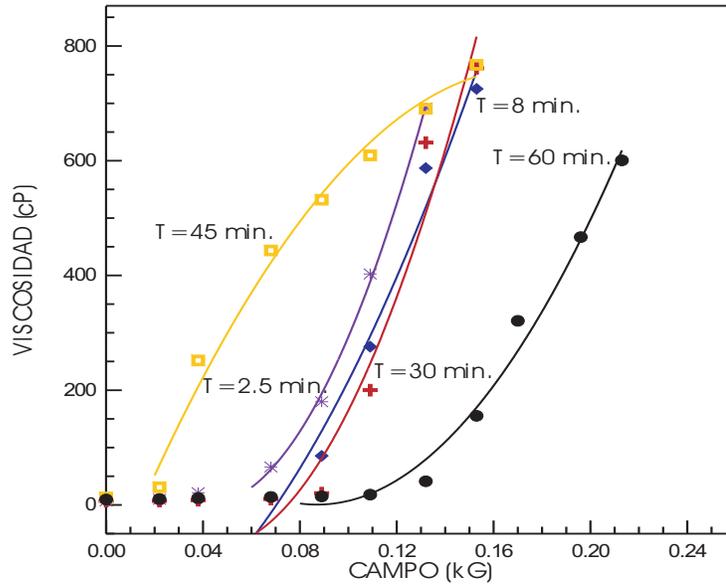


Figura 3.13: Comportamiento del módulo cortante como función del campo magnético para diferentes tiempos de molienda. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos. Datos correspondientes a 1.5 rpm.

siguen un patrón definido y claro.

7 rpm y 10 rpm. Para estas velocidades se observa en la figura 3.14 un comportamiento general bien definido, éste es que, a mayor tiempo de molienda, mayores son los cambios observados en los valores de la viscosidad del sistema MR. Estos cambios se hacen más notorios para voltajes mayores a 10 V. Comparando con mediciones a menores velocidades, observamos que el valor del umbral, a partir del cual se manifiestan claramente los cambios en la reología tiene un valor menor.

La gráfica 3.15 muestra el comportamiento pseudoplástico del sistema, ya que a medida que las rpm disminuyen, el valor de la viscosidad se incrementa. Al aumentar las rpm el valor de la viscosidad se acerca cada vez más a un valor límite pequeño, esto se debe a que se rompen más fácilmente las cadenas formadas en el fluido MR. También se observa que al incrementar el campo magnético la viscosidad también aumenta. En la figura 3.16 se cómo se determina experimentalmente el módulo de cesión a bajas velocidades de deformación.

Los resultados de esta sección soportan las siguientes conclusiones. Para las velocidades de deformación de 7 rpm y 10 rpm se observa que en las muestras de menor tamaño de partículas, los cambios en la viscosidad que experimenta la dispersión

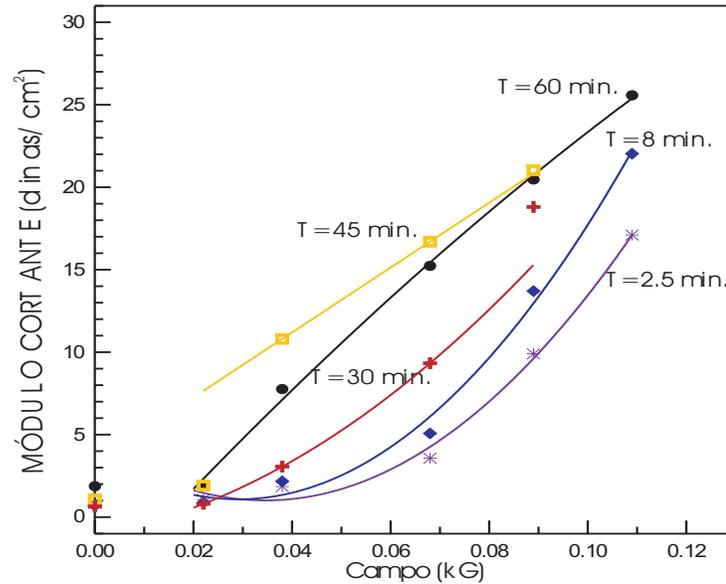


Figura 3.14: Comportamiento del módulo cortante como función del campo magnético para varios tiempos de molienda. Las líneas sólidas representan los ajustes en funciones cuadráticas de los valores originales, representados por puntos. Datos correspondientes a 7 rpm.

son cada vez mayores. Ésto se observa claramente en las figuras correspondientes (ver figura 3.14). En cambio, para velocidades bajas de 1 rpm, 1.5 rpm y 2 rpm, se observa un comportamiento diferente, observamos que a menor tamaño de partícula los cambios son menores (ver figuras 3.12 y 3.13). Ésto significa que a bajas velocidades, las estructuras generadas por las partículas más grandes generan un mayor módulo cortante. Para velocidades mayores se observa lo contrario, o dicho de otra forma, los cambios que experimentan las partículas grandes con la velocidad de deformación son más grandes que los cambios que experimentan las partículas más pequeñas.

3.3 Análisis de resultados

En las secciones anteriores se han analizado los valores de parámetros reológicos arrojados por los experimentos al variar el campo magnético, la concentración de la dispersión o bien variando el tiempo de molienda (tamaño de partícula). Se encontró que al aumentar o disminuir la velocidad de deformación en las muestras MR se presentan cambios en los valores de la viscosidad. Con velocidades de deformación pequeñas, los cambios más notables en cuanto a la viscosidad se presentan a partir de la aplicación un campo de 0.064 kG alcanzando en algunas pruebas valores de

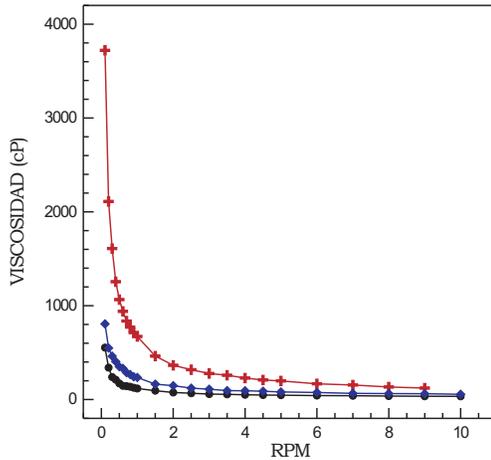


Figura 3.15: Comportamiento de la viscosidad como función de la velocidad de deformación (rpm) para varios voltajes aplicados. La muestra fue preparada usando la molienda de 2.5 minutos. Obsérvese el comportamiento seudoplástico.

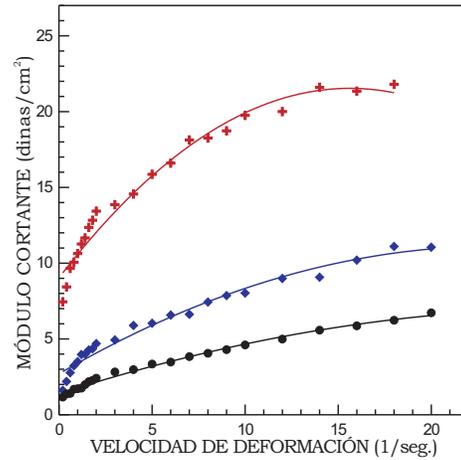


Figura 3.16: Comportamiento del módulo cortante como función de la velocidad de deformación. Obsérvese que los valores tienden a un valor dado para velocidades de deformación pequeñas, este valor es el módulo de cedencia. Datos obtenidos para la molienda de 2.5 minutos con un voltaje de 15, 20 y 25 V.

hasta 1200 *cP*. Al emplear velocidades de deformación grandes (5, 7 y 10 rpm), las muestras del fluido MR comenzaba a sufrir cambios importantes en la viscosidad para campos mayores 0.101 *kG* y alcanzando valores máximos de 120 *cP*. De lo anterior, se observa que a mayor velocidad de deformación disminuye la viscosidad del fluido MR.

El tiempo de respuesta de estas dispersiones MR es del orden de milisegundos posterior a la aplicación del campo, caracterizando a estos fluidos por su rápido nivel de respuesta según se describe en en el marco teórico. Nosotros por limitaciones de equipo no realizamos estudios de tiempo de respuesta. Otro aspecto que debemos resaltar, son los valores de viscosidad elevados que se obtuvieron con una densidad de flujo mínima y una aplicación de voltaje menor a los 50 *V* y con una concentración moderada de ($\phi = 0.05$).

A través de este capítulo se ha mostrado el comportamiento que puede presentar un fluido MR sometido a distintas condiciones de observación y análisis. Los resultados obtenidos no sólo corroboran, en general, los trabajo de investigación mencionados en capítulos anteriores, también de manera específica se analizán en detalle dispersiones con diferentes concentraciones y distintos tamaños de partícula obteniendo resultados interesantes.

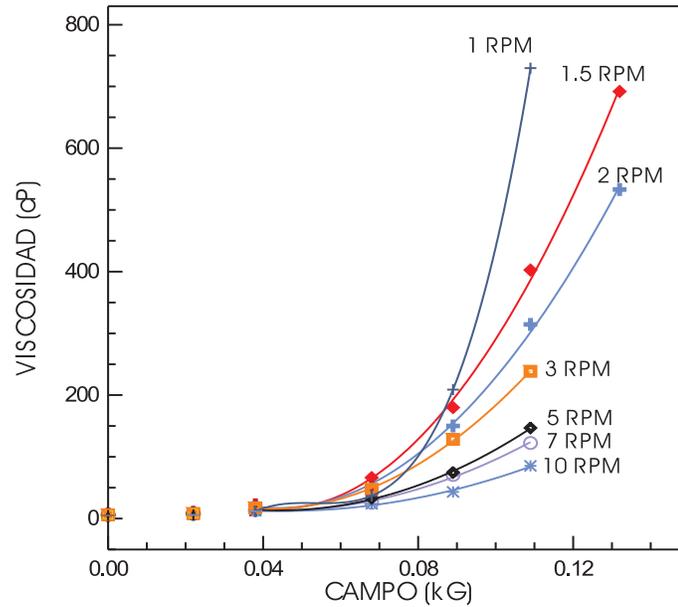


Figura 3.17: Comportamiento de la viscosidad como función del campo magnético para varias velocidades de deformación. Las líneas sólidas representan los ajustes cuadráticos de los valores originales, representados por puntos. Obsérvese el efecto de adelgazamiento.

En el siguiente capítulo realizamos un estudio, mediante simulación numérica, del comportamiento de un modelo simple de amortiguador MR donde bosquejamos cómo podrían usarse los resultados obtenidos en este capítulo.

Capítulo 4

Aplicaciones

Un gran porcentaje de los fluidos utilizados en los procesos industriales pertenecen a la categoría de los no-newtonianos, la gama de aplicaciones abarca desde el uso cotidiano hasta aplicaciones de carácter científico.

El caso de los fluidos MR es una tecnología literalmente nueva, en cuanto a materiales se refiere. La mayor aplicación comercial que se le da a esta tecnología es para contrarrestar movimientos vibratorios, debido a que estos fluidos pueden ser utilizados para regular centenares de vatios de energía mecánica con tan sólo algunos vatios de corriente eléctrica, por lo que el balance energético es una ventaja más a favor de los fluidos MR, si lo comparamos con la utilización de otros métodos, como el hidráulico, piezo-materiales o materiales magnetostrictivos [9].

En los últimos años, la preocupación por crear dispositivos efectivos para la protección de estructuras civiles, ha generado el desarrollo de líneas de investigación en relación a los fluidos MR y algunos ejemplos de esto son los dispositivos utilizados en el Museo Nacional de Japón y el puente Dong Ting en China, estos dispositivos están diseñados para contrarrestar los efectos de terremotos y las ráfagas de viento [30].

Dispositivos más pequeños que los mencionados anteriormente son empleados en autos de carreras. Debido a su calidad de respuesta, estos amortiguadores también han sido implementados en autos Cadillac para ofrecer una mayor comodidad y estabilidad de manejo [30, 31]. En el ámbito automotriz, también hay un gran interés en la aplicación de fluidos MR para cinturones y bolsas de aire, ya que con los fluidos MR se pueden obtener fuerzas de forma rápida y flexible, de igual manera para el diseño de soportes activos para motores que reduzcan la vibración e impidan la propagación del ruido antes que éste entre al vehículo.

Todas las aplicaciones mencionadas anteriormente tienen que ver con el control

de movimientos de masas; sin embargo, las áreas de aplicación de esta tecnología son muy amplias y variadas; su aplicación aún no ha sido extendida en otros aspectos, debido a la falta de estabilidad de los fluidos MR [30].

Estos fluidos han propuesto nuevos retos en el ámbito científico y tecnológico, ya que se ha planteado su uso en el control de las extremidades de robots para lograr movimientos semejantes a los humanos; en la medicina se podrían emplear para practicar en pacientes sintéticos con órganos que estén conformados con fluidos MR y se comporten como los humanos, o bien, en el diseño de prótesis para humanos o animales. De igual manera, se podrían emplear para fabricar textos magnéticos en sistema Braille, que puedan ser leídos, editados y transportados fácilmente [32]. En el campo de la óptica es factible la invención de telescopios con espejos magneto-líquidos que se flexionen y deformen para suprimir el efecto óptico generado por el parpadeo de la luz de las estrellas [30].

Estudios recientes de la NASA han encontrado aplicaciones de los fluidos MR consiguiendo resultados muy favorables y continúan siendo estudiados para continuar explorando el universo, ya sea utilizando amortiguadores en los muelles de las estaciones espaciales, para la regulación del flujo de oxígeno al interior de las estaciones espaciales, para la reducción de la tensión provocada durante la instalación de un nuevo satélite o como amortiguadores de carga en el transbordador espacial, entre otras [30].

Se han diseñado zapatos de tipo industrial que incluyen un sistema de amortiguación que inhibe el efecto de las vibraciones, de la misma manera, pero en el campo del deporte se ha diseñado calzado atlético con esta peculiaridad de amortiguación [33].

4.1 Amortiguamiento de vibraciones a través de un medio viscoso

Como se ha mencionado anteriormente, los fluidos MR tienen la propiedad de cambiar su nivel de viscosidad en tan sólo una fracción de segundo, por lo que estos fluidos son ideales para el control de vibraciones ante diferentes situaciones. A continuación analizaremos el amortiguamiento de vibraciones empleando medios viscosos.

Las cargas dinámicas ocasionadas por el funcionamiento natural de máquinas, equipos, motores y fuerzas externas como el viento, movimientos sísmicos, que afectan a las construcciones civiles, son el origen de grandes problemas debido a las vibraciones que provocan sobre dichos elementos. Estas vibraciones en máquinas

y estructuras generan serias dificultades debido a que aumentan los esfuerzos y las tensiones por las pérdidas de energía que las acompañan; además, son fuente de desgaste de materiales, daños por fatiga y ruidos molestos.

Una vibración es cualquier movimiento que se repite a si mismo en intervalos de tiempo. Cuando ocurren vibraciones en un sistema se presenta la transferencia de su energía potencial a energía cinética y de igual manera de energía cinética a energía potencial alternadamente [34]. Existen diferentes tipos de vibraciones y se pueden clasificar en *vibración libre* que se presenta cuando un sistema es perturbado y se deja de esta manera sin aplicarle una fuerza externa; la *vibración forzada* se da cuando se aplica una fuerza externa al sistema para provocar la vibración; *vibración no amortiguada* es cuando en un movimiento oscilatorio no se pierde energía debido a la fricción o a cualquier otro tipo de resistencia, pero si se presenta pérdida de energía durante el movimiento oscilatorio entonces se dice que es una *vibración amortiguada* [34]. En nuestro caso, nos interesa analizar el comportamiento de las vibraciones amortiguadas empleando un medio viscoso controlado a través de un campo magnético.

La figura 4.1 muestra el comportamiento de un sistema vibratorio sin amortiguamiento, es decir, es un sistema ideal. Aunque en la práctica no existe ningún sistema con estas características, ya que siempre existe alguna fuerza que oponga resistencia al movimiento de un cuerpo, en algunos casos sólo es el rozamiento con el aire.

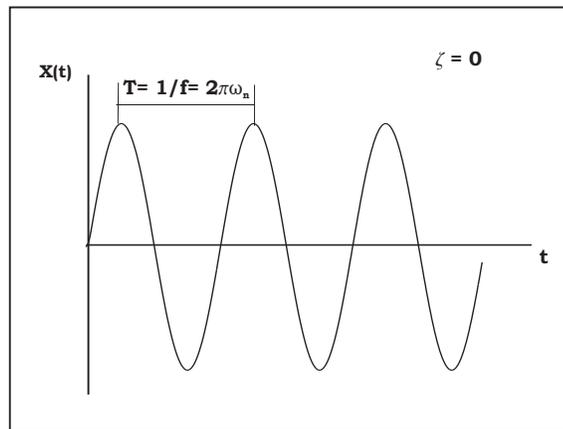


Figura 4.1: Comportamiento de la posición respecto al punto de equilibrio de un sistema oscilatorio sin fricción.

La frecuencia natural de la vibración en este sistema está dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Donde:

ω_n es la frecuencia natural de la vibración (Hz) k es la constante de rigidez del resorte

m es la masa

Un movimiento amortiguado, necesita de un medio que disipe energía, éste puede ser un medio viscoso. Típicamente el sistema se comportará como se muestra en la figura 4.2.

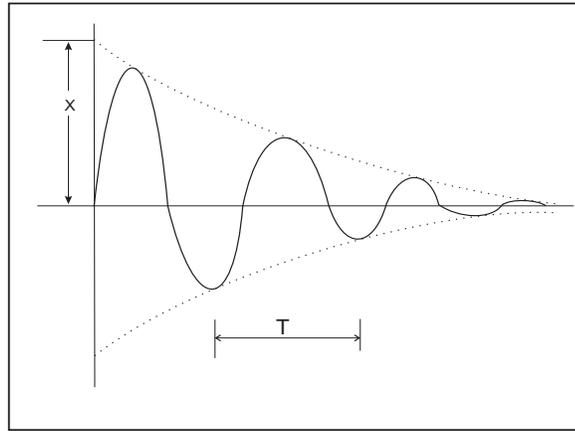


Figura 4.2: Comportamiento de un sistema oscilatorio amortiguado.

Para poder analizar este sistema consideremos el movimiento de una masa, la cual se encuentra suspendida con un resorte, y a un mecanismo de amortiguamiento, el cual actúa hasta que la masa comienza a moverse. La fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad y tiene dirección opuesta al movimiento, tiene una magnitud $c dx/dt$ o $c \dot{x}$; donde c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso y x la posición de la masa respecto a su posición de equilibrio. El problema que nos planteamos es obtener x en función del tiempo (véase figura 4.3). Todas las fuerzas que actúan en dirección contraria hacia donde se mueve la masa se consideran negativas y positivas las que están en la misma dirección que la masa, de acuerdo a esto, la fuerza de amortiguamiento se considera $-c\dot{x}$ [35]. La fuerza de restitución debido al resorte tiene magnitud $-kx$, donde k es la constante de rigidez del resorte.

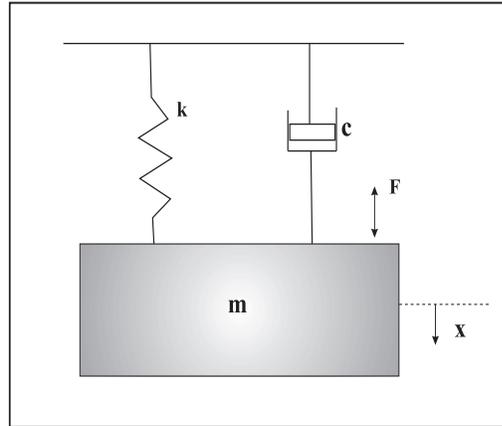


Figura 4.3: Representación gráfica de un modelo sencillo de un sistema oscilatorio amortiguado con un grado de libertad [35].

El total de fuerzas que actúan sobre la masa es $-kx - c\dot{x}$, al considerar la segunda ley de Newton y aplicarla a nuestro sistema, tenemos que [36];

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.2)$$

En los sistemas amortiguados hay que considerar el factor de amortiguación que está representado por la letra griega ζ , y está definida por [36]:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4.3)$$

y es adimensional

Se pueden presentar tres tipos de amortiguamiento. En el primero, cuando $0 < \zeta < 1$, se dice que es un sistema sub-amortiguado y el sistema se comporta como se muestra en la figura 4.4. En este caso, la frecuencia amortiguada se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación [37]:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.4)$$

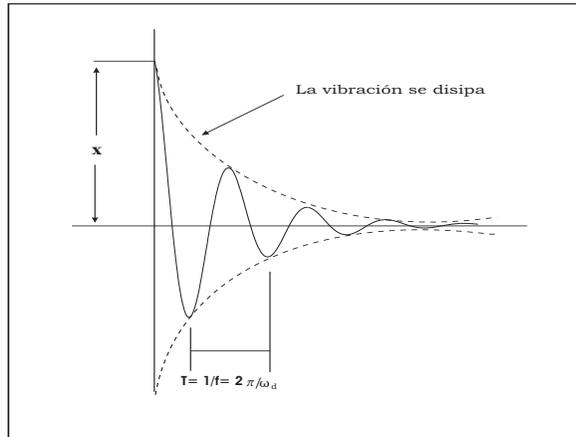


Figura 4.4: Sistema oscilatorio sub-amortiguado [37].

El segundo se presenta cuando $\zeta = 1$, y el sistema se denomina críticamente amortiguado y se comporta como se muestra en la figura 4.5 [37, 36].

El tercer tipo de amortiguamiento se presenta cuando $\zeta > 1$ y se dice que es un sistema sobreamortiguado, su comportamiento se grafica como se muestra en la figura 4.6 [37].

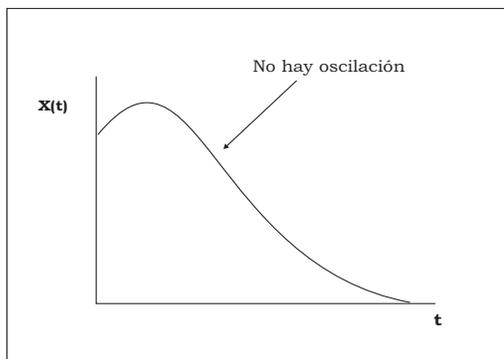


Figura 4.5: Sistema oscilatorio críticamente amortiguado [37, 36].

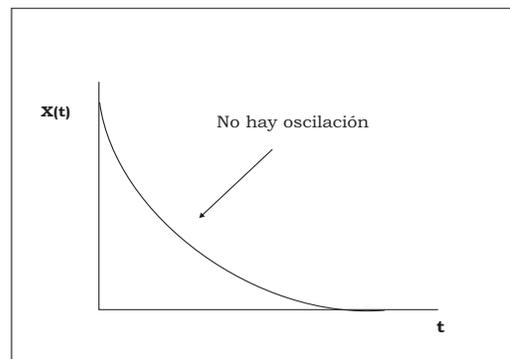


Figura 4.6: Sistema oscilatorio sobreamortiguado [37].

4.2 Amortiguador MR

Existen diferentes tipos de dispositivos y métodos para lograr la disipación de vibraciones, el más empleado es por medio de elementos que ayudan a mitigar las vibraciones de manera gradual. En estos dispositivos se emplean elementos que no requieren de ningún tipo de energía externa para su funcionamiento, tales como resortes, materiales elásticos y amortiguadores, este tipo de elementos se nombran dispositivos de control pasivo [38]. El problema con estos dispositivos es que sólo fueron diseñados para responder adecuadamente en un determinado rango de frecuencia y en situaciones inesperadas, su nivel de respuesta no es el necesario para poder disipar las fuerzas vibratorias ocasionando un mal funcionamiento del dispositivo.

De igual manera, existen los dispositivos de control activo que, a diferencia de los anteriores, necesitan una fuente de energía externa para su funcionamiento y están compuestos por sensores, actuadores y un sistema de control electrónico que sirve para mantener los niveles de vibración dentro de parámetros previamente establecidos [38].

Un amortiguador es un dispositivo que reduce las vibraciones convirtiendo la energía mecánica generada por un factor externo en energía calorífica. Este dispositivo está constituido por un cilindro que contiene aceite, al interior de éste se encuentra un pistón unido a un vástago que empuja el aceite a través de unos orificios, convirtiéndose éstos en los reguladores del paso del aceite. A su vez el aceite contrarresta esta fuerza externa transformándola en calor. Consta de los siguientes elementos (véase figuras 4.7 y 4.8):

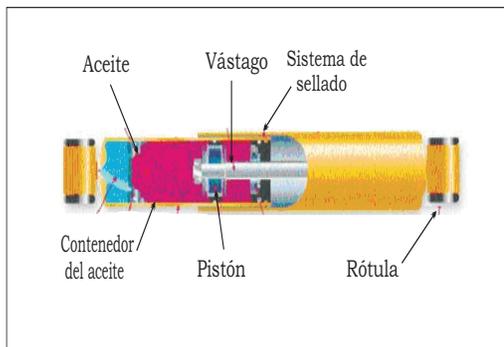


Figura 4.7: Partes de un amortiguador convencional [39].

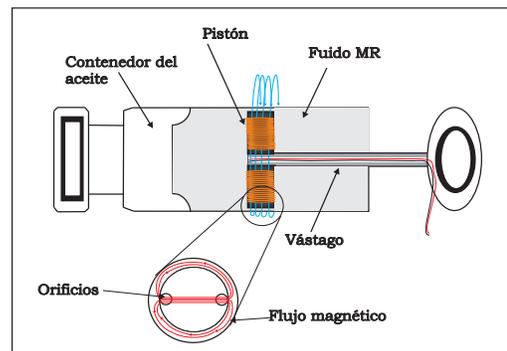


Figura 4.8: Partes de un amortiguador MR simple.

Un *cuerpo cilíndrico* herméticamente cerrado y lleno de aceite. Un *pistón* que contiene un número de orificios determinado con un diámetro específico. Los pistones se fabrican con dos o más orificios, los fabricantes hacen combinaciones en cuanto al número y tamaño de los orificios, característica que controla el flujo del aceite haciéndolo más rápido o más lento. El diámetro del pistón y el diámetro interno del amortiguador también intervienen en este control. Unido al pistón se encuentra un *vástago* que se dirige al exterior, el cuál recibe la fuerza externa, entra al pistón empujando el aceite que se encuentra dentro y que será expulsado por los orificios. El vástago se une por su extremo exterior mediante una rótula o pieza similar al trapecio. El amortiguador se unirá también por su parte superior a los elementos de la suspensión. El *aceite* que posee una viscosidad expresada comercialmente por la letra *W* y por un número, por ejemplo 20, 30, 40, que indica la resistencia que ofrece el líquido al movimiento. Debido a que los amortiguadores transforman la energía cinética en térmica, en otras palabras generan calor, éste puede modificar la viscosidad del aceite, variando las características de amortiguamiento del mismo. Los aceites de silicona tienen una gran estabilidad, son poco sensibles a los cambios de temperatura y la variación en su viscosidad es mínima durante el transcurso del flujo del aceite, por esta razón han sido utilizados en estos dispositivos [39]. La efectividad de un amortiguador es directamente proporcional a su capacidad para disipar el calor, ya que un amortiguador recalentado pierde rápidamente sus características de amortiguación.

El problema con estos amortiguadores es que el aceite que contienen posee un valor de viscosidad que no se puede incrementar y, por lo tanto, sólo funcionan eficientemente para ciertas características de trabajo. Como se analizó en la sección 3.1 y 3.2 nuestro fluido MR puede cambiar sus características viscosas en un amplio rango que puede llegar a aumentar su viscosidad hasta 200 veces más grande respecto a su valor original. Su uso en amortiguadores permitiría aumentar la efectividad del amortiguador ante una mayor variedad de situaciones de trabajo.

Como se muestra en la figura 3.6, al retirar el campo magnético las propiedades del fluido regresan rápidamente a sus valores originales por lo que, en situaciones normales de trabajo, se puede retirar el campo evitando así el calentamiento del fluido y de esta forma mantener un nivel de viscosidad requerido. Cabe recalcar que la acción disipadora de calor tiene una relación inversa con la viscosidad, esto es, si se mantiene una viscosidad alta se dificulta la disipación del calor y el sistema se ve afectado por esta energía.

Con la variación del tamaño de las partículas en el fluido MR también se puede controlar la viscosidad requerida por lo que este aspecto debe ser previamente analizado antes de la aplicación de cualquier fluido MR (ver figura 3.16).

4.3 Simulación numérica del comportamiento del amortiguador MR

Después de analizar el comportamiento de nuestro fluido MR con las diferentes variantes mencionadas en el capítulo 3, y con el análisis de las vibraciones amortiguadas a través de un medio viscoso, se analizará a continuación cómo afecta la utilización de un fluido MR el comportamiento de un amortiguador.

Para analizar el funcionamiento del amortiguador MR se elaboró un programa de simulación numérica en lenguaje de programación FORTRAN. Para obtener parámetros cercanos a un sistema real, del tipo que se emplearían en un automóvil, se consideró un automóvil de una masa total de 2,400 kg. Este peso está distribuido por igual entre 4 amortiguadores, así que cada amortiguador se considera que soporta 600 kg. La constante elástica k se obtuvo de manera indirecta considerando un periodo $T = 1\text{seg}$. El valor de T se aproximó experimentalmente midiendo el tiempo que tarda un vehículo en sufrir una oscilación al pasar un tope. Dado un valor de T , se considera la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.5)$$

Podemos despejar la constante elástica k ; si $T = 1\text{seg}$, entonces tenemos que:

$$k = 4m\pi^2 \quad (4.6)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación 4.6, se obtuvo, para este sistema, una k de 23,687.05. Para obtener un valor de c óptimo para nuestro estudio, realizamos simulaciones numéricas donde se supuso que el sistema se mantiene 2 cm fuera de su posición de equilibrio y posteriormente se deja que vibre libremente. Se fueron asignando valores para c hasta lograr que el sistema presentara sólo 3 vibraciones significativas, de esta manera determinamos un valor para c de 1,400 (ver figura 4.9).

Para el análisis del comportamiento del amortiguador MR, mediante simulación numérica, se consideraron 3 casos para el valor de c .

Caso 1. El amortiguador funcionará con un valor de $c = 1,400$ que se mantendrá constante durante todo el recorrido del móvil, este caso corresponde al comportamiento de un amortiguador convencional.

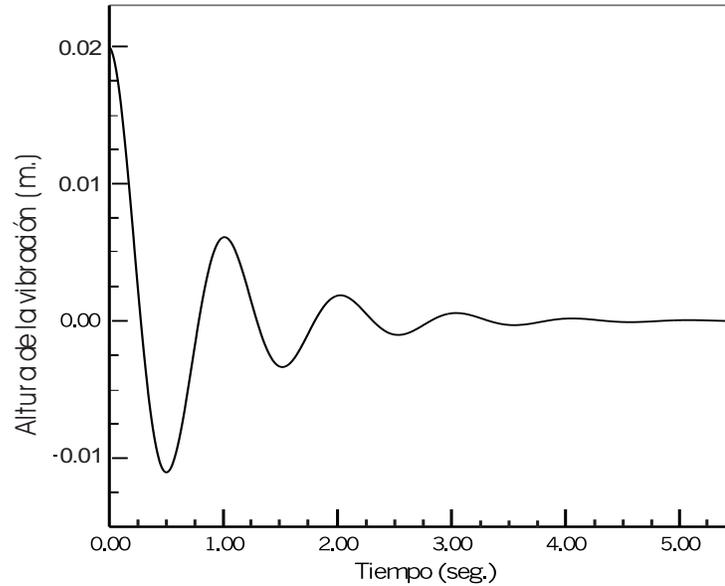


Figura 4.9: Gráfica obtenida para la aproximación de c (ver texto).

Caso 2. Se simula la acción del campo magnético logrando aumentar 10 veces el valor de c en relación al valor anterior, es decir, c tendrá un valor de 14,000, que se mantendrá constante y se podrá retirar al terminar las vibraciones.

Caso 3. En este caso se considera un control dinámico sobre el valor de la viscosidad, el cual depende de las características de los movimientos vibratorios que se producen en el sistema. De esta forma se simula el aumento y disminución del valor de c que van de $c = 1,400$ hasta $c = 14,000$. Los dos últimos casos corresponden a la simulación de dos variantes de amortiguador MR.

Después de establecer el sistema de amortiguamiento, se simula el comportamiento del sistema cuando es expuesto a obstáculos durante su recorrido. Se supuso que el automóvil viaja a una velocidad de 40 km/hr , sin desaceleración, durante un recorrido de 10 segundos. El móvil estará expuesto a 1, 2, 3 y 4 topes, de forma rectangular como el mostrado en la figura 4.10. Cuando sean más de un tope, se considera que el móvil se encontrará con el siguiente tope después de 2 segundos. Para el análisis de los resultados obtenidos se estableció el criterio de que todas las vibraciones menores o iguales a 0.1 cm de altura se consideraran despreciables para el sistema, estableciendo que el móvil se encuentra en su punto de equilibrio.

Comportamiento del móvil expuesto a 1 tope. En este caso, si el au-

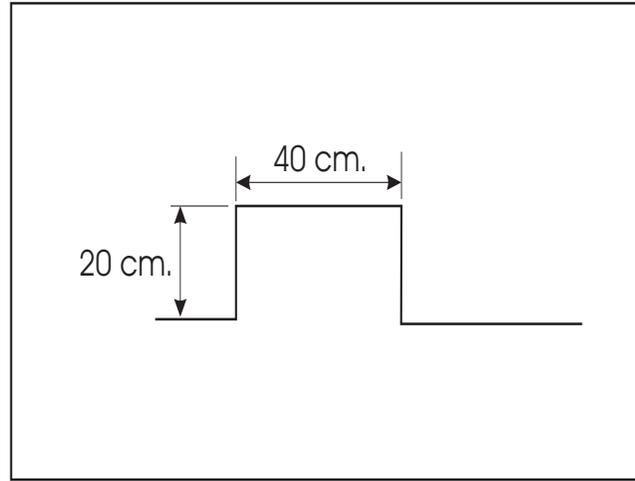


Figura 4.10: Geometría del tope usado en la simulación del comportamiento de un modelo de amortiguador.

tomóvil no estuviera influido por algún tipo de amortiguamiento, se comportaría como se muestra en la figura 4.11. Al simular el sistema considerando el caso 1, las vibraciones se comportan como se ve en la figura 4.12. Se puede observar que al encontrarse con el tope, la primer vibración que se produce alcanza una altura de 3.9 cm respecto a su punto de equilibrio y tienen que transcurrir 4 segundos para que las vibraciones se logren disipar completamente y el móvil regrese a su punto de equilibrio, es decir, el 40% del tiempo que dura el recorrido el móvil sufrió vibraciones.

Al considerar el recorrido considerando el caso 2, las vibraciones se redujeron considerablemente (veáse figura 4.12). La vibración que se produce alcanza una altura máxima de 1.2 cm y el sistema tarda 1.6 segundos para recuperar su punto de equilibrio, es decir, 3.7 veces más rápido que el comportamiento obtenido considerando el primer caso de c . Al aplicar el caso 3 se puede observar que, al igual que las dos anteriores, el primer movimiento oscilatorio fue el mayor. En este caso, el móvil alcanza una altura de 1.22 cm , y llega a su punto de equilibrio en 1.1 segundos, esto quiere decir que, sólo el 11 % del tiempo total que dura el recorrido el móvil tuvo movimientos vibratorios (ver figura 4.12).

Comportamiento del móvil expuesto a 2 topes. En ausencia de un sistema de amortiguación, el recorrido del móvil presenta el comportamiento mostrado en la figura 4.13. Para el primer caso de c , la primer vibración se comporta igual

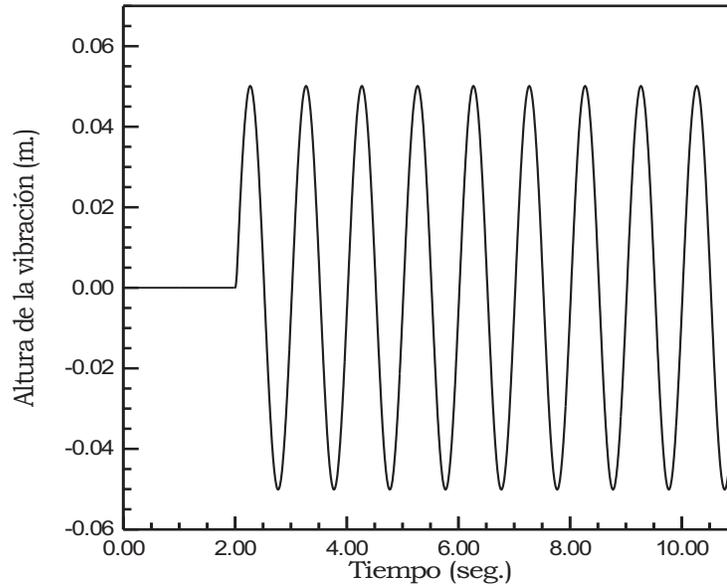


Figura 4.11: Movimiento vibratorio considerando un solo tope, sin amortiguamiento.

que su análoga descrita en el caso de un solo tope (ver figura 4.14). Al encontrarse con el segundo tope, se observa una vibración que alcanza una altura de 4.3 cm. El móvil tarda 5.4 segundos en llegar a su punto de equilibrio, aumentando así 14% más de tiempo, con relación al comportamiento que se observó en el caso de un tope.

Al emplear el caso 2, se observa que se producen 2 movimientos vibratorios por arriba de su punto de equilibrio, ambos alcanzaron la misma altura, sólo que la primera vibración tardó 1.6 segundos para alcanzar su punto de equilibrio, mientras que la segunda tardó 1.7 segundos (véase figura 4.14). Al traducir estos tiempos en porcentajes tenemos que, el 33% del tiempo total que dura el recorrido el automóvil estuvo vibrando.

Al considerar el tercer caso de c el sistema se comporta como se muestra en la figura 4.14. Cuando el móvil se encuentra con el primer tope, se comporta igual que su equivalente descrito en el caso de un solo obstáculo. Al encontrarse con el segundo tope se produce una vibración del mismo tamaño que la anterior, tardando el mismo tiempo para llegar al punto de equilibrio. En total, el 22% del tiempo que dura el recorrido estuvo vibrando el móvil. Si lo comparamos el tiempo correspondiente al primer caso de c se logró disparar las vibraciones 2.4 veces más rápido.

Comportamiento del móvil expuesto a 3 topes. El efecto vibratorio del

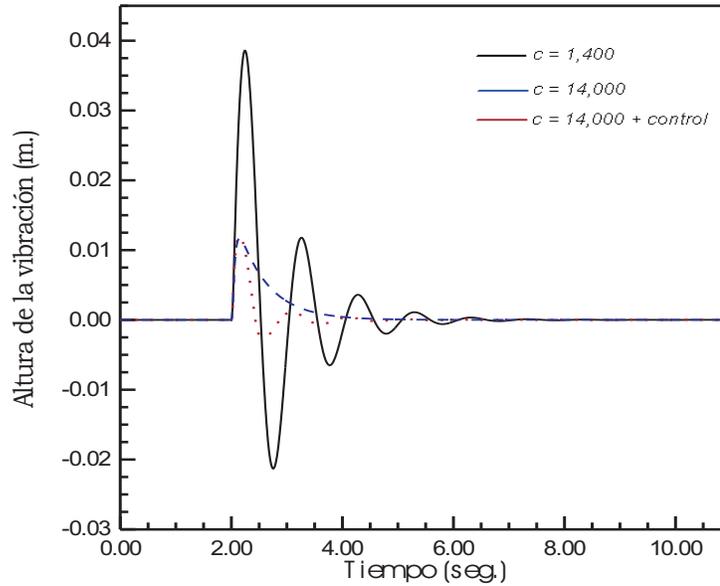


Figura 4.12: Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se considera un tope.

sistema sin considerar amortiguamiento se comporta como se puede observar en la figura 4.15. Durante este recorrido, el comportamiento del sistema, al encontrarse con los dos primeros topes y al aplicar los tres casos de c , se observa es similar al de las 2 primeras vibraciones descritas en el caso de dos topes (veáse figura 4.16).

Al considerar el tercer tope y empleando el primer caso de c , la vibración producida fue de 0.9 cm más pequeña que la primer vibración producida por el segundo tope. El móvil logró alcanzar su punto de equilibrio después de transcurrir 7.4 segundos a partir de que comenzó a pasar el primer tope. Al considerar el mismo recorrido aplicando el caso 2 de c , la tercer vibración observada en el sistema, disminuyó 0.3 cm respecto a la producida por el segundo tope. El móvil demoró un total de 5.7 segundos para que se lograra mitigar las vibraciones, empleando así un 57% del tiempo que dura el recorrido para lograr el objetivo de suprimir las vibraciones (veáse figura 4.16).

Al emplear el tercer caso para c , la vibración provocada en el móvil, al encontrarse con el tercer tope, es más pequeña que la vibración ocasionada por el segundo tope. En este caso, el móvil demoró 1 segundo, para llegar al punto de equilibrio después de encontrarse con el tercer tope, por lo que con este valor de c , el móvil tardó 3.2 segundos en total para llegar a su punto de equilibrio, es decir, el 32% del

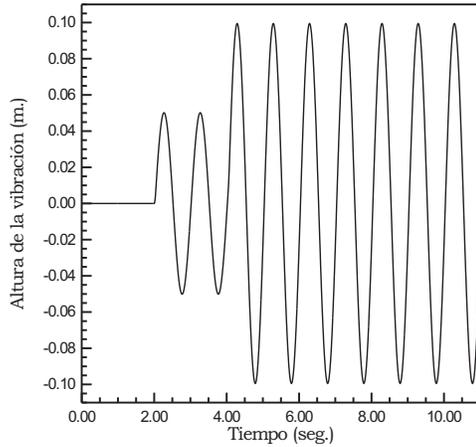


Figura 4.13: Comportamiento del sistema vibratorio al ser sometido a 2 toques sin considerar amortiguamiento.

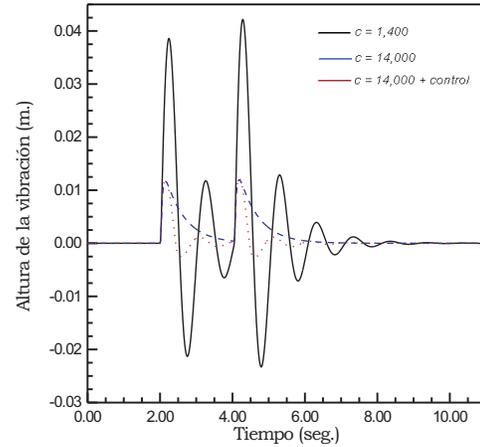


Figura 4.14: Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran dos toques.

recorrido total el móvil estuvo vibrando. Al comparar este tiempo con el resultante del caso 1 $c=1,400$, se observa que al aplicar control el móvil demoró 2.3 veces menos tiempo en llegar al punto de equilibrio aún menos que al considerar el segundo caso de c donde se demoró 1.7 veces menos tiempo respecto al primer caso de c .

Por último, se aumentó un tope más al recorrido del móvil. Si no existiera ninguna fuerza de amortiguamiento el efecto vibratorio del móvil se presentaría como se muestra en la figura 4.17. Al emplear en el sistema una factor de amortiguamiento correspondiente al valor de c en el caso 1 el tiempo que duran las vibraciones ocasionadas por los cuatro obstáculos exceden los 10 segundos, es decir, más del tiempo que dura la simulación.

En el segundo caso de c , las vibraciones provocadas por los cuatro toques se pueden observar en la figura 4.18. En este caso, el tiempo para llegar al equilibrio disminuyó respecto al primer caso de c , tardando 1.5 segundos en alcanzar su equilibrio a partir de que comenzó a pasar el tercer tope. Al sumar este tiempo con el tiempo de los tres toques anteriores, se observa que el 72% del tiempo de simulación, el móvil estuvo expuesto a vibraciones.

Al realizar la última modificación al sistema, empleando el tercer caso de c , las vibraciones se logran mitigar en un tiempo menor al empleado en el caso 2 (véase figura 4.18). En este caso, sólo el 42% del tiempo del recorrido el móvil estuvo vibrando. Esto quiere decir que, se redujo un 72% de tiempo, comparado con el

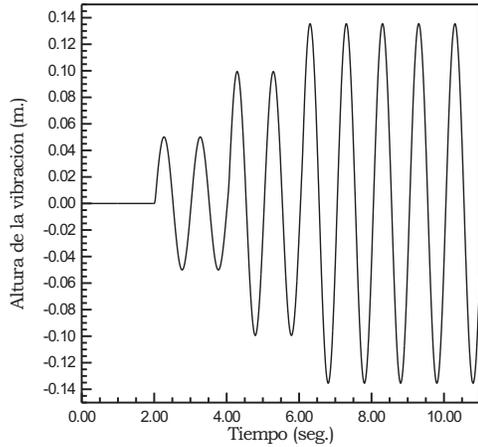


Figura 4.15: Comportamiento del sistema vibratorio al considerar 3 toques, sin amortiguamiento.

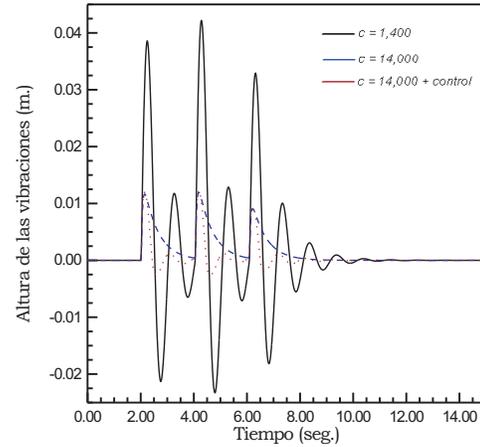


Figura 4.16: Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran tres toques.

resultante en el caso 1 y un 30% menos respecto al del segundo caso de c .

La gráfica 4.19 muestra la cantidad de tiempo que el móvil demoró en llegar a su equilibrio para cada caso de c , donde la variante es la cantidad de toques. De las simulaciones anteriores se observan cambios cuantitativos y cualitativos al considerar un control sobre la constante de amortiguamiento. Observamos que el caso más interesante corresponde al valor de c en el tercer caso, donde durante el movimiento podemos utilizar un valor de c mínimo, correspondiente a campo cero, y un valor correspondiente considerando la aplicación de un campo magnético dependiendo de las características del movimiento. Esto da como resultado una rápida amortiguación de las vibraciones y al mismo tiempo se conserva, tanto como es posible, la viscosidad del fluido permitiendo una buena disipación del calor generado.

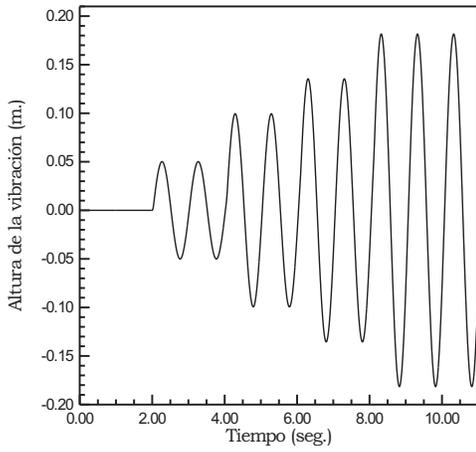


Figura 4.17: Comportamiento del sistema vibratorio al ser sometido a 4 topes, sin amortiguamiento.

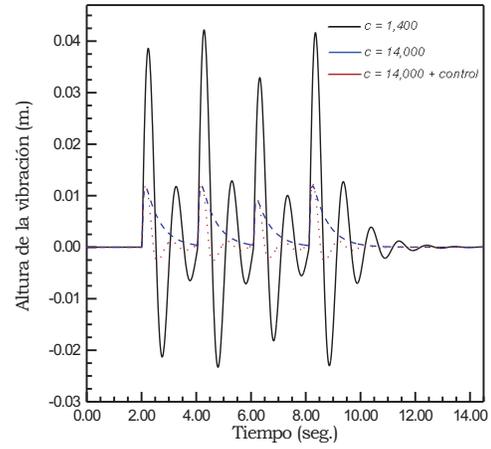


Figura 4.18: Comparación de diferentes movimientos vibratorios, para los tres casos de la constante de amortiguamiento c , se consideran cuatro topes.

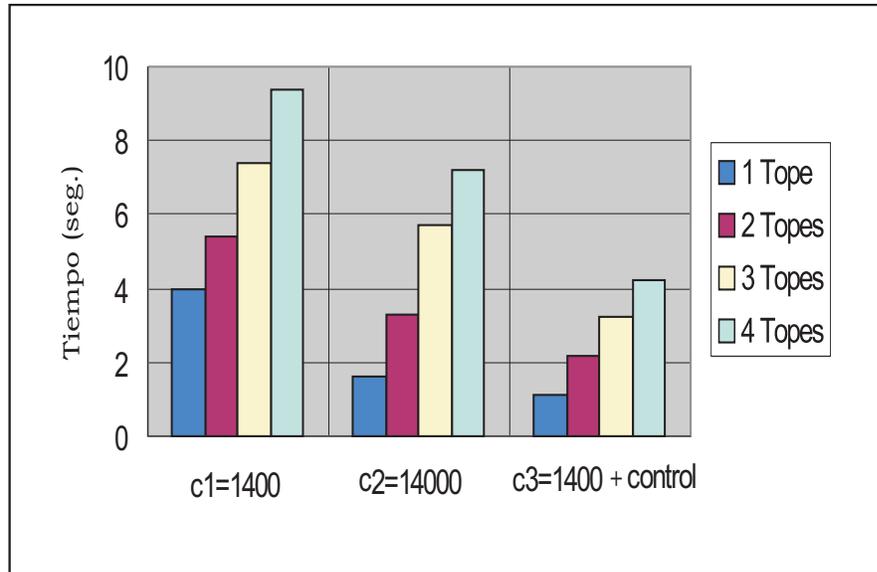


Figura 4.19: Comparación del tiempo durante el cual el sistema estuvo alejado de su posición de equilibrio para los tres casos de la constante de amortiguamiento c y para los casos 1, 2, 3 y 4 topes.

Síntesis y conclusiones

Por medio de una investigación bibliográfica, estudiamos el estado del conocimiento de los sistemas denominados fluidos MR, abordando aspectos como su composición y el comportamiento de sus propiedades físicas en presencia de campo magnético. Encontramos que, además de experimentar notables cambios reológicos, también experimentan importantes cambios en otras propiedades físicas tales como las ópticas y las magnéticas. En cuanto a la composición de estos sistemas encontramos poca variedad siendo el hierro la fase principal de las micropartículas con las que se elaboran los fluidos MR. Respecto a la composición, aunque se acepta que el tamaño de las partículas es determinante en las propiedades de estos sistemas, no encontramos estudios detallados que aclaren tal dependencia. Tampoco es claro si la presencia de impurezas es importante o no, en el comportamiento de estos sistemas.

Desarrollamos un procedimiento para preparar los fluidos MR a base de micropartículas de magnetita mineral, la cual contiene impurezas de sílice, la obtención se realiza en dos etapas: la primera es la molienda mecánica, la cual permite, variando el tiempo de molienda, obtener muestras de diferente tamaño promedio; la segunda consiste en dispersar las partículas obtenidas en un fluido portador.

Para el estudio de las propiedades reológicas de los sistemas preparados, desarrollamos un sistema de magneto-reometría basado en un reómetro Brookfield de geometría cono-plato al cual se le adaptó un solenoide que produce y controla un campo magnético paralelo al eje de rotación del cono.

De los estudios de reología se desprende que el sistema presenta las características de un fluido MR aún cuando las partículas contienen cantidades variables de impurezas de sílice. Observamos que la viscosidad del sistema aumenta notablemente con el campo aplicado y además, ahora depende de la velocidad de deformación, a mayor velocidad, menor viscosidad. A bajas velocidades (≈ 1 rpm), el sistema experimenta cambios hasta de dos órdenes de magnitud en la viscosidad. De las mediciones del módulo cortante en función de la velocidad de deformación, al ser extrapoladas, en el régimen de bajas velocidades, observamos la aparición de un módulo de cesión, lo cual claramente indica que el sistema adquiere características

viscoelásticas. Encontramos también que existe un umbral en el campo magnético alrededor de 120 G , por encima del cual, los cambios en la viscosidad son más notables.

El comportamiento de las muestras del sistema preparadas usando partículas de diferente tamaño promedio, asociados a tiempos de molienda diferentes, permite observar una clara dependencia de la viscosidad con el tamaño de partícula. De hecho los resultados sugieren dos comportamientos, uno en el régimen de baja velocidad (< 3 rpm) donde a mayor tamaño de partícula, mayores son los cambios en la viscosidad y otro, en el régimen de alta velocidad (> 7 rpm) donde mayor tamaño de partícula, menores cambios en la viscosidad del sistema.

La comparación del comportamiento del modelo de amortiguador MR con uno convencional de un automóvil, ambos simplificados, muestra que es posible disminuir notablemente el tiempo necesario para que el amortiguador regrese a su posición de equilibrio luego de ser perturbados, por un tope por ejemplo, y al mismo tiempo conservar baja la viscosidad del fluido del amortiguador durante la mayor parte del tiempo, cualidad que es importante para disipar el calor generado durante el funcionamiento del amortiguador.

Las conclusiones más importantes de este trabajo son: el sistema formador por micropartículas de magnetita mineral presenta características magneto-reológicas aún cuando las partículas son inhomogéneas y presentan impurezas de sílice. El sistema muestra una dependencia con el tamaño de las partículas y se sugiere la existencia de dos regímenes, uno a bajas velocidades de deformación (< 3 rpm) donde a mayor tamaño de partícula mayores cambios en la viscosidad; y uno a alta velocidad relativa (> 7 rpm) donde a mayor tamaño de partícula menores son los cambios en la viscosidad. Existe un umbral en el campo magnético por encima del cual los cambios en la viscosidad son mayores, alrededor de 120 G . El sistema de magneto-reometría propuesto es adecuado para estudios de reología en presencia de campo magnético. Un amortiguador MR permite disipar más rápidamente las perturbaciones mecánicas, y al mismo tiempo permite una rápida disipación del calor generado durante el funcionamiento del mismo.

La tecnología de fluidos MR presenta un campo de investigación muy amplio donde se pueden desarrollar varias líneas de investigación. Por ejemplo, se puede profundizar en el estudio de los efectos de la polidispersión y/o de la morfología de la reología de los fluidos MR. También es importante la búsqueda de nuevas composiciones que permitan obtener sistemas más estables y que experimenten mayores cambios en sus propiedades reológicas lo cual es necesario para alguna de las aplicaciones propuestas.

Glosario

Anisotropía óptica. La anisotropía es una consecuencia de la estructura interna de un sistema. Si carece de organización interna (sistemas amorfos) o si presenta una organización muy regular son isótropos, los demás son anisótropos. La anisotropía óptica causa la polarización y doble refracción de la luz.

Dicroismo lineal. El dicroismo lineal es la propiedad que se manifiesta cuando la imagen del objeto frente a un espejo no es idéntica al objeto que la produce, es decir, no es superponible con él. Cuando la superposición de los objetos resultan completamente indistinguible, es decir, ambos objetos son idénticos, en este caso los objetos son aquirales. Si por el contrario, se observa alguna diferencia, es decir, los objetos no son superponibles y son objetos diferentes con características propias, entonces son quirales. La técnica de dicroismo lineal se utiliza frecuentemente para medidas de moléculas aquirales (y ocasionalmente quirales) en disoluciones anisotrópicas.

Ferrofluidos. Un ferrofluido es una suspensión coloidal de partículas magnéticas en un líquido no magnético. Su comportamiento está determinado por su interacción con un campo electromagnético externo.

Fluido. Es una sustancia que se deforma continuamente cuando está sometido a un módulo de cortante o tangencial. Todos los fluidos están compuestos de moléculas que se encuentran en movimiento constante.

Fluido dilatante. Son los fluidos que presentan un aumento en su viscosidad al ser sometidos a un módulo cortante.

Fluido electro-reológico (ER). Son dispersiones de micropartículas polarizables en un líquido. Un fluido ER en presencia de campo eléctrico cambia sus propiedades reológicas. Las partículas se encuentran en un rango de $1 - 100\mu m$.

Fluido magneto-reológico (MR). Son dispersiones de micropartículas magnetizables en un líquido, comúnmente aceites orgánicos. Un fluido MR en presencia de campo magnético cambia sus propiedades reológicas. Las partículas se encuentran

en un rango de $1 - 30\mu m$.

Fluido newtoniano. Son aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación. La mayor parte de los fluidos comunes como el agua, el aire y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales.

Fluido no-newtoniano. Son aquellos materiales cuya relación módulo cortante y velocidad de deformación no es lineal.

Fluido reopéctico. Son los fluidos que presentan un aumento reversible del módulo cortante respecto al tiempo cuando la velocidad de deformación es constante.

Fluido pseudoplástico. Son aquellos materiales en los que disminuye su viscosidad a medida que se incrementa el esfuerzo cortante.

Fluido tixotrópico. Son aquellos fluidos donde su módulo cortante disminuye con el tiempo cuando se agitan a velocidad constante.

Material diamagnético. En los materiales diamagnéticos los efectos magnéticos son débiles. Aunque los momentos magnéticos orbitales y del espín en tales materiales se cancelan (el momento magnético neto es cero) en ausencia de un campo magnético externo, un campo aplicado produce que el momento del espín exceda ligeramente el momento orbital, produciendo un momento magnético neto pequeño que se opone al campo aplicado.

Material ferromagnético. Son materiales, como el hierro, que mantienen un momento magnético incluso cuando el campo magnético externo se hace nulo. Este efecto se debe a una fuerte interacción entre los momentos magnéticos de los átomos o electrones individuales de la sustancia magnética que los hace alinearse de forma paralela entre sí.

Material paramagnético. El paramagnetismo se produce cuando las moléculas de una sustancia tienen un momento magnético permanente. El campo magnético externo produce un momento que tiende a alinear los dipolos magnéticos en la dirección del campo. En las sustancias paramagnéticas la susceptibilidad magnética es muy pequeña comparada con la unidad.

Magneto-reometría. Es la medición de parámetros reológicos de un material al aplicarle un campo magnético externo. En este trabajo se propuso un sistema de

reometría que esta compuesto por un reómetro cono-plato y un solenoide para la aplicación del campo externo.

Material super-paramagnético. El superparamagnetismo es un comportamiento magnético con algunas características del ferromagnetismo y otras del paramagnetismo. Su origen se debe a la presencia de partículas con interacciones ferromagnéticas lo bastante intensas en su interior como para lograr un ordenamiento magnético por debajo de cierta temperatura crítica, pero con interacciones muy débiles entre ellas, con lo que el ordenamiento magnético no puede extenderse a todo el sistema. Así, se comportan como paramagnetos de momento magnético muy grande.

Plástico de Bingham. Son aquellos materiales en que la relación módulo cortante y velocidad de deformación es lineal, pero para módulos de corte pequeños se comportan como sólidos, presentando características elásticas y, únicamente por el incremento del módulo cortante, el sistema fluye hasta un cierto valor .

Remanencia. Es la densidad de flujo que permanece en un material magnético después de haber suprimido a la fuerza de magnetización externa.

Reología. Ciencia que trata el estudio de la deformación y el flujo de la materia.

Reómetro. Un instrumento empleado en la reometría para medir propiedades reológicas. Cuando este instrumento sólo mide la viscosidad se le conoce como viscosímetro.

Videomicroscopía. Un sistema de video microscopia (VM) consiste básicamente en un microscopio o lupa, adaptado a cámara de video y/o monitor de video. Permite observar la imagen de un objeto obtenida a través de un microscopio convencional en un monitor.

Viscoelasticidad. Que posee propiedades viscosas y elásticas. Un fluido viscoelástico es aquél presenta propiedades intermedias entre un sólido perfectamente elástico y un fluido perfectamente viscoso.

Viscosidad. Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza.

Viscosidad relativa. La razón de la viscosidad dinámica de una disolución a la del disolvente o de una dispersión a la de su fase continua, ambas medidas a la misma temperatura. Este término es aplicable a los fluidos no-newtonianos.

Bibliografía

- [1] I. Torres, Ensayo de propiedades de los fluidos, p. 4. ([http : //www.monografias.com/trabajos12/mecflui/mecflui.shtml](http://www.monografias.com/trabajos12/mecflui/mecflui.shtml))
- [2] Scott A. Shearer, J.R. Hudson, Fluids mechanics: Stokes' law and viscosity, Measurement Laboratory, Investigation No. 3.
- [3] Ma. Gpe. del Carmen Méndez M., Ma. del Carmen Nuñez S., J. Solorza Fera, Introducción a la Reología, Instituto Politécnico Nacional.
- [4] Robert L. Mott, Mecánica de fluidos aplicada, Ed. Prentice-Hall, 4a. edición, (1994). [http : //construaprende.com/Lab/10/Prac10_1.html](http://construaprende.com/Lab/10/Prac10_1.html)
- [5] Barbosa Cánovas, G.V. and Peleg M., Flow parameters of selected commercial semi-liquid food products, J. Textures, Stud. 14., (1983).
- [6] Hugo de Notta, Introducción a la reología, Sociedad Argentina de Tecnólogos en Recubrimiento de Ucar Emulsion Systems.
- [7] G. Sánchez M., C. Vial R., N. Moraga B., Study of non-newtonian flows using finite volumes and finite elements methods, Revista de Ingeniería, Vol 10, agosto 20, 2002. [http : //www.uta.cl/revistas/Ingenieria/Articulos/Volumen10/Estudio](http://www.uta.cl/revistas/Ingenieria/Articulos/Volumen10/Estudio)
- [8] Conceptos y ecuaciones fundamentales en mecánica de fluidos, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Depto. de Ingeniería Química, Universidad de Chile, pp. 7-9, (2002).
- [9] Mark R. Jolly, Jonathan W.Bender and J.David Carlson, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, Thomas Lord Research Center, Lord Corporation 110 Lord Drive, Cary, NC 27511. [http : //literature.lord.com/root/other/rheonetic/prop5.pdf](http://literature.lord.com/root/other/rheonetic/prop5.pdf)
- [10] W. Winslow, J. Appl. Phys.20, p.1137 (1949).
- [11] Miguel Cupich Rodríguez, Fernando J. Elizondo Garza, Amortiguadores magnetoreológicos, Departamento de Dinámica, FIME-UANL.

- [12] J.M. Ginder, MRS Bulletin; August 26, 1998.
- [13] D. Scott, J. Yamaguchi, Automotive engineering, p. 75, (1985).
- [14] P. P. Phulé y J. M. Ginder, Guest Editors, MRS BULLETIN Agust, 19 (1998).
- [15] F. Donado P., Fluidos electro-reológicos y magneto-reológicos: teoría y experimentos, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, (2002).
- [16] Carlson y Spencer 1996a.
- [17] Handbook of chemistry and physics, 58a. ed. CRC Press, Inc., Cleveland, Ohio.
- [18] P.P. Phulé, Synthesis of novel magnetorheological fluids, MR Bulletin, p. 98, August (1998).
- [19] Kiyohito Koyama, Rheological synergistic effects of electric and magnetic fields in iron particle suspension, Yamagata University, Yonezawa 992.
- [20] T.C. Choy, Effective medium theory, Principles and applications, (Oxford Science Publications), p. 149. Oxford, 1999
- [21] Sonia Melle, Miguel A. Rubio, Gerald Fuller, Ferrofluidos: fenómenos complejos e ideas sencillas, Laboratorio de Sistemas Complejos del Departamento de Física Fundamental UNED, Madrid.
- [22] Electroviscous Fluids, I. Rheological properties, D.L. Klass, Institute of Gas Technology, Chicago, Illionois & Tee-Pack, Inc, Daville, Illionois, August, 29 (1966).
- [23] J. M. Ginder and L. C. Davis, Shear stresses in magnetorheological fluids: Role of magnetic saturation, p.3410, October, 19 (1994).
- [24] Suraj S. Deshmukh and Gareth H. McKinley, Rheological behavior of magnetorheological suspensions under shear, creep and large amplitude oscillatory shear (LAOS) flow, Seoul, Korea, August 22-27, 2004.
- [25] Manual de operación reómetro Brookfield DV-III ULTRA No. M/98-211-B0104, Brookfield Engineering Laboratories, Inc.
- [26] D. Halliday, R. Resnick, Física parte 2, Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V. (1982).
- [27] L.W. Match, Máquinas electromagnéticas y electromecánicas, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1a. Edición (1972).

- [28] Archer E. Knowlton, Standard handbook for electrical engineers.
- [29] P.D.I.I. G. Donñú Ambrosio, Obtención de micropartículas homogéneas para la preparación de fluidos magneto-reológicos, U.A.E.H, (2005).
- [30] Dr. Tony Phillips, Patrick L. Barry, Líquidos magnéticos asombrosos, NASA, Abril 2, (2003).
- [31] GM, TECH LINK, Control magnético de tracción, p. 1, Enero (2002).
- [32] F. Yi, S.J. Dyque, S. Frech, and J.D. Carlson, Investigation of magnetorheological dampers for earthquake hazard mitigation, July 2, (1998).
- [33] Oscar López García, A. Carnicero López, Rosa Ruiz P, Materiales inteligentes (II): aplicaciones tecnológicas. www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales.got.php?id = 270
- [34] Vibración libre sin amortiguamiento de un sistema con un grado de libertad, Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Departamento de Ingeniería Mecánica,
- [35] J.P. Den Hartog, Mecánica de las vibraciones, Ed. CECSA, pp. 46, 47, Marzo (1987).
- [36] R. Roca Vila, Juan Leon L. Vibraciones mecánicas, ed. LIMUSA, pp. 61, 62, 63, México (1981),
- [37] Sergio E. Diaz, Medición y análisis de vibraciones, Laboratorio de Dinámica de Máquinas, Universidad Simon Bolivar, pp. 6, 7.
- [38] Fabio A. Pineda Botero, Control activo (adaptativo) de vibraciones mecánicas, Universidad EAFIT, Medellín, Febrero (2003).
- [39] Monroe Adventure, Amortiguadores todo terreno, General de Ediciones Especializadas, S.L.
- [40] Francisco José García Breijo, Universidad Politécnica de Valencia.
- [41] Alonso Martín Méndez, Corcuera Pindado, A. Picazo Talavera, Biocompatibilidad de sistemas electromagnéticos dispersos como fase previa a su posible uso intraocular, Julio (1999).
- [42] Instituto Politécnico Nacional, Clasificación reológica para líquidos, Mayo-Junio (1997).
- [43] Kraus, John D., Electromagnetismo, 3a. Edición, Editorial Mc. Graw Hill, (1986).

Bibliografía

- [44] Alberto Ortiz de la Torre, Materiales magnéticos: aplicaciones, Diciembre (2000).
- [45] <http://www.angel.qui.ub.es/~curco/Reolo>