



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño, fabricación y
caracterización reológica de un
fluido magnetoreológico
Design, fabrication and rheological
characterization of a
magnetorheological fluid

Gali Ronel Quitian Chila

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2015

Diseño, fabricación y caracterización reológica de un fluido magnetoreológico

Gali Ronel Quitian Chila

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Materiales y Procesos

Director:

Ph.D. Néstor Ricardo Rojas Reyes

Codirector:

Ph.D. Wilmer de Jesús Saldarriaga Agudelo

Línea de Investigación:

Reología de Suspensiones

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2015

A Juliet Restrepo Vargas.

Agradecimientos

A Dios, no regalas metas cumplidas, solo permites que las labremos.

A mi hermano José quién ofreció de su parte para llegar a este punto, igualmente Emilce, Oxiris, Kelly y a mi Madre querida Rosalba, todos generadores de sueños y bases fundamentales para mi progreso. "Los quiero mucho hijos... ¡Hermanos!".

A mi amigo, papá, director y guía, Néstor Ricardo Rojas Reyes quien podría ser candidato al premio de la paciencia y a su querida esposa Guiovanny.

A la Universidad Nacional de Colombia y al instituto de minerales CIMEX, lugar donde se fecundó mi espíritu científico.

A mi gran familia Restrepo Vargas; Dake, Leidy, Persi, Jorge, Andres, Isaac y por supuesto a Juliet. Refugio de grandes jornadas.

A la empresa CECOLTEC S.A.S, sus instalaciones y al calor humano y de familia que se vive a diario en sus oficinas. Cesar, Elkin, Diana, Juan, Hugo y Carlos, un gran equipo de trabajo. Gracias querida Karla.

A la familia CARMELITA, quien me enseñó la labor del servicio.

¡A mis amigos!

Resumen

En el desarrollo del presente trabajo de tesis se fabricaron fluidos magnetoreológicos (FMR) con Magnetita como medio discreto suspendida en aceite sintético comercial. Un FMR muestra una transición de un comportamiento líquido a un comportamiento sólido mediante la aplicación de un campo magnético, lo cual sitúa este tipo de material en el grupo de materiales inteligentes "smart materials". La magnetita utilizada en el FMR es proveniente de arenas negras de relaves de minería aluvial de oro. Se fabricaron FMR con diferentes tamaños promedio de partícula (63, 47, 33 y 20 μm), a concentración de sólidos de 5, 10 y 15% en peso.

La caracterización reológica de los FMR fabricados se llevó a cabo de forma estática y dinámica. Un dispositivo que integra cuatro imanes de neodimio es instalado al reómetro Kinexus. Los campos magnéticos obtenidos fueron de 0, 50, 100, 300, 600 y 1200 Gauss.

Aunque el principal parámetro modificador de la reología de un FMR es el campo magnético, la fracción volumétrica y el tamaño de partícula generan un efecto de sinergia que afecta los valores de viscosidad y esfuerzo de fluencia del FMR. El comportamiento reológico de los FMR es pseudoplastico, el cual se modeló con la ecuación de Herschel Bulkley.

Para campos magnéticos bajos el tamaño de partícula es el parámetro que posiblemente determina la formación de estructuras en el FMR. Estas estructuras se hacen más rígidas a medida que se incrementa el campo magnético, como consecuencia de esta rigidez existirá un incremento de la viscosidad, relacionada directamente con el aumento del tamaño de partícula. Con el aumento en la concentración de partículas se incrementa el esfuerzo de fluencia y se propicia la formación de una mayor cantidad de estructuras, contribuyendo que con cada estructura formada se crea un mayor efecto de elasticidad en el FMR, es decir, aumenta el módulo elástico G' .

Los FMR con partículas menores a 20 μm proporcionan una mayor elasticidad que aquellos FMR formulados con partículas superiores a este tamaño, así pues, los FMR formulados con tamaños de partícula de 20 μm son los más eficientes para obtener un cambio entre un comportamiento líquido y un comportamiento sólido con la aplicación de campos magnéticos. Finalmente, los FMR fabricados satisfacen los

diferentes requerimientos de amortiguación de motocicletas con diferentes propósitos de conducción.

ABSTRACT

In the development of this thesis magnetorheological fluids (MRF) were fabricated with magnetite as discrete medium suspended in commercial synthetic oil. A MRF shows a transition from a liquid behavior to solid by applying a magnetic field, Considering it as a smart material. Magnetite used in this MRF comes from black sands tailings alluvial gold mining. MRF were fabricated with different sizes particle (63, 47, 33 and 20 μm), a solids concentration of 5, 10 and 15% by weight.

The rheological characterization of the MRF was performed statically and dynamically. A device that integrates four neodymium magnets is installed to Kinexus rheometer. Magnetic fields obtained were 0, 50, 100, 300, 600 and 1200 Gauss.

Although the main switch parameter rheology of a MRF is the magnetic field, the volume fraction and particle size generate a synergistic effect that affects the viscosity values and yield stress of MRF. The rheological behavior of MRF is pseudoplastic, which are modeled with Herschel Bulkley equation.

For smaller magnetic fields the particle size is the parameter that determines possibly the formation of structures in the MRF. These structures become more rigid as the magnetic field increases, because of this rigidity will exist a viscosity increase, directly related to the increase in particle size.

With the increase in the concentration of particles increases the yield stress, favoring the formation of a higher amount of structures, contributing with each shaped structure greater elasticity effect in the fluid fabricated, that is, increases the elastic modulus G' .

MRF with particles smaller than 20 microns provide greater elasticity than those MRF formulated with particles above this size. well, fluids formulated with particle sizes of 20 microns are the most efficient for a change between a liquid behavior to solid with the application of magnetic fields. Finally, the produced MRF meeting the requirements damping of different motorcycles with different driving purposes.

Contenido

	Pág.
1. Antecedentes.....	5
1.1 Materiales Inteligentes (Smart Materials).....	5
1.2 Reología.....	7
1.2.1 Viscosidad, Esfuerzo y Deformación.....	7
1.3 Fluidos magnetoreológicos.....	10
1.4 Parámetros reológicos.....	11
1.4.1 Tamaño, distribución, forma de las partículas y fracción volumétrica.....	11
1.5 Metodología de fabricación.....	13
1.6 Reómetros.....	14
1.7 Modelo Reológico.....	16
1.8 Amortiguador Magnetoreológico.....	17
1.8.1 Reología en un amortiguador.....	18
2. Trabajo Experimental.....	25
2.1 Fluido portador y partículas.....	25
2.2 DRX.....	26
2.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM) e Identificación de análisis elemental (EDS).....	27
2.4 Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	28
2.5 Análisis reológico.....	29
2.5.1 Parámetros reológicos a evaluar.....	31
2.6 Campo Magnético.....	35
2.7 Caracterización Morfológica.....	38
3. Resultados y discusiones.....	39
3.1 Distribución de tamaño de partícula.....	39
3.2 Caracterización DRX.....	41
3.2.1 Muestra MP +400.....	41
3.2.2 Muestra MP +500.....	42
3.2.3 Muestra MP +635.....	42
3.2.4 Muestra MP -635.....	43
3.3 Microscopia electrónica de barrido SEM.....	43
3.4 Identificación Elemental EDS.....	45
3.4.1 Muestra MP +400.....	46
3.4.2 Muestra MP +500.....	48
3.4.3 Muestra MP +635.....	49

3.4.4	Muestra MP -635.....	50
3.5	Caracterización morfológica.....	51
3.5.1	Propiedades morfológicas de partícula.....	53
3.6	Reología.....	55
3.6.1	Curva de flujo a una concentración de 5%.....	56
3.6.2	Curva de flujo a 10% en volumen.....	57
3.6.3	Curva de flujo con concentración 15%.....	59
3.6.4	Modificación de la viscosidad respecto al tamaño de partícula.....	60
3.6.5	Modificación de la viscosidad respecto a la concentración volumétrica.....	63
3.6.6	Viscosidad a Tasa de cizalladura fija.....	68
3.6.7	Curvas de esfuerzo para las diferentes muestras a volumen constante.....	69
3.6.8	Modelo reológico.....	74
3.6.9	Esfuerzo de Fluencia.....	76
3.6.10	Curvas Oscilatorias, Amplitud y Frecuencia.....	79
4.	Conclusiones.....	89
5.	Bibliografía.....	90

Lista de figuras

Figura 1-1 Fluido entre placas (Barnes, 1993)	7
Figura 1-2 Modificación de la viscosidad a partir de parámetros reológicos. a) Tamaño de partícula, b) Dispersión de partículas, c) Morfología de partículas y d) Concentración volumétrica. Tomado y modificado de www.malverninstruments.com	13
Figura 1-3 Physica MCR 500 con dispositivo para mediciones magnetoreológicas.....	15
Figura 1-4 Estructuras formadas al aplicar un campo magnético. Elaboración propia.	18
Figura 1-5 Diferentes escenarios que generan diferentes valores de frecuencias sobre el amortiguador. Tomado de http://www.motorcycle-usa.com/ y http://motorcycles.wikia.com/	20
Figura 1-6 Sistema de amortiguamiento general. Tomado y modificado de (Bica et al., 2013).....	20
Figura 1-7 Pista de Motocross baches que infieren diferentes oscilaciones en el amortiguador. Tomado de http://foros.arquonauta.com/	20
Figura 2-1 Difractograma patron Magnetita (Atta et al., 2014).....	27
Figura 2-2 Difractogramas principal Magnetita de alta pureza. (Zapata, 2008).....	27
Figura 2-3 SEM, Phenom pro X. (www.phenomworld.com).....	28
Figura 2-4 Nebula, Dispersión de muestra para SEM. (www.phenomworld.com).....	28
Figura 2-5 Mastersizer 3000 (www.malvern.com)	29
Figura 2-6 Reómetro Kinexus pro X (www.malvern.com).....	30
Figura 2-7 Cilindros concéntricos C25.....	30
Figura 2-8 Cilindros concéntricos, dirección de flujo. Tomado y modificado de (Rao, 2009).....	30
Figura 2-9 Caracterización reológica propuesta.....	33
Figura 2-10 Dispositivo fabricado para direccionar el campo magnético sobre el FMR.	35
Figura 2-11 Integración reómetro y dispositivo de campos.....	36
Figura 2-12 Integración reómetro y dispositivo de campos Frente.....	36
Figura 2-13 Líneas de campo, posicionamiento de imanes sobre la copa C25 del Reómetro. Vista superior.....	37
Figura 2-14 Estructuras formadas paralelas a las líneas de campo.....	37
Figura 2-15 Gaussímetro, para medición del campo.....	37

Figura 3-1 Distribución tamaño de partícula para las muestras de estudio.....	40
Figura 3-2 DRX muestra MP+400.....	41
Figura 3-3 DRX muestra MP+500.....	42
Figura 3-4 DRX muestra MP+635.....	42
Figura 3-5 DRX muestra MP-635.....	43
Figura 3-6 Muestra principal obtenida de proceso minero, los tonos grises claro son asociados a la magnetita, los tonos oscuros asociados al silico o materiales arcillosos.....	44
Figura 3-7 A Muestra MP +400, B Muestra MP+500, C MP+635 y D MP-635.....	45
Figura 3-8 Zona de análisis Elemental, muestra MP +400.....	46
Figura 3-9 Zona de análisis Elemental contaminación muestra MP +400 Y Difractograma.....	47
Figura 3-10 Mapeo e identificación de principales elementos en la partícula contaminante muestra MP+400.....	48
Figura 3-11 Zona de análisis Elemental, muestra MP +500 Y Difractograma MP+500.....	48
Figura 3-12 Zona de análisis Elemental, muestra MP +635 Difractograma MP+635.....	49
Figura 3-13 Zona de análisis Elemental, muestra MP -635 Y Difractograma MP-635.....	50
Figura 3-14 Segunda Zona de análisis Elemental, muestra MP -635 Y Difractograma MP-635 diferente zona.....	50
Figura 3-15 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+400.....	51
Figura 3-16 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+500.....	52
Figura 3-17 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+635.....	52
Figura 3-18 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP-635.....	53
Figura 3-19 Comparación de propiedades morfológicas para las muestras analizadas.....	55
Figura 3-20 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético.....	57
Figura 3-21 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético.....	59
Figura 3-22 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético.....	60
Figura 3-23 Viscosidad a 600 s ⁻¹ con ϕ 5%.....	62
Figura 3-24 Viscosidad a 600 s ⁻¹ con ϕ 10%.....	62
Figura 3-25 Viscosidad a 600 s ⁻¹ con ϕ 15%.....	62
Figura 3-26 Viscosidad para la muestra MP+400 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos.....	64
Figura 3-27 Viscosidad para la muestra MP+500 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos.....	65

Figura 3-28 Viscosidad para la muestra MP+635 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos.....	66
Figura 3-29 Viscosidad para la muestra MP-635 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos.....	67
Figura 3-30 Viscosidad evaluada a tasa de cizalladura fija, variación campo magnético y concentración volumétrica.....	69
Figura 3-31 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 5%	71
Figura 3-32 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 10%.....	72
Figura 3-33 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 15%.....	74
Figura 3-34 Comparación de los modelos de Bingham y Herschel Bulkley.....	75
Figura 3-35 Esfuerzo de fluencia para los FMR a diferentes concentraciones volumétricas.....	77
Figura 3-36 Esfuerzo de fluencia para diferentes concentraciones.....	78
Figura 3-37 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 5% con valor de frecuencia 1Hz.....	80
Figura 3-38 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 5%.....	81
Figura 3-39 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 10%.....	81
Figura 3-40 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 10%.....	82
Figura 3-41 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 15%.....	82
Figura 3-42 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 15%.....	83
Figura 3-43 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 5%.....	84
Figura 3-44 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 5%	84
Figura 3-45 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 10%.....	85
Figura 3-46 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 10%.....	86
Figura 3-47 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 15%.....	86
Figura 3-48 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 15%.....	87

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Modelos reológicos para suspensiones (Gutierrez et al., 2000)	9
Tabla 1-2 Mayores características de un FMR (Ashtiani et al., 2015)	11
Tabla 1-3 Materiales más utilizados en la fabricación de FMR.(Pérez, Luis, Estrada, Maria, & Mendoza, 2002)	14
Tabla 1-4 Parámetros reológicos para un aceite de acuerdo al entorno.....	23
Tabla 2-1 Variables y magnitudes estudiadas durante la caracterización reológica..	31
Tabla 2-2 Parámetros morfológicos de partícula. (www.malvern.com)	38
Tabla 3-1 Parámetros D_{90} , D_{50} , D_{10} y SPAN para cada muestra.....	40
Tabla 3-2 DRX muestra MP+400.....	41
Tabla 3-3 DRX muestra MP+500.....	42
Tabla 3-4 DRX muestra MP+635.....	42
Tabla 3-5 DRX muestra MP-635.....	43
Tabla 3-6 Composición elemental MP+400	47
Tabla 3-7 Composición elemental MP+400, partícula contaminante.....	47
Tabla 3-8 Composición elemental MP+500.....	48
Tabla 3-9 Composición elemental MP+635.....	49
Tabla 3-10 Composición elemental MP-635.....	50
Tabla 3-11 Composición elemental MP-635 diferente zona.....	51
Tabla 3-12 Propiedades morfológicas para las muestras de estudio.....	53
Tabla 3-13 Comparación diámetro equivalente y D_{50}	54
Tabla 3-14 Parámetros y ajuste para los modelos Herschel Bulcley y Bingham en dos FMR.....	76

Introducción

Un fluido magnetoreológico es definido como una dispersión de partículas magnetizables, que muestra una transición de un comportamiento líquido a un comportamiento sólido mediante la aplicación de un campo magnético (Bossis, Volkova, Lacin, & Meunier, 2002).

En 1940 emerge el descubrimiento de la electrorreología y magnetoreología realizado por Ravinow y Winslow (Bossis, Lacin, Meunier, & Volkova, 2002a), un fluido magnetoreológico, FMR, tiene ventajas importantes sobre otros fluidos, como por ejemplo la modificación de propiedades mecánicas a partir de la variación de su viscosidad, la cual puede oscilar en un amplio rango de valores con varios ordenes de magnitud gracias a la aplicación de un campo magnético, ésta ventaja permite utilizar los FMR en numerosas aplicaciones tales como la creación de amortiguadores, frenos, embragues, válvulas, sistemas de pulimento (Ashtiani, Hashemabadi, & Ghaffari, 2015), sistemas de amortiguación para prótesis de rodillas (Enriquez-torres & Alonso-arreguin, 2007), amortiguación de vibraciones en edificios (Luis, Jose, Yamile, & Yamile Valencia, 2012) entre otras. Cabe notar que los fluidos MR aunque satisfacen diferentes aplicaciones, lo logran a través de un sólo camino, disipación energética (Bustamante, 2009). Un FMR logra almacenar o disipar energía según el entorno donde se esté aplicando, sorprende aún más en estos fluidos su velocidad de cambio, pasar de un comportamiento líquido a un comportamiento sólido en cuestión de milisegundos, convertirse de un almacenador de energía a un disipador, y para no terminar de magnificar estos fluidos, se debe saber algo más, todo lo anterior el usuario o el entorno lo puede controlar a través de un estímulo externo como lo es el campo magnético. En China se ha logrado estabilizar puentes colgantes a través de éstos fluidos, cuando se presentan condiciones favorables para la estructura del puente, los fluidos estarán estado próximo al sólido, rigidizando toda la estructura, por consiguiente estarán en un modo de almacenamiento de energía, por el contrario en una tormenta con fuertes vientos, los fluidos harán una transición a un estado líquido, y entraran en un modo de disipación de energía, permitiendo así que el puente tenga cierto grado de libertad y disipe la energía proveniente de los vientos, igualmente puede suceder ante la presencia de un sismo (Chen et al., 2003).

Se puede apreciar dichos fluidos son excepcionales y entran a considerarse por los investigadores como materiales inteligentes *Smart materials* (Bica, Liu, & Choi, 2013), sin lugar a dudas dichos materiales abren el pensamiento del lector, dejando escapar el espíritu investigativo y desbordando al ser innovador.

Por otra parte, los FMR están en una época de crecimiento, por lo cual existen asuntos aún sin resolver, por ejemplo a la hora de realizar su aplicabilidad se debe pensar en el diseño del generador de campo magnético pues de antemano se necesitarán sistemas de bobinas que generen dicho campo, terminando así en que ocuparán espacio e incrementarán el peso de todo el sistema (Cavey, Sandu, & West, 2008). En estos fluidos se presentan problemas tales como la sedimentación del medio disperso, la aglomeración, tamaño de partícula, morfología, mineralogía, fracción volumétrica adecuada (Ashtiani et al., 2015) los cuales son temas de investigación diaria.

Se ha evidenciado que el diseño de FMR responde principalmente a la selección del material particulado y al medio continuo dónde las partículas se encuentran suspendidas, garantizando una morfología de partícula, un tamaño de partícula, propiedades magnéticas y estabilidad fisicoquímica adecuadas se puede lograr la modificación reológica de todo el sistema particulado buscando que responda a las solicitudes de un entorno de aplicación específico (Bica, 2004a; Chand, Kumar, Shankar, Porwal, & Pant, 2013). El diseño del FMR debe responder a la exigencia impuesta por la aplicación que se quiera atender, siendo así que no todo fluido MR que se diseñe y elabore podrá satisfacer las diferentes aplicaciones mencionadas anteriormente.

La magnetita, Fe_3O_4 , presente en gran cantidad en las arenas negras de río (Vargas & Forero, 2011), es un óxido de hierro débilmente ferromagnético, y además uno de los óxidos más abundantes en la naturaleza. Por otra parte, es uno de los productos más importantes de la corrosión del hierro y del acero, lo que le ha dado la importancia de ser estudiado como material tecnológico. Además es de especial interés científico por sus propiedades magnéticas (Betancur et al., 2002)

Es aquí donde este proyecto apunta al diseño de un FMR a partir de un mineral de desecho de la minería colombiana, como es el caso de la magnetita, realizando una caracterización fisicoquímica y un estudio detallado de las propiedades reológicas que se pueden obtener de éste material al suspenderlo en aceites sintéticos comerciales y al variar la intensidad de un campo magnético externo, parámetros como tamaño de partícula, concentración volumétrica, deformación, esfuerzo, son igualmente modificados buscando que cumpla las propiedades necesarias para ser sometido en aplicaciones de amortiguamiento especialmente en motocicletas.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar un fluido magnetoreológico con aplicaciones a sistemas de amortiguamiento, a partir de Magnetita residual proveniente de la minería.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar los parámetros reológicos que intervienen en la caracterización de un fluido magnetoreológico.

Caracterizar fisicoquímicamente residuos de magnetita provenientes de minería

Caracterizar reológicamente el fluido magneto-reológico fabricado.

Proponer la aplicación del fluido magnetoreológico diseñado en sistemas de amortiguamiento.

1. Antecedentes

1.1 Materiales Inteligentes (Smart Materials)

Gracias a los avances en tecnología y ciencia, a la unión de campos y disciplinas, se ha podido llegar a materiales innovadores, algunos de estos materiales son conocidos como materiales inteligentes, (Murphy & Wudl, 2010a). La investigación en este tipo de materiales ha demostrado un gran potencial para mejorar la funcionalidad, utilidad y durabilidad de los sistemas de infraestructura civil y mecánica y, como resultado, ofrecen el potencial de importantes contribuciones a la mejora de la productividad de cada nación, la eficiencia y la calidad de vida (Flatau & Chong, 2002).

Los Materiales Inteligentes son llamados así (Smart material) ya que permiten modificar las magnitudes de sus propiedades por medio de estímulos externos que pueden ser controlados (campos eléctricos, magnéticos, luz, calor, etc.), algunas de las propiedades modificables son las mecánicas (dureza, flexibilidad, deformación, tensión, etc.), las propiedades térmicas (transiciones de fase), las propiedades electromagnéticas (Diamagnetismo, Ferromagnetismo) las propiedades ópticas (transmisión de la luz), así como colorimetría, propiedades acústicas y propiedades químicas (Murphy & Wudl, 2010b). Se puede dar una clasificación a este tipo de materiales de acuerdo a la respuesta que presenten ante un estímulo (Drossel, Kunze, Bucht, Weisheit, & Pagel, 2015), así estarán entonces divididos en:

- a) Materiales electroactivos y magnetoactivos. Responden a campos eléctricos y magnéticos cambiando propiedades tales como las mecánicas.
- b) Materiales fotoactivos o fotolumiscentes. Responden emitiendo luz ante distintos estímulos.
- c) Materiales cromoactivos. Son capaces de cambiar su color.
- d) Materiales con memoria de forma. Pueden volver a una forma inicial después de ser sometidos a deformación.

Entre los materiales Electro-activos y Magneto-activos se pueden encontrar los materiales magnetoreológicos y electrorreológicos, los cuales son estudiados desde la Reología, que tiene como objeto de estudio el flujo y la deformación de la materia

(Tanner, 2009), los materiales magnetoreológicos o FMR son suspensiones de fluidos complejos que pueden presentar una transición de líquido a sólido con la aplicación de un campo magnético o eléctrico (Bossis, Volkova, et al., 2002; Mesquida & Lässig, 2012), la principal propiedad que se modifica es la viscosidad; gracias a la interacción entre las partículas dipolares que son magnetizadas al momento de la aplicación del campo, sin embargo, otras variaciones como la forma de las partículas, distribución y tamaño de partícula, tipo de material, fluido portador, temperatura entre otras permiten obtener modificaciones de la viscosidad en diferentes rangos (Bica, 2004a; Jolly, Bender, Carlson, & Drive, 1999).

Las aplicaciones de materiales magnetoreológicos están distribuidas en campos como la construcción, robótica y la mecánica. Actualmente se producen amortiguadores, frenos, válvulas y sellos para autos basados en este tipo de materiales, esta aplicación también se extiende al control de vibraciones en construcciones civiles como puentes y edificios los cuales pueden estar sometidos a generadores de vibraciones como los terremotos (Bica, 2002, 2004b; Jolly et al., 1999; Mesquida & Lässig, 2012).

La investigación que se desarrolla alrededor de estos materiales está dada en gran parte por (Mesquida & Lässig, 2012):

- Estudios dedicados a los medios portadores y su interacción con partículas ferromagnéticas a través de surfactantes.
- Estudio de la dinámica de agregación de estas partículas.
- Aplicación de campos magnéticos unidireccionales o rotantes.
- Formulación de ecuaciones constitutivas y de movimientos acordes con estos sistemas.
- Técnicas y equipos de laboratorio.
- Aplicaciones en ingeniería.

Con respecto a las técnicas y equipos de laboratorio son pocas las empresas dedicadas al desarrollo de éstos, sin embargo, los equipos convencionales de reometría (reómetro, viscosímetro, equipos capilares) pueden ser adaptados con bobinas que generen campos magnéticos, (La magnitud del campo quedará determinada en gran parte por el espacio disponible en el reómetro para la bobina), teniendo en cuenta que el aumento de la intensidad de campo será proporcional al aumento del tamaño de la bobina y por consiguiente será necesario instalar un sistema de refrigeración (Bossis, Volkova, et al., 2002).

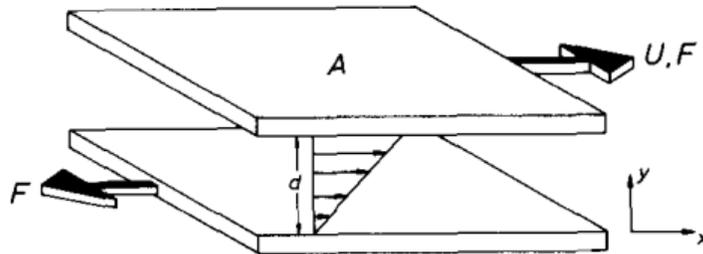
1.2 Reología

La Reología es definida como la ciencia que estudia el flujo y deformación de la materia, dicha ciencia se ha ido integrando a múltiples disciplinas, tales como la Bio-Reología, Reología de polímeros y Reología de suspensiones (Barnes, 1993; Tanner, 2009), esta última explicada a lo largo de este trabajo. Como tal la reología a través de los años ha incrementado su importancia como estudio científico, haciéndose esencial para la investigación de muchas industrias como la de plásticos, pinturas, tintas de impresión, detergentes, aceites, etc. (Barnes, 1993).

1.2.1 Viscosidad, Esfuerzo y Deformación

Si se considera la Figura 1-1 donde se simula que un fluido se encuentra confinado por una placa superior y una placa inferior, ambas de área A , y separadas una distancia d , al aplicar un movimiento a la placa superior con una velocidad relativa U , proporcionará al fluido una velocidad local V_x . Existirá así una fricción interna o una resistencia opuesta por el fluido a su flujo conocidas como la viscosidad.

Figura 1-1 Fluido entre placas (Barnes, 1993)



La fuerza necesaria por unidad de área queda denotada como F/A será proporcional a la velocidad de deformación U/d (tasa de cizalladura, "Shear rate"), y donde la constante de proporcionalidad será η , definida anteriormente como la viscosidad (Barnes, 1993). (Ver *Ecuación 1*.)

$$\tau = \eta \frac{U}{d} \quad \text{ó} \quad \sigma = \eta \dot{\gamma} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde τ es esfuerzo, η viscosidad y $\dot{\gamma}$ tasa de cizalladura.

Al definir la viscosidad se puede entonces caracterizar a los fluidos en dos tipos, Newtonianos y no Newtonianos, los fluidos Newtonianos son aquellos que con la aplicación de un esfuerzo existirá una velocidad de deformación proporcional, por lo que se deduce que su viscosidad es constante, para los fluidos no newtonianos no

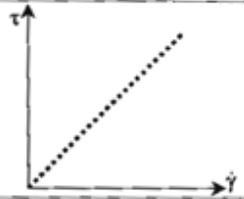
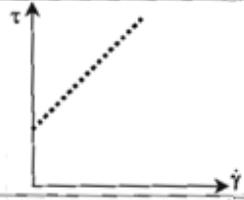
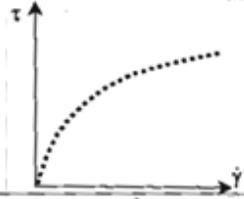
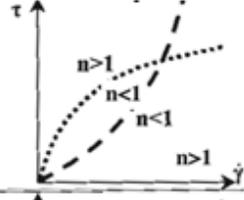
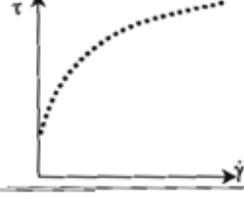
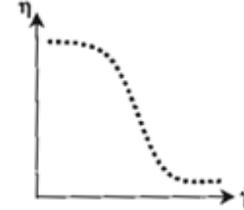
existe una proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad de deformación por lo cual su viscosidad variará dependiendo de la magnitud del esfuerzo o cizalladura aplicada.

Los comportamientos no newtonianos generalmente se presentan en suspensiones, que se definen como dispersiones de partículas en un medio continuo, la reología de suspensiones depende de varios factores como son, entre otros, el contenido en sólidos (C_v concentración volumétrica) y la forma y distribución de tamaños de las partículas suspendidas, ya que éstas pueden cubrir un rango de tamaños muy amplio, desde gránulos de varias decenas de micrómetros a partículas coloidales ($< 1\mu\text{m}$), y formas muy diversas, desde redondeadas a fibras o plaquetas (Gutierrez, Sanchez Herencia, & Moreno, 2000).

En los fluidos no Newtonianos existen diferentes comportamientos, ya que al variar el esfuerzo o la tasa de cizalladura puede ocurrir que la viscosidad disminuya o aumente, con estos comportamientos se han trazado diferentes modelos matemáticos que caracterizan un fluido cuando se varía la tasa de cizalladura, la representación gráfica de la viscosidad en función de la tasa de cizalladura es conocida como curva de viscosidad, y la representación del esfuerzo en función de la tasa de cizalladura se conoce como curva de flujo.

En la Tabla 1-1 se puede observar los modelos reológicos típicos para las suspensiones. El modelo newtoniano como se indicó anteriormente, es lineal gracias a la proporcionalidad existente entre el esfuerzo y la tasa de cizalladura, haciendo que la viscosidad por ende sea constante. El modelo de Bingham igualmente presenta una viscosidad constante, su diferencia respecto al newtoniano es que presenta en su ecuación la sumatoria de un esfuerzo τ_0 , el cual representa el esfuerzo de fluencia, esfuerzo al cual la suspensión inicia su deformación. Si la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de cizalladura, este comportamiento es conocido como pseudoplastico o cizallo-adelgazante (shear-thinning), si por el contrario existe un aumento de la viscosidad el comportamiento se conoce como dilatante o cizallo-espezante (shear-thickening), (Gutierrez et al., 2000; Mezger, 2006; Moreno Botella, 2005).

Tabla 1-1 Modelos reológicos para suspensiones (Gutierrez et al., 2000)

	Modelo	Ecuación	Comportamiento
LINEAL	Newton	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$	
	Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_b \cdot \dot{\gamma}$	
NO-LINEAL	Casson	$\tau = \left[\tau_0 + (\eta_p \cdot \dot{\gamma})^{1/2} \right]^2$	
	Ostwald-de-Waele	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$	
	Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	
	Cross	$\tau = \dot{\gamma} \left\{ \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_b} \right)^n} \right\}$	

Donde τ = Esfuerzo [Pa], τ_0 = Esfuerzo de fluencia [Pa], η = Viscosidad [Pa.s]

$\dot{\gamma}$ = Tasa de cizalladura [s^{-1}], K = Factor de consistencia,

n = Índice de fluidez, $\eta_B, \eta_P, \eta_\infty$ = Límite de viscosidad, (Alta tasa de cizalladura),

η_0 = Viscosidad a cero shear rate, $\dot{\gamma}_b$ = Coeficiente de Cross

1.3 Fluidos magnetoreológicos

Los FMR son materiales cuyas propiedades varían considerablemente en presencia de un estímulo externo, conocidos también como materiales inteligentes. Varios tipos de materiales con estas propiedades han sido identificados (Ashtiani et al., 2015), de los cuales los más importantes son las suspensiones magnéticas (fluidos magnetoreológicos y ferrofluidos), fluidos electroreológicos, materiales piezoeléctricos y aleaciones con memoria de forma (Ashtiani et al., 2015), donde las suspensiones magnéticas cambian sus propiedades reológicas de acuerdo al campo magnético que se aplique.

Estos materiales se dividen en dos grupos: los ferro-fluidos que son una mezcla coloidal estable de nanopartículas ferrimagnéticas y/o ferromagnéticas y fluidos magnetoreológicos (FMR) que son suspensiones de micropartículas magnetizables dispersas en un fluido portador (Bossis, Volkova, et al., 2002). Los FMR se introdujeron por primera vez en 1948 por Rabinow en la Oficina Nacional de Estándares (J Rabinow, 1951). Las partículas en los FMR poseen magnéticamente multidominios de manera que la aplicación de un campo magnético externo induce un dipolo magnético en cada partícula dando como resultado fuertes interacciones entre las partículas. Esto podría conducir a la formación de una red de partículas y/o aglomerados a lo largo de la suspensión. Como resultado, el fluido magnetoreológico cambia de estado líquido a estado semisólido en presencia de un campo magnético siendo reversible dicho cambio (Ashtiani et al., 2015). En la ausencia de un campo magnético, la viscosidad del FMR es una función de las propiedades del aceite portador, agentes de suspensión y fracción y distribución de tamaño de las partículas (Bica et al., 2013; Bossis, Lacis, et al., 2002a; Bossis, Volkova, et al., 2002).

Las características reológicas de los fluidos magnetoreológicos tales como esfuerzo de fluencia y la viscosidad rápidamente pueden ser controladas por la aplicación de un campo magnético. En presencia de un campo magnético externo, el fluido mostrará un comportamiento no newtoniano (Muhammad, Yao, & Deng, 2006). La viscosidad del fluido magnetoreológico depende de la magnitud y dirección del campo magnético aplicado y también de la tasa de cizalladura generada. La viscosidad aparente y otras características reológicas de un FMR se pueden controlar mediante la manipulación de intensidad del campo aplicado (Gravatt, 2003), el esfuerzo de fluencia depende de la especie y tamaño de partícula, así como la fracción en volumen del FMR y la fuerza del campo magnético aplicado (Bica et al., 2013). En la mayoría de aplicaciones de FMR, el tiempo de respuesta tiene gran importancia, este tiempo varía en el intervalo de 10-20 ms dependiendo del diseño del circuito magnético. Por lo tanto, los FMR se convierten en los transmisores electromagnéticos más rápidos en aplicaciones

mecánicas. Un fluido magnetoreológico en función de su composición y densidad de flujo es capaz de presentar límites de esfuerzos elástico dinámico de hasta tres órdenes de magnitud, algunas importantes características y valores típicos de su caracterización se resumen en la Tabla 1-2:

Tabla 1-2 Mayores características de un FMR (Ashtiani et al., 2015).

Propiedad	Valor típico
Viscosidad Inicial	0.2-0.3 [Pa·s] a 25°C
Densidad	3 - 4 [g/cm ³]
Máximo esfuerzo de fluencia	50 -100 [kPa]
Tiempo de reacción	Pocos milisegundos
Temperatura de trabajo	-50 a 150°C

Desde el descubrimiento de la magnetoreología, nuevas estructuras de FMR, sus características y los factores que influyen han sido investigados, siendo aplicados a sistemas innovadores en áreas como la medicina, biotecnología e ingeniería (Ashtiani et al., 2015),

1.4 Parámetros reológicos

Existen parámetros que pueden cambiar la Reología de una suspensión o de un FMR, a continuación, se enuncian los principales.

1.4.1 Tamaño, distribución, forma de las partículas y fracción volumétrica.

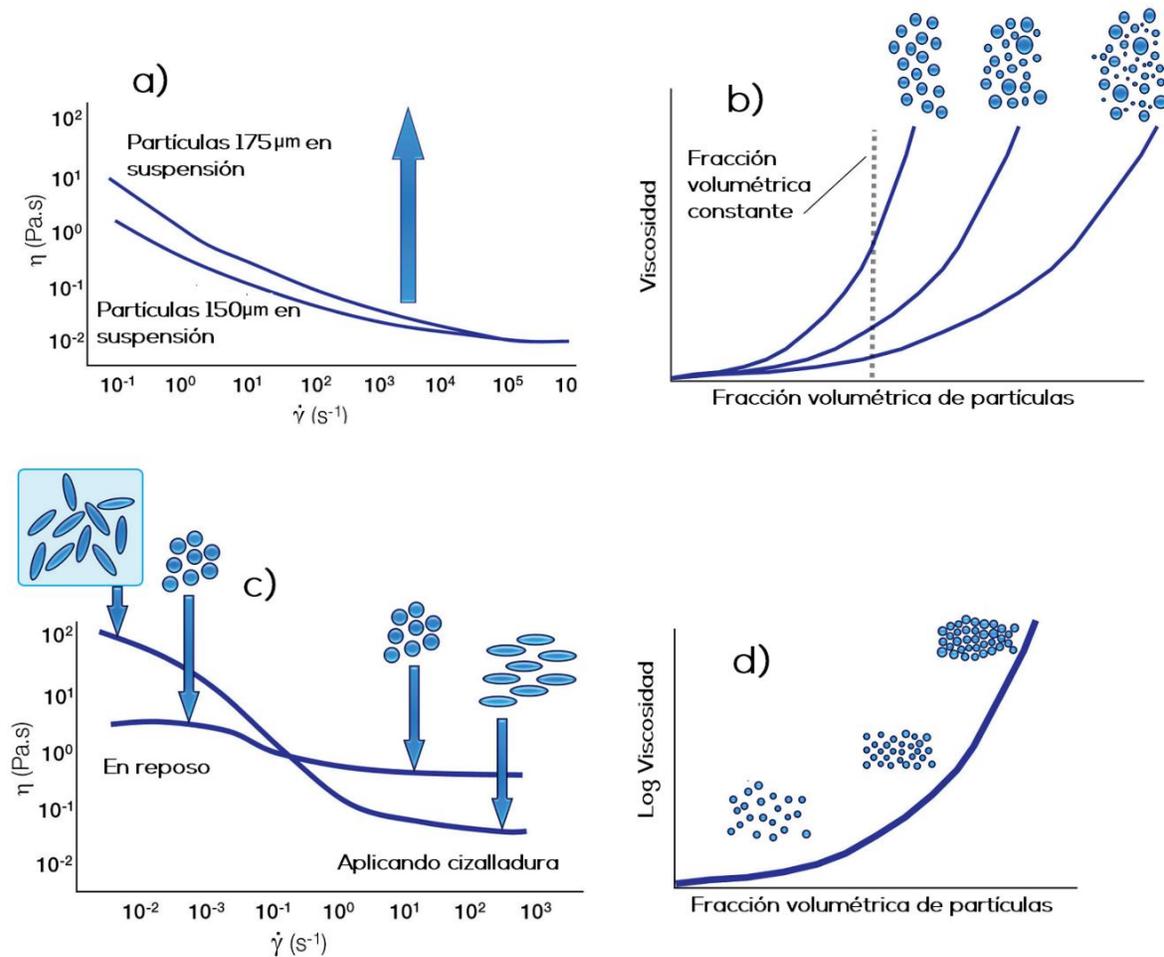
Al variar el tamaño de partícula en los FMR o en una suspensión su reología cambiará, pudiendo disminuir o aumentando la viscosidad o el esfuerzo de fluencia, dichas variaciones suceden generalmente gracias a las interacciones partícula-partícula, si se aumenta el tamaño de partícula las interacciones tenderán a disminuir y por consiguiente la viscosidad es menor, por el contrario, al disminuir el tamaño la viscosidad tenderá a aumentar gracias al aumento de las interacciones partícula-partícula. Como se puede observar en la Figura 1-2 a.

Al poseer una polidispersidad o distribución de tamaño de partícula amplia las partículas tenderán a empaquetarse permitiendo así un mejor flujo gracias a que las partículas pequeñas servirán a modo de sistemas de rodadura para las partículas grandes y por consiguiente se logra obtener una menor viscosidad en la totalidad del flujo, por el contrario, al disminuir la distribución de partícula se puede llegar a tener un incremento de viscosidad a la vez que una mayor estabilidad de la suspensión. Como se puede observar en la Figura 1-2 b.

La morfología juega un papel importante, una suspensión con partículas esféricas tendrá un esfuerzo de fluencia mucho menor que una suspensión fabricada a partir de partículas alargadas, sin embargo, al aumentar la tasa de cizalladura, las suspensiones con partículas alargadas tienden a poseer una viscosidad menor respecto a las suspensiones con partículas esféricas, esto gracias al direccionamiento de las partículas en sentido del flujo campo aplicado. Como se puede observar en la Figura 1-2 c.

Como se indicó anteriormente existirán interacciones partícula-partícula dentro de una suspensión, sin embargo, a mayor distanciamiento de las partículas las interacciones disminuyen y por ende su viscosidad, con el aumento de la fracción volumétrica o la cantidad de partículas en suspensión éstos distanciamientos se verán reducidos, aumentando la cantidad de interacciones y con esto la viscosidad. Como se puede observar en la Figura 1-2 d.

Figura 1-2 Modificación de la viscosidad a partir de parámetros reológicos. a) Tamaño de partícula, b) Dispersión de partículas, c) Morfología de partículas y d) Concentración volumétrica. Tomado y modificado de www.malverninstruments.com



1.5 Metodología de fabricación

La investigación en FMR está compuesta por varios pasos que van desde la fabricación del fluido hasta su aplicación. A continuación, se presenta un esquema generalizado del proceso investigativo que se debe recorrer cuando se trabaja con FMR (Ashtiani et al., 2015; Bica, 2004a; Bossis, Lacis, et al., 2002a).



Algunos de los FMR más generales encontrados en la literatura están constituidos por magnetita (Carrillo & Hidalgo-aamf, 2010; Donado, Mendoza, Santiago-garc, & Hidalgo, 2007; Lee & Ilavsky, 2013; López-López et al., 2006; Supervisors, Prof, Coach, Prof, & Engineering, 2005; Viota, Durán, & Delgado, 2009), nanotubos de carbono, hierro Carbonil en fluidos como aceite minerales o sintéticos. A continuación, se presentan los materiales más utilizados con algunos parámetros de dispersión.

Tabla 1-3 Materiales más utilizados en la fabricación de FMR.(Pérez, Luis, Estrada, Maria, & Mendoza, 2002)

<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
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	aceite de transformador	0.6 - 1	0.06, 0.08 y 0.1	0 - 8
Fe_2O_3	nafteno	0.8	0.1	0-2
keroseno-Fe	agua	0.51	0.06	–

1.6 Reómetros

Los principales equipos para determinar la reología de los FMR son los reómetros, muchos de los equipos con los que se han hecho investigaciones en este campo fueron

principalmente modificaciones de reómetros convencionales, sin embargo, para la investigación se puede partir de los principales equipos que se comercializan, detallando sus principales características como rango de campos magnéticos generados, geometrías utilizadas y parámetros que se permiten modificar (esfuerzo, tasa de cizalladura, temperatura etc.) en la Figura 1-3 se puede observar un reómetro (Physica MCR 500) capaz de medir fluidos magnetoreológicos (Anton Paar, 2011).

Figura 1-3 Physica MCR 500 con dispositivo para mediciones magnetoreológicas.



Para la presente investigación se cuenta con un reómetro rotacional Kinexus pro, este equipo es capaz de trabajar en condiciones muy similares al equipo Physica MCR 500, exceptuando la posibilidad de mediciones magnetoreológicas, sin embargo, la adaptación de un equipo de generación de campo magnético ya se ha realizado anteriormente en viscosímetros, datos de este este procedimiento son reportados en varios estudios (Donado et al., 2007; José, Bombard, & Knobel, 2000; Perez, Luis, Estrada, Maria, & Mendoza, 2002), donde generalmente es utilizado un viscosímetro de marca Brookfield al cual se adaptan bobinas Helmholtz, que entregan campos magnéticos que están en un rango de 20 a 500 Gauss. Otros estudios (Leblanc & Barre, 2000a) han mostrado los procedimientos de diseño que se llevan a cabo para la construcción de reómetros (no magnéticos) mostrando que esto se puede lograr con materiales que son fácilmente conseguidos en el comercio o piezas que son posibles de fabricar. En general se indica que estos reómetros pueden ser obtenidos a muy bajo costo y con buenas prestaciones. Con base en investigaciones publicadas (Cavey et al., 2008; Imaduddin, Mazlan, & Zamzuri, 2013; Leblanc & Barre, 2000b) se obtienen los siguientes parámetros de diseño que aportan significativamente a la posible modificación del reómetro Kinexus pro:

- Usar geometrías que no sean magnetizables con el fin de evitar posibles errores de medición.
- Los generadores del campo magnético deberán ser puestas en una posición que se direcciona el campo perpendicular al flujo de las partículas, como se

observa en la Figura 1-4. ya que en una dirección paralela los efectos sobre la viscosidad son mínimos.

Por otra parte, en ninguna de las investigaciones revisadas a la fecha se ha encontrado la adaptación en un reómetro rotacional pues todos los trabajos en los cuales se hacen modificaciones estas se desarrollan sobre viscosímetros, por lo cual deja a la investigación en un estado de búsqueda de parámetros y de alternativas de diseño específicos para el kinexus pro. Finalmente, las características reológicas de fluidos newtonianos y no newtonianos analizadas por diferentes métodos reológicos en numerosas investigaciones han revelado que la reometría rotacional es uno de los métodos más comunes en magnetoreología. (Ashtiani et al., 2015)

1.7 Modelo Reológico

Los FMR en un campo magnético ya no pueden ser descritos por el modelo de fluido Newtoniano, en muchos casos, los FMR bajo una intensidad de campo magnético aplicado puede ser aproximado utilizando el modelo Bingham y el modelo de Herschel-Bulkley (Imaduddin et al., 2013). El modelo plástico de Bingham es el más simple y más popular en el campo de los FMR, para hallar el esfuerzo de fluencia de la suspensión a través de éste modelo sólo se debe realizar la interpolación de la curva de flujo hasta la intersección del eje Y o a una tasa de cizalladura cero (Choi, Park, Cho, & Choi, 2006). En la siguiente **Ecuación 2** se presenta el modelo reológico de Bingham, el cual se diferencia del modelo newtoniano por presentar un esfuerzo de fluencia τ_0 . Sin embargo, como se observa, este modelo es lineal y muchas de las suspensiones tienen un comportamiento cizallo adelgazante o cizallo espesante, los cuales deberán ser modelados a través de una ecuación polinómica, para ello el modelo de Herschel Bulkley es aplicado, **Ecuación 3**, está igualmente compuesto por un parámetro de fluencia que será el esfuerzo de fluencia de la suspensión y dos parámetros empíricos K y n, K es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento de flujo, si el factor n es igual a 1 entonces el modelo es el de Bingham, si por el contrario el valor de n es menor a 1 será un factor que indicará que la muestra presenta un comportamiento cizallo adelgazante, si n es mayor a 1 entonces la muestra tendrá un comportamiento cizallo-espesante

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad \text{Ecuación 2}$$

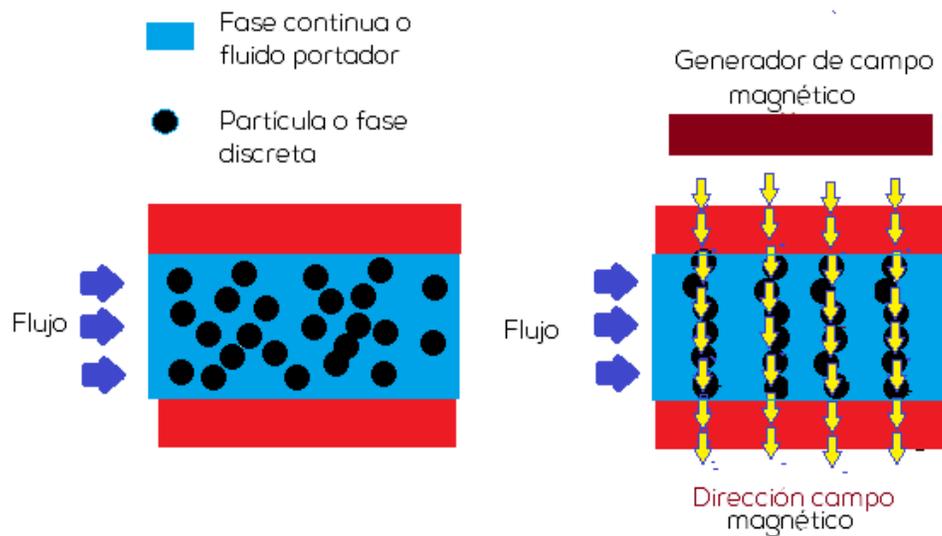
$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \text{Ecuación 3}$$

1.8 Amortiguador Magnetoreológico

En los últimos años, los FMR han ganado mayor reconocimiento por sus múltiples aplicaciones, esto gracias a que demuestran un cambio en la viscosidad cuando se expone a un campo magnético. Jacob (Jacob Rabinow, 1948), un inventor en la Oficina Nacional de Normas, desarrolló los primeros FMR en la década de 1940, generando gran interés en la tecnología para dispositivos como las transmisiones y embragues automáticos, pero la actividad se dejó al poco tiempo. El resurgimiento del interés en fluidos MR se produjo a principios de 1990 cuando Dave Carlson de Lord Corporation comenzó a experimentar con fluidos en una variedad de dispositivos, incluyendo suspensiones de vehículos (Jolly et al., 1999).

Los FMR originales de Rabinow consistían en nueve partes en peso de carbonil de hierro por una parte de un fluido portador, que generalmente podía ser aceite de silicona o aceite a base de hidrocarburo. Igualmente se añadía grasas o soluciones tixotrópicas para aumentar la estabilidad de fluido y reducir la sedimentación (Gravatt, 2003). Los fluidos modernos utilizan partículas de hierro de tamaño micrométrico recubiertas con anticoagulantes en un fluido portador de aceite hidrocarbonado, aceite a base de silicona o agua. Los fluidos también contienen un número de agentes anti-sedimentación para evitar que el fluido sedimente y endurezca.

Los FMR se activan mediante la aplicación de un campo magnético a través del fluido. El campo inducido provoca la alineación de las partículas a lo largo de la dirección del campo magnético a través de una interacción dipolo-dipolo inducido entre las partículas adyacentes, formando una serie de cadenas estructuradas. Una vez que estas cadenas se rigidizan en columnas fuertes a lo largo de la sección transversal del amortiguador, Ver Figura 1-4, Cuando sucede esto se necesita producir un esfuerzo superior sobre el fluido para romper las cadenas y que nuevamente exista el flujo de la suspensión. El esfuerzo necesario para hacer el rompimiento de estas cadenas se denomina el esfuerzo de fluencia del FMR (Bica et al., 2013; Bossis, Lacin, Meunier, & Volkova, 2002b).

Figura 1-4 Estructuras formadas al aplicar un campo magnético. Elaboración propia.

Al aumentar el campo magnético sobre FMR se logra obtener cadenas más resistentes y por consiguiente se logra obtener un esfuerzo de fluencia superior. El esfuerzo de fluencia al ser variable en los FMR es ventajoso en aplicaciones tales como frenos, embragues o en sistemas de amortiguamiento de los rotores de helicóptero (Gandhi, Wang, & Xia, 2001).

Recientes y futuras aplicaciones de amortiguadores incluyen la protección de edificios civiles e industriales contra sacudidas sísmicas, el control y la atenuación de vibraciones de máquinas herramientas e instalaciones industriales, pontones marítimos y fluviales, vehículos, etc. Protección contra vibraciones mecánicas y/o sacudidas sísmicas se está logrando mediante amortiguadores fijos en modo activo y/o semi-activo (Bica et al., 2013). Actualmente fabricantes de amortiguadores MR son Lord Corporation, Delphi y Carrera Shocks, Inc. Cadillac y modelos Corvette que introdujeron un sistema de control de la suspensión electrónica en 2003 y que contó con la utilización de amortiguadores MR (Gravatt, 2003).

1.8.1 Reología en un amortiguador

Para definir los comportamientos y parámetros reológicos que existen tras un entorno de amortiguamiento, se debe definir la funcionalidad del amortiguador y su diseño. Los amortiguadores en principio, constan de un cilindro dentro del cual un pistón se mueve mientras impulsa el FMR. La suspensión se puede pasar de una cámara a la otra a través de orificios realizados en el pistón, en la Figura 1-6 se puede ver los

componentes principales para un sistema de amortiguamiento general. Como se puede apreciar en la figura el campo magnético no es aplicado en toda la extensión del fluido, sino que es aplicado en una zona puntual y localizada, de dicha zona se puede calcular la tasa de cizalladura a la que es sometido el FMR cuando el pistón está en movimiento, Bica registra en su investigación (Bica, 2002) sobre un sistema de pistón robusto velocidades de desplazamiento entre 3 y $23 \frac{m}{s}$, si se hace un cálculo de la tasa de cizalladura tendremos que para un orificio anular de espesor de 0.005 m (5 mm) la tasa de cizalladura mínima será de 600 s⁻¹ y la máxima de 40000 s⁻¹, sin embargo, en los reómetros no se logran alcanzar tasas de cizalladura tan elevadas ya que no se puede contener la muestra dentro de los cilindros o platos paralelos, para el reómetro en el que se trabaja esta investigación se logran tasas satisfactorias hasta 1000 s⁻¹, una tasa de cizalladura de 0.01 s⁻¹ a 1000 s⁻¹ corresponden a una velocidad inicial de arranque hasta una velocidad de 10 m/s, suficiente para simular lo registrado en un sistema de amortiguamiento de motocicleta (Gravatt, 2003).

Otro parámetro físico y que sirve para simular reológicamente el comportamiento del FMR cuando es sometido a una aplicación de amortiguamiento es la frecuencia de oscilaciones que tiene el pistón, la investigación se trabajará sobre un caso de aplicación. En la Figura 1-7 se observa un pista de motocross la cual presenta baches de diferentes alturas y diferentes distanciamientos entre uno y otro, igualmente presenta zonas rectas y planas, con este cambio de zonas se espera que el amortiguador sea sometido a diferentes oscilaciones, Bica en el 2002 presenta sus investigaciones a 1 Hz y 0.5 Hz, sin embargo, para una moto de supersport (Figura 1-5-A) esta frecuencia puede alcanzar generalmente 3 Hz en una conducción pasiva (Gravatt, 2003) y una moto de motocros pueden alcanzar hasta 10 Hz según el espaciado del rizado de la pista igualmente en conducción pasiva (ver Figura 1-5-B). Los valores anteriores son para casos generales, sin embargo, no se descarta que la suspensión se exija a frecuencias mucho más altas del orden de 30 Hz (Gravatt, 2003) donde participan pequeñas amplitudes de deformación. Estas amplitudes de deformación se asocian con el porcentaje de deformación del FMR, así que al exigir un sistema de amortiguamiento en baches con gran altitud o en salto de gran altura en motocros tendremos amplitudes de deformación altas sobre el FMR, por el contrario, en pistas pavimentadas y de alta velocidad consideraremos tener bajas amplitudes de deformación. Por lo anterior es necesario el conocimiento de las propiedades dinámicas ya que describen la eficiencia de amortiguación, parámetros tales como el ángulo de pérdida $\tan(\delta)$ y módulo de cizalla G^* , que consiste en el módulo de almacenamiento G' y módulo de pérdida G'' se utilizan, y son determinadas a través de ensayos reológicos de oscilación. (Boczkowska & Awietjan, 2012)

Figura 1-5 Diferentes escenarios que generan diferentes valores de frecuencias sobre el amortiguador. Tomado de <http://www.motorcycle-usa.com/> y <http://motorcycles.wikia.com/>



Figura 1-6 Sistema de amortiguamiento general. Tomado y modificado de (Bica et al., 2013)

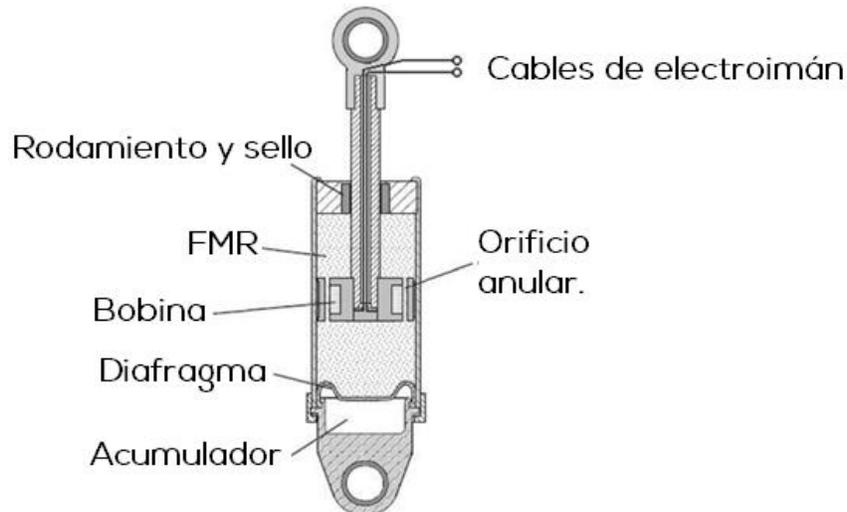


Figura 1-7 Pista de Motocross baches que infieren diferentes oscilaciones en el amortiguador. Tomado de <http://foros.arquonauta.com/>



Otro parámetro importante en la reología del FMR dentro de un amortiguador es el esfuerzo de fluencia, el cual dará razón de la capacidad que tiene el fluido de resistir los esfuerzos impuestos por el entorno antes de fluir, así se tiene que a un mayor esfuerzo de fluencia existirá una mayor capacidad de absorción de energía por parte del amortiguador, el esfuerzo de fluencia físicamente se verá representado en el esfuerzo necesario para romper las cadenas formadas por las partículas (Gravatt, 2003).

Con lo dicho anteriormente se considera así que al estudiar el caso práctico de una motocicleta se deberá tener en cuenta diversos parámetros tales como, tasa de cizalladura, esfuerzo de fluencia, frecuencia y amplitud reflejado en los parámetros de módulo elástico, módulo viscoso entre otros. En la **Tabla 1-4** se realiza un resumen de las principales características reológicas en un caso de aplicación como son las motocicletas.

Tabla 1-4 Parámetros reológicos para un aceite de acuerdo al entorno.

Tipo de moto		 <p><small>Image shows european spec bike</small></p>	
Característica	Moto diseñada para entornos en tierra, con la posibilidad de realizar saltos y conducir sobre obstáculos. Velocidad media, bajo peso. Amortiguación de amplia deformación.	Moto diseñada doble propósito, para alta velocidad con la posibilidad de entrar en entornos de tierra, con posibilidad de conducir en obstáculos no exigentes.	Moto diseñada para zonas pavimentadas, alta velocidad, gran peso. Amortiguación rígida, corta deformación.
Frecuencia de amortiguación general	Altas frecuencias en la deformación, frecuencias medias de 10 HZ	De acuerdo al entorno, puede oscilar entre 0.5 Hz y 10 Hz	Bajas frecuencias, principalmente presentadas en el momento de frenar o pasar reductores de velocidad, 0.5 – 1 Hz
Amplitud	Grandes amplitudes de deformación	De acuerdo al entorno, amplitudes de deformación media.	Baja amplitud de deformación
Tasa Cizalladura	Evaluada para 0.01 s-1 a 1500 s-1		
Característica del aceite	Aceite de baja viscosidad, 2.5W	Aceite media viscosidad 5- 7.5W	Aceite alta viscosidad 10W

2. Trabajo Experimental

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en este trabajo se ejecutó la siguiente metodología.

- a) Identificación de los parámetros influyentes en la reología de los fluidos magnetoreológicos, FMR.
- b) Caracterización físico-química de la magnetita, determinación de la distribución de tamaño de partícula, morfología a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), mineralogía a través de DRX y EDS.
- c) Fabricación de diferentes suspensiones magnetoreológicas realizando una evaluación reológica donde se incluyen análisis de flujo, curvas oscilatorias y esfuerzos de fluencia.
- d) Identificación de las principales aplicaciones para los FMR diseñados
- e) Determinación del modelo reológico que ajuste a las curvas de esfuerzo.
- f) Determinación de las características necesarias de un FMR para que satisfaga las necesidades de amortiguamiento de un vehículo.
- g) Construcción de una metodología para la fabricación de FMR a partir de Magnetita.

2.1 Fluido portador y partículas

Para crear los FMR se selecciona un fluido portador y diferentes tamaños de partículas, Las partículas son obtenidas de magnetita de una muestra procedente de arenas negras de río, a esta muestra llamada muestra principal (MP), a la cual se le realizó el siguiente proceso con el fin de obtener las muestras de estudio:

- Separación de la muestra magnética de las escorias (Lodos y rocas) con medios magnéticos.
- Lavado de MP seleccionada.
- Secado de MP en un horno por 24 horas.
- Reproceso de separación de MP a través de medios magnéticos
- Proceso de pulverización de MP (Equipo pulverizador)
- Molienda de MP en un molino cerámico con bolas de alúmina por 8 horas.

- Obtención de MP y lavado.
- Separación MP de escorias a través de medios magnéticos.
- Proceso de tamizaje para recolectar diferentes tamaños de muestra, los tamices usados fueron, malla 400(38 μm), malla 500 (25 μm) y malla 635 (20 μm), de allí se obtienen las muestras MP+400, MP+500, MP+635 y MP-635. a cada una de las anteriores muestras se les realiza una caracterización química, morfológica y de distribución de tamaño.
- Lavado de cada una de las muestras obtenidas.
- Secado final en horno a 50 grados por 72 horas.

Posteriormente se seleccionó el aceite comercial 2.5W de Motul sintético como medio portador de partículas, exclusivo para sistemas de amortiguamientos en motocicletas de alto desempeño, este aceite presenta la menor viscosidad de productos del mercado en su tipo, con un valor de 0.024 Pa.s. Con este aceite se formaron los distintos FMR, los cuales fueron creados a diferentes tamaños de partícula y en varias concentraciones para ser sometidos a distintas intensidades de campo magnético, se espera que con el aceite seleccionado y con adecuados tamaños de partículas y concentraciones, este FMR pueda variar su viscosidad en un amplio rango, donde pueda sustituir a los aceites de mayor viscosidad, tal como el aceite 20W, que presenta una viscosidad de 0.34 Pa.s determinada a partir de una curva de flujo, así pues se espera que el rango en el que se mueva la viscosidad del FMR sea entre 0.024 y 0.34 Pa.s

2.2 DRX

Se utilizó la técnica de difracción de rayos X para determinar la mineralogía de las muestras MP+400, MP+500, MP+635 Y MP-635 estudiadas durante el proyecto. El equipo que se utilizó es un Panalytical Xpert-Pro con una lámpara de cobre de longitud de onda de 1,548, con 2θ de cero hasta 60° y una velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$.

Para la determinación de la especie mineralógica de la muestra se utiliza como principal de comparación dos difractogramas de Magnetita pura publicados en diferentes investigaciones (Atta, El-Mahdy, Al-Lohedan, & Al-Hussain, 2014; Zapata, 2008), las cuales se muestran en la Figura 2-1 y Figura 2-2.

Figura 2-1 Difractograma patron Magnetita (Atta et al., 2014)

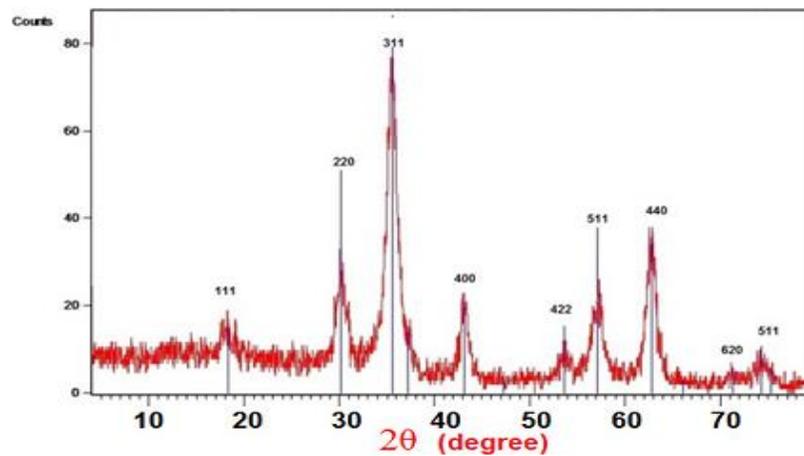
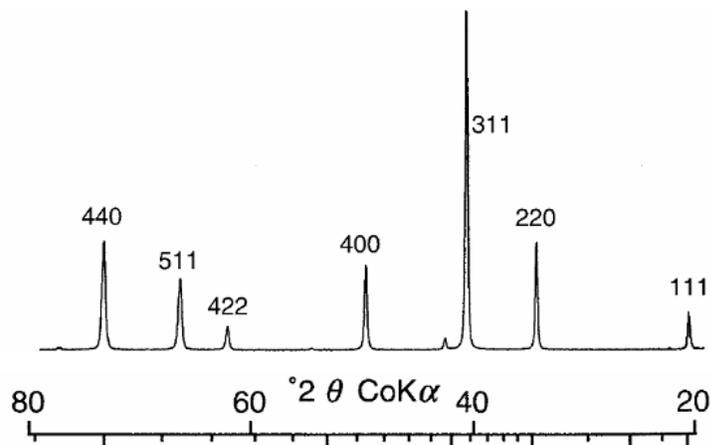


Figura 2-2 Difractogramas principal Magnetita de alta pureza. (Zapata, 2008)



2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM) e Identificación de análisis elemental (EDS)

Para el análisis SEM y EDS se utilizó un equipo Phenom pro X de la marca Phenom World (ver Figura 2-3), el cual posee un alcance de resolución entre 80 X y 130000 X, con un rango de aceleración de voltaje entre 4.8 KV y 15 KV, integra una sonda de espectrografía de energía dispersiva (EDS) que permite la identificación elemental y caracterización química. Para la preparación de la muestra se utilizó una Nébula, la cual permite realizar una dispersión de la muestra sobre los porta-muestras del SEM, obteniendo así una distribución monocapa de las partículas evitando la aglomeración y facilitando la obtención de las propiedades geométricas y tamaño de las partículas.

Figura 2-3 SEM, Phenom pro X. (www.phenomworld.com)Figura 2-4 Nebula, Dispersión de muestra para SEM. (www.phenomworld.com)

2.4 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

La distribución de tamaño de partícula se determinó a través de la técnica de difracción laser, en un equipo Mastersizer 3000 de la empresa Malvern Instruments (ver Figura 2-5), con un rango de medida de $0,01 \mu\text{m}$ a $3500 \mu\text{m}$. La unidad de dispersión utilizada es Hydro MU donde el medio dispersante fue agua. Se realizaron 5 mediciones para cada una de las muestras. El resultado final cumplió con una correlación superior al 99%, igualmente para garantizar la reproducibilidad entre los cinco resultados obtenidos se aplicó la norma ISO 13320 (ISO, 2009)

Figura 2-5 Mastersizer 3000 (www.malvern.com)



2.5 Análisis reológico

Los análisis reológicos se realizaron en un reómetro rotacional Kinexus Pro del fabricante Malvern Instruments (www.malvern.com) ver Figura 2-6.

Con este instrumento es posible realizar control de esfuerzo en torques desde 10 nNm hasta 200 nNm para las pruebas de viscosimetría en modo de cizalladura controlada o esfuerzo controlado y desde 2 nNm hasta 200 nNm para pruebas oscilatorias con una resolución de 0.1 nNm. Con este equipo se simulan las condiciones de proceso reales de amortiguamiento de un vehículo (Gravatt, 2003). Este equipo permite trabajar en diferentes modos de funcionamiento reológico – control de esfuerzo, control de tasa de cizalladura y la oscilación controlada a partir de un control de la amplitud o esfuerzo.

El reómetro Kinexus es usado en una configuración de cilindros concéntricos C25 corrugada en Titanio. El sistema de medición de cilindro concéntrico consiste en un bob giratorio (cilindro interior) situado a una distancia fija (Gap) del cilindro exterior con la muestra contenida en el espacio anular formado entre ellos, Ver Figura 2-7.

Los beneficios que presta este tipo de geometría para caracterizar reológicamente los FMR, es que no hay incidencia de los campos magnéticos sobre ella que pueda perturbar la señal recibida por el reómetro, si por el contrario la geometría utilizada fuera de acero inoxidable, el campo magnético aplicado sobre el FMR la atraería hacia uno de los polos de los imanes, impidiendo que se mueva libremente y que cense valores de viscosidad reales en los FMR.

Por otra parte la configuración de cilindros genera un flujo perpendicular a las líneas de campo o a las estructuras formadas por el FMR (Ver Figura 2-8), permitiendo así que la viscosidad reportada esté asociada a la resistencia de la estructura formada

cuando es sometida a flexión, finalmente la geometría es corrugada, su diseño permite un agarre mecánico de las estructuras con respecto a las paredes de la geometría a la vez que garantiza una homogenización de la suspensión.

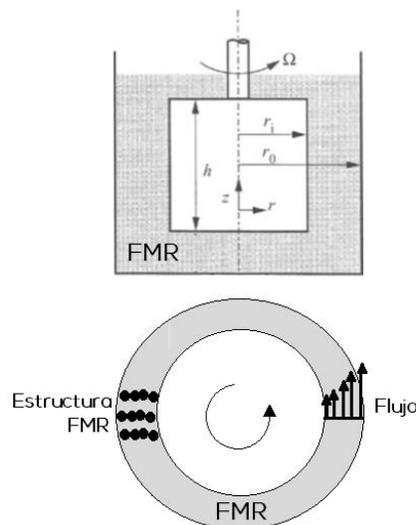
Figura 2-6 Reómetro Kinexus pro X (www.malvern.com)



Figura 2-7 Cilindros concéntricos C25.



Figura 2-8 Cilindros concéntricos, dirección de flujo. Tomado y modificado de (Rao, 2009)



h es la altura del bob, r_i el radio de la geometría y r_0 es el radio interno del cilindro, con la resta de r_0 menos r_i se obtiene el GAP del sistema de cilindros concéntricos,

Ω dirección de la rotación.

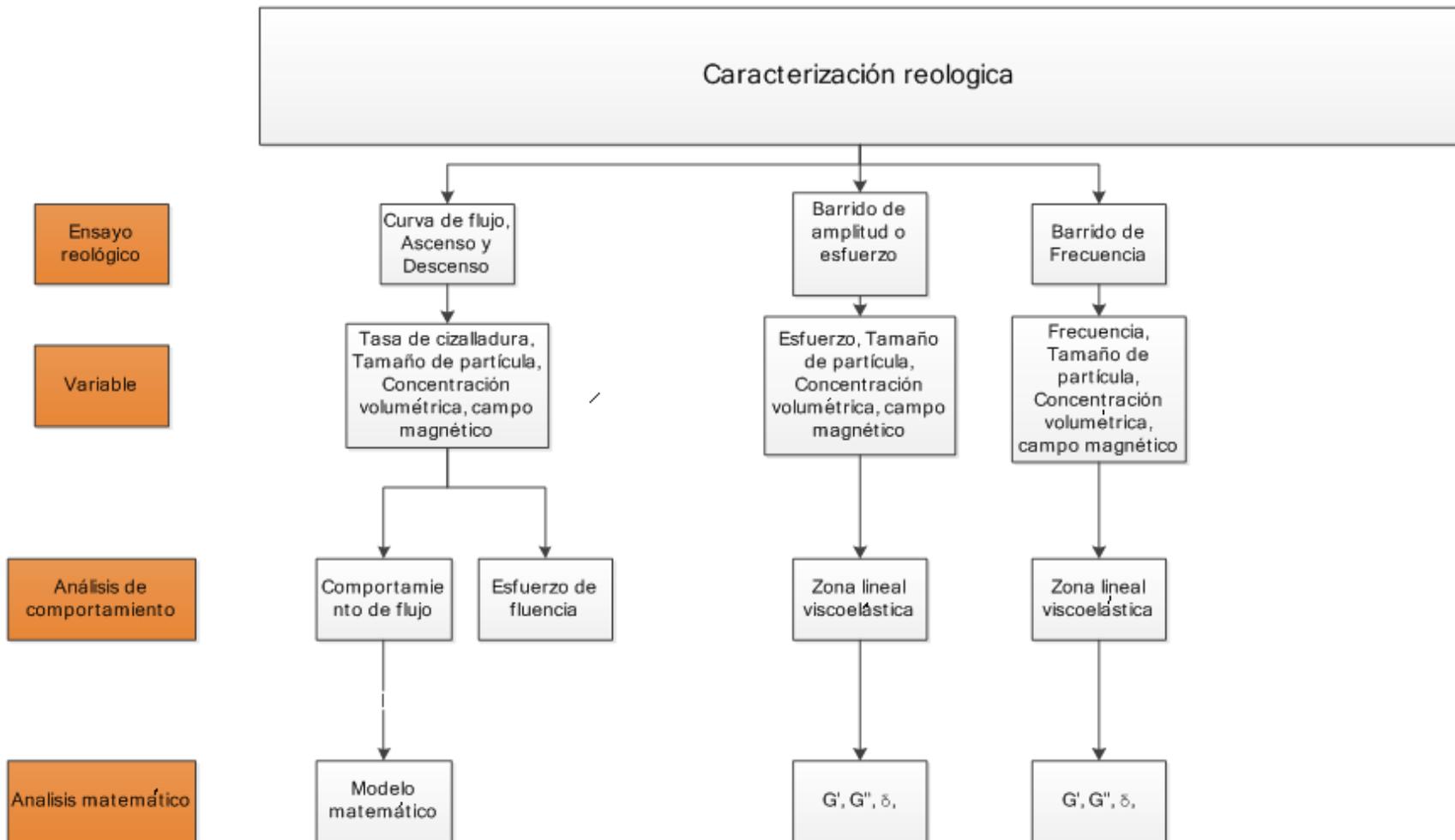
2.5.1 Parámetros reológicos a evaluar.

En la Figura 2-9 se presenta la caracterización reológica propuesta para esta investigación basada en un caso de estudio de amortiguación en diferentes estilos de motocicletas. En la Tabla 2-1 se muestra los rangos de las variables evaluadas.

Tabla 2-1 Variables y magnitudes estudiadas durante la caracterización reológica

Ensayo	Tamaño de partícula	Tasa de cizalladura	Concentración volumétrica	Campo Magnético
Curva de flujo	MP+400 MP+500 MP+635 MP-635	0.01 s ⁻¹ a 1000 s ⁻¹	5%	0 Gauss 50 Gauss
			10%	100 Gauss 300 Gauss
			15%	600 Gauss 1200 Gauss
Barrido de esfuerzo	MP+400 MP+500 MP+635 MP-635	0,001 Pa - 1200 Pa	5%	0 Gauss 50 Gauss
			10%	100 Gauss 300 Gauss
			15%	600 Gauss 1200 Gauss
Barrido de Frecuencia	MP+400 MP+500 MP+635 MP-635	100 Hz- 0,1 Hz	5%	0 Gauss
			10%	50 Gauss 100 Gauss
			15%	300 Gauss 600 Gauss 1200 Gauss

Figura 2-9 Caracterización reológica propuesta.



2.6 Campo Magnético

La aplicación del campo magnético es lograda a través de la construcción de un dispositivo que integra cuatro imanes de neodimio con la capacidad de producir un campo magnético sobre el FMR en un rango de 0 a 0.25 Teslas (Ver Figura 2-10). El dispositivo se integra al reómetro Kinexus (Ver Figura 2-11 y Figura 2-12), teniendo en cuenta que los campos magnéticos no deberán afectar la estandarización del equipo, para lograr esto se trabajó en conjunto con los técnicos representantes de Malvern Instruments para Colombia, quienes hicieron las recomendaciones pertinentes para el acoplamiento. Los imanes fueron posicionados con caras opuestas, recordando que las líneas de campo toman un direccionamiento del polo norte al polo sur del imán que está en sentido opuesto, con esto se logra que las líneas de campo de los cuatro imanes tengan un direccionamiento especial y que se produzca un enmallado de las líneas de campo sobre el fluido como se muestra en la Figura 2-13. En la Figura 2-14 se puede observar con detalle las estructuras formadas por la magnetita, paralelas a las líneas de campo, ésto se ha logrado agregando la magnetita dentro de la copa C25 antes de formar la suspensión con el fluido portador. La modificación de la distancia entre los imanes permite reducir la intensidad de campo que se aplica sobre la suspensión, logrando variar la resistencia de las estructuras formadas.

El campo dentro de la suspensión es medido a través de un Gaussímetro, instrumento desarrollado por la empresa NEMCO Ltda. (ver Figura 2-15)

Figura 2-10 Dispositivo fabricado para direccionar el campo magnético sobre el FMR.

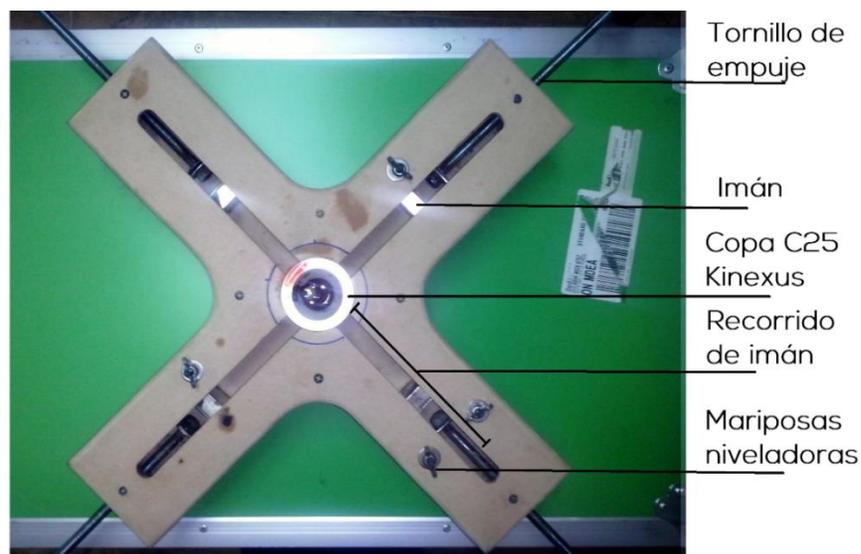


Figura 2-11 Integración reómetro y dispositivo de campos.

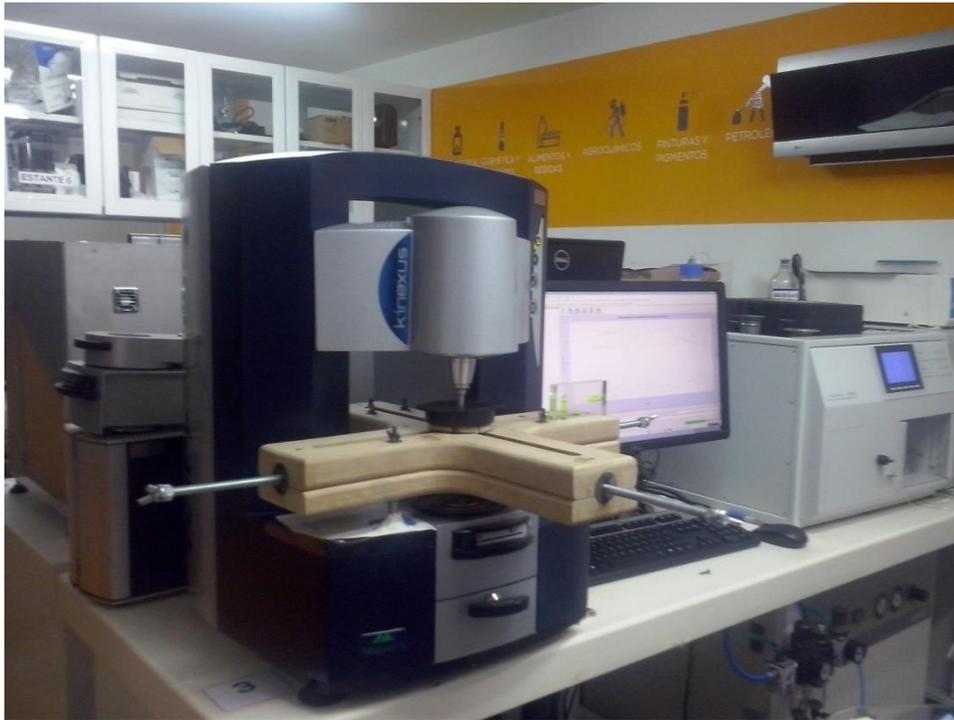


Figura 2-12 Integración reómetro y dispositivo de campos Frente.



Figura 2-13 Líneas de campo, posicionamiento de imanes sobre la copa C25 del Reómetro. Vista superior.

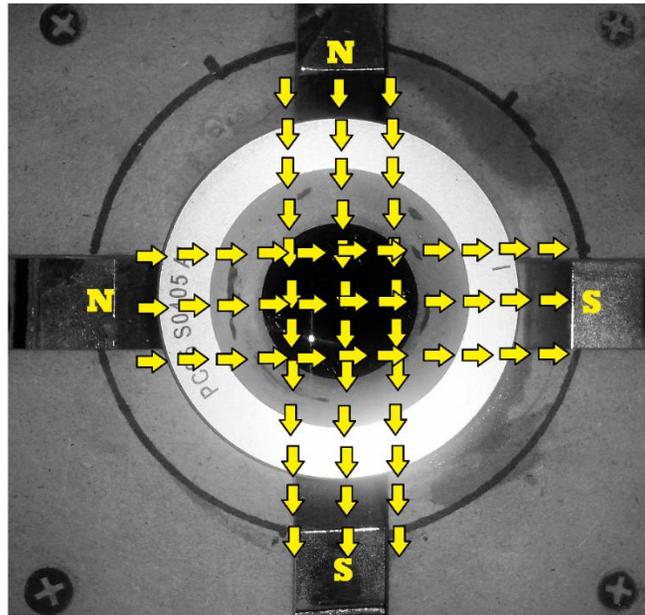


Figura 2-14 Estructuras formadas paralelas a las líneas de campo.

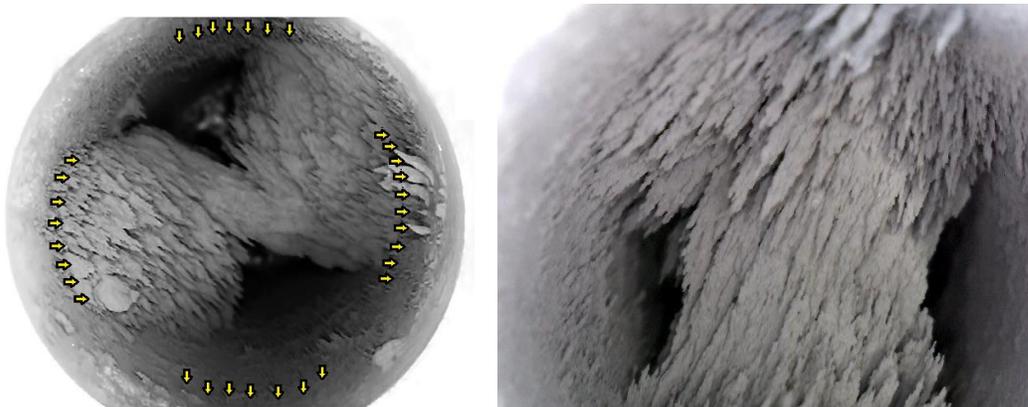


Figura 2-15 Gaussmetro, para medición del campo.



2.7 Caracterización Morfológica

La caracterización morfológica se realizó a través del software ProSUIT Particle Metric de la empresa Phenom-World, este software adquiere imágenes de las partículas directamente desde el SEM (Mismo equipo enunciado en el apartado 2.4), y con las mismas imágenes realiza el reconocimiento morfológico. Las partículas que son detectadas se colorearán para posteriormente procesar y analizar todas las propiedades de las mismas partículas que fueron detectadas en un conjunto de datos, creando histogramas y gráficos de dispersión para correlacionar características de partículas, tales como el diámetro, circularidad, relación de aspecto, convexidad, etc.

Como se indicó anteriormente parámetros tales como la fracción de volumen de partículas, interacciones entre partículas, el tamaño de partícula y la forma de las partículas son algunos modificadores reológicos en las suspensiones, estas modificaciones se ven atribuidas a las siguientes condiciones: (Mueller, Llewellyn, & Mader, 2009)

- El flujo local alrededor de una partícula no esférica es diferente al flujo alrededor de una partícula esférica, de ahí la contribución de la partícula a la viscosidad de suspensión también es diferente.
- Las partículas no esféricas son orientables y su contribución a la viscosidad de suspensión depende de su orientación.
- Las interacciones de partículas están fuertemente influenciadas por la forma de las partículas; en general, a la misma fracción de volumen de partículas, el grado de interacción entre las partículas no esféricas será mayor que entre las partículas esféricas.

En la Tabla 2-2 se presentan las definiciones de los parámetros cuantificados para cada una de las muestras.

Tabla 2-2 Parámetros morfológicos de partícula. (www.malvern.com)

Propiedad	Definición
Diámetro equivalente	Diámetro de un círculo con la misma área que la imagen bidimensional de la partícula.
Eje mayor	Diámetro de un círculo circunscrito en el área de la partícula
Eje menor	Diámetro de un círculo inscrito en el área de la partícula
Circunferencia	Perímetro de un círculo con la misma área de la partícula
Área	Área superficial de la partícula
Relación de aspecto	Relación existente entre el eje mayor y el eje menor
Circularidad	La circularidad es una relación del perímetro de un círculo con la misma área que la partícula dividida por el perímetro de la imagen de la partícula.

3.Resultados y discusiones

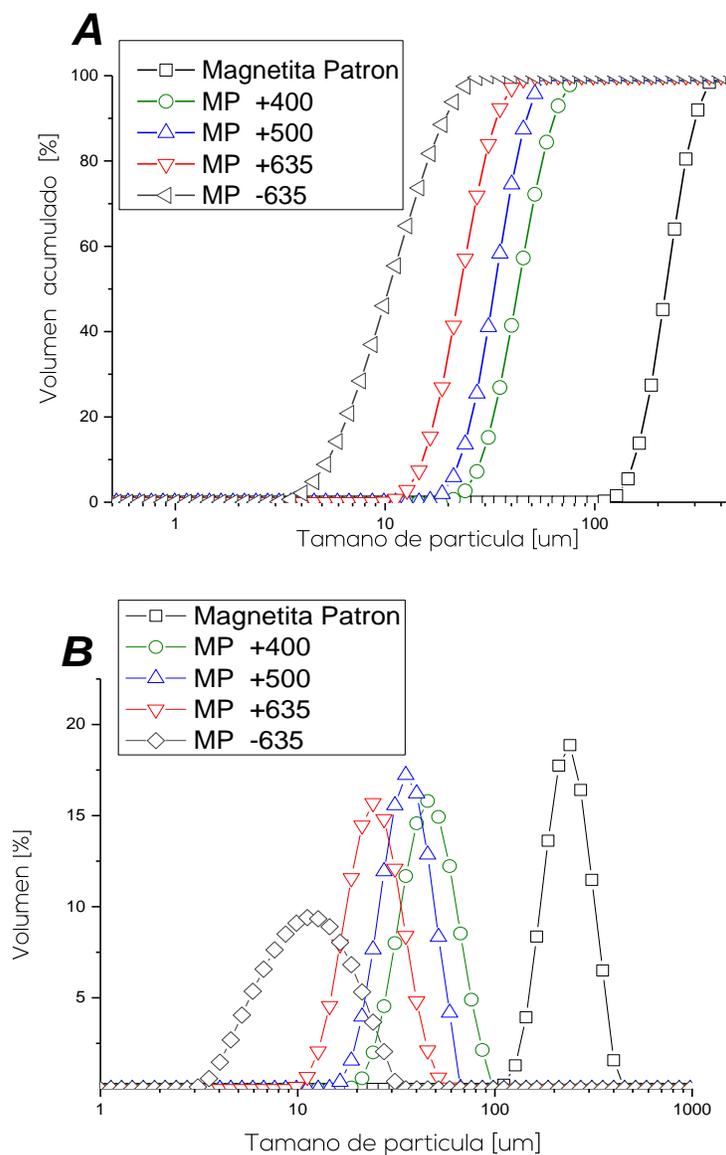
3.1 Distribución de tamaño de partícula

La Figura 3-1 presenta la distribución de tamaño de partícula para cada una de las muestras obtenidas, incluyendo la muestra principal; es evidente que la reducción de tamaño en el molino logro obtener una distribución de tamaño de partícula bastante amplia, encontrándose entre 2 μm y 100 μm , las 2 μm corresponden al mínimo para la distribución de tamaño de MP-635 y las 100 μm el máximo para la distribución MP+400, en las cinco muestras predominó la monomodalidad que se puede visualizar en la Figura 3-1 **Distribución tamaño de partícula para las muestras de estudio**. Figura 3-1B. También es de notar que la dispersión de tamaños de partícula en la muestra MP-635 es mucho más amplia que en el resto de las muestras, el parámetro de medida para esta dispersión se conoce como SPAN, definido en la *Ecuación 4*, cuanto mayor sea el valor adimensional resultante del SPAN, entonces este será indicador de que existe una mayor dispersión, en la Tabla 3-1 se pueden observar los valores de D_{90} , D_{50} y D_{10} para cada una de la muestras al igual que el valor del SPAN, con el cual se confirma que la dispersión de tamaño de partícula de la muestra MP-635 es el doble respecto a las demás muestras, siendo así la muestra que está compuesta por mayor cantidad de partículas de diferentes tamaños.

$$SPAN = (D_{90} - D_{10})/D_{D50}$$

Ecuación 4

Figura 3-1 Distribución tamaño de partícula para las muestras de estudio.

Tabla 3-1 Parámetros D_{90} , D_{50} , D_{10} y SPAN para cada muestra.

Muestra	D_{90}	D_{50}	D_{10}	SPAN
Muestra Principal	310	220	152	0,72
MP+400	63,4	44,2	28,7	0,78
MP+500	47,5	32,5	23,2	0,75
MP+635	33,7	23,4	15,1	0,79
MP-635	19,7	9,8	5,4	1,46

Del análisis de tamaño de partícula se decide descartar como posible muestra para crear FMR a la muestra principal, ya que posee tamaños demasiado grandes para el propósito buscado, lo que ocasionará sedimentaciones demasiado rápidas y sumado a ellos su aplicación para sistemas de amortiguamiento se limita debido a que tamaños grandes de partículas erosionarán los sistemas mecánicos internos de un amortiguador.

3.2 Caracterización DRX

Son caracterizadas las muestras MP+400, MP+500, MP+635 y MP-635, La muestra principal se descartó como se indicó anteriormente. Con la base de datos del equipo de DRX y la comparación de cada uno de los difractogramas obtenidos con el difractograma de la Figura 2-1 y la Figura 2-2 se comprobó la existencia de Magnetita (Fe_3O_4), igualmente al realizar la molienda y el tamizaje en húmedo se esperó que hubiese una liberación de especies, sin embargo, en los resultados de DRX no se reportaron especies diferentes a la Magnetita, para la muestra MP-635 se reportó que el 100% de la muestra correspondía a Magnetita.

3.2.1 Muestra MP +400

Figura 3-2 DRX muestra MP+400

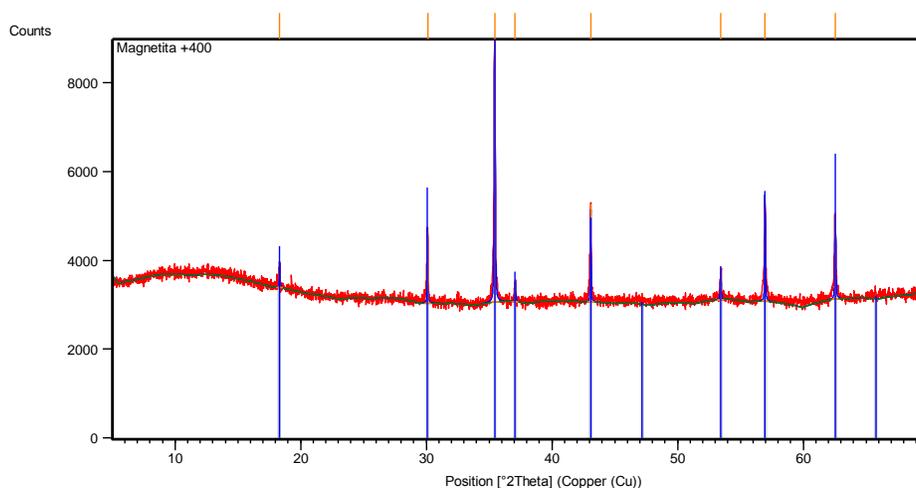


Tabla 3-2 DRX muestra MP+400

Ref. Código	Nombre del Compuesto	Formula Química
01-086-1344	Iron Oxide (Magnetite)	$\text{Fe}_{2.946}\text{O}_4$

3.2.2 Muestra MP +500

Figura 3-3 DRX muestra MP+500

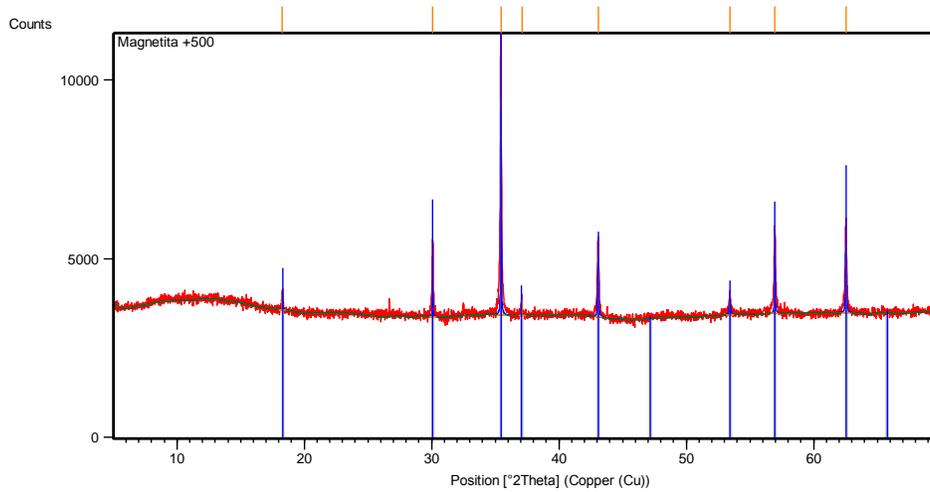


Tabla 3-3 DRX muestra MP+500

Ref. Código	Nombre compuesto	Formula Química
01-086-1344	Iron Oxide (Magnetita)	Fe _{2.946} O ₄

3.2.3 Muestra MP +635

Figura 3-4 DRX muestra MP+635

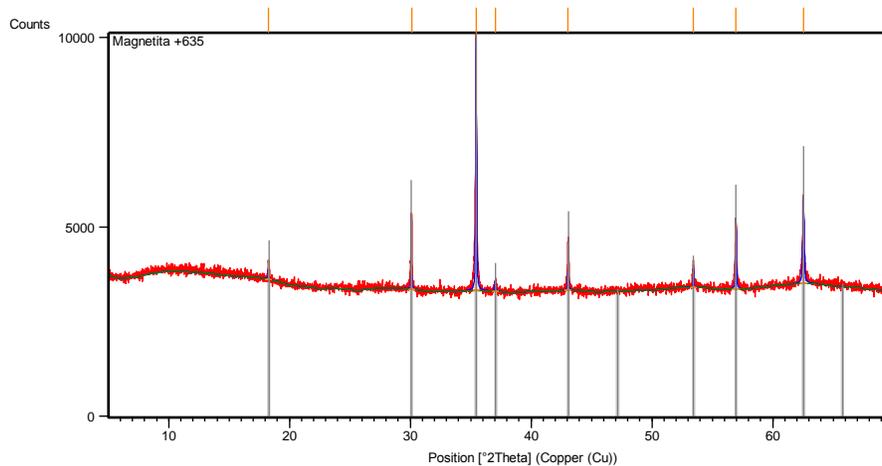


Tabla 3-4 DRX muestra MP+635

Ref. Código	Nombre del compuesto	Formula química
01-086-1344	Iron Oxide (Magnetite)	Fe _{2.946} O ₄

3.2.4 Muestra MP -635

Figura 3-5 DRX muestra MP-635

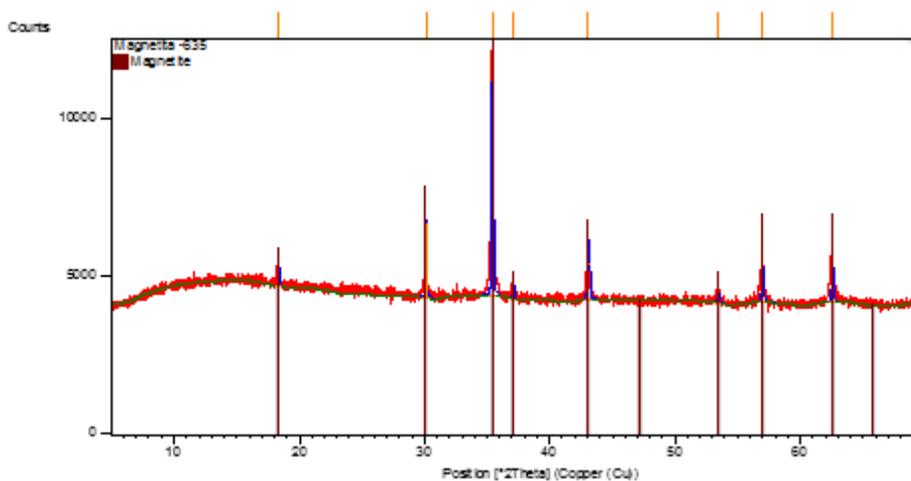


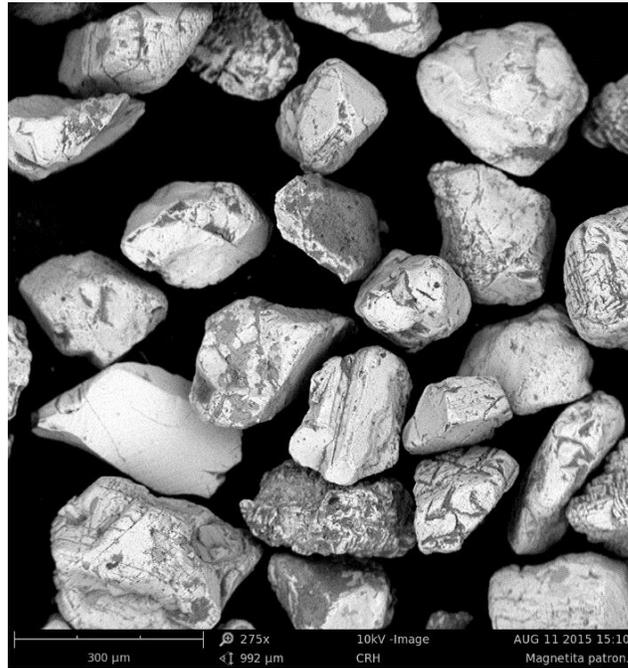
Tabla 3-5 DRX muestra MP-635

Código	Nombre compuesto	Formula Química
01-086-1344	Iron Oxide (Magnetite)	Fe _{2.946} O ₄

3.3 Microscopia electrónica de barrido SEM

La microscopia electrónica de barrido se obtuvo mediante el equipo Phenom World Pro X, este análisis se realizó para todas las muestras. En la Figura 3-6 se observa la microscopía obtenida para la muestra principal donde es posible apreciar que los granos no cuentan con aristas filosas y que posiblemente estas tendieron a pulirse a través de la erosión realizada gracias al flujo que tuvieron durante su permanencia en el río. Igualmente se pueden apreciar dos tonos de grises diferenciables, a través de la microscopia y el análisis EDS realizado a las muestras MP+400, MP+500, MP+635 y MP-635 se puede evidenciar que el tono gris claro corresponde a magnetita, para el tono gris oscuro corresponde a silicio, indicador que el tono oscuro está asociado a materiales arcillosos, este material fue liberado a través de la molienda y con el proceso de tamizaje hecho en húmedo y con un lavado continuo se logró desechar, dejando así a la magnetita libre de materiales innecesarios para el objetivo del trabajo.

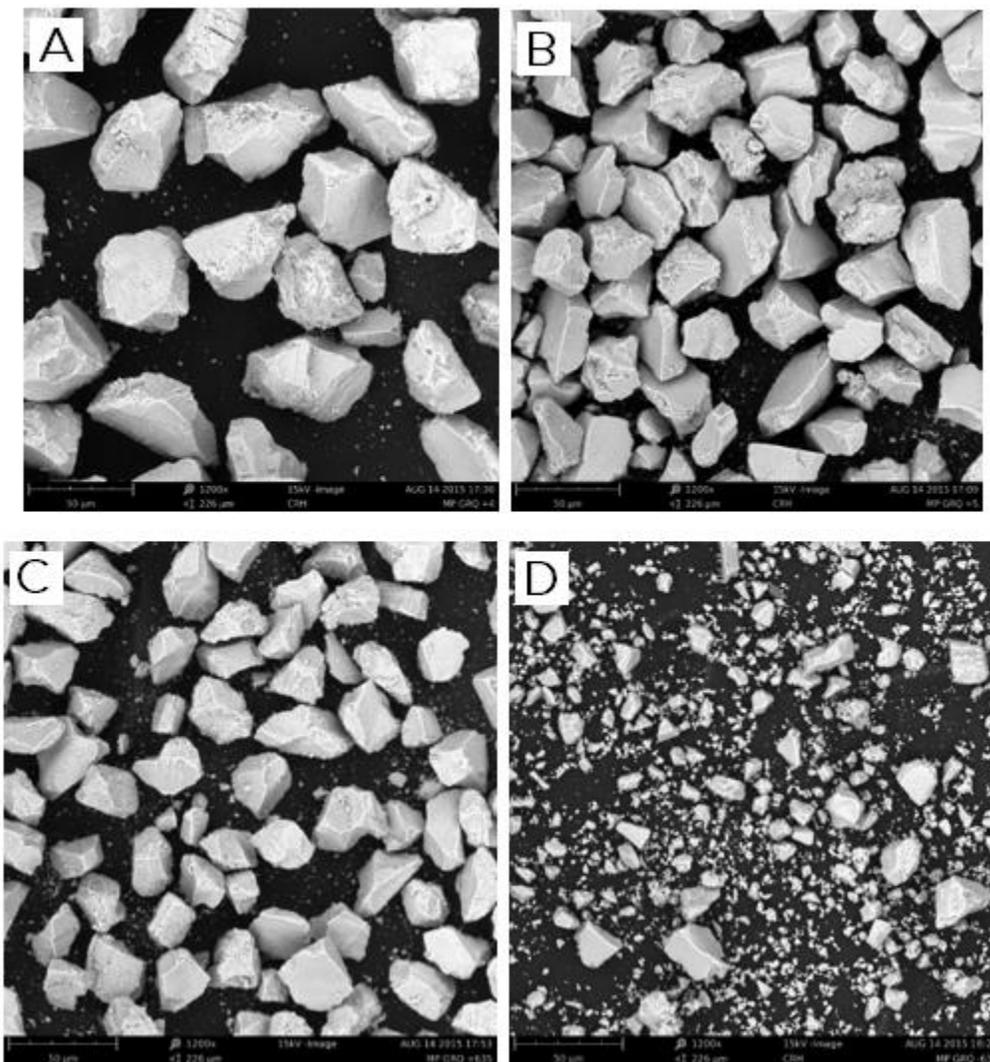
Figura 3-6 Muestra principal obtenida de proceso minero, los tonos grises claro son asociados a la magnetita, los tonos oscuros asociados al silicio o materiales arcillosos.



Para las muestras MP+400, MP+500 y MP+635, se evidencia una morfología similar dominada principalmente por aristas filosas y planos generados a partir de la molienda. Gracias a que todas las muestras fueron captadas a 1200X se puede hacer una comparación visual entre muestra y muestra, donde se hace evidenciable que con la molienda y el proceso de tamizaje aparece material fino, generando así que la muestra MP+400 presenta poca cantidad de finos y que la muestra MP-635 presenta en su mayoría material fino, lo que concuerda con los análisis de distribución de

tamaño de partícula, donde dicha muestra presentaba un SPAN superior a las demás indicando una amplia distribución de tamaños.

Figura 3-7 A Muestra MP +400, B Muestra MP+500, C MP+635 y D MP-635



3.4 Identificación Elemental EDS

Los resultados de EDS se obtuvieron a partir del equipo Phenom World pro X, Se hizo análisis por áreas en modo mapeo, esto con el fin de generar mayor certeza sobre la identificación elemental de las muestras. Igualmente se realizó una búsqueda detallada de posibles cambios de fase en la muestra o posibles diferencias en la escala de grises, encontrando que se encuentran muy pocos materiales diferentes a la magnetita.

En la Figura 3-8 se muestra la zona de análisis elemental elegida para la muestra MP+400, de acuerdo con el difractograma obtenido para la zona de análisis, se evidencia que la muestra está constituida elementalmente por Hierro, Oxígeno y Silicio, los picos de Carbono que se presentan son debidos a la superficie donde se adhiere la muestra antes de llevarla al SEM. La Tabla 3-6 presenta la cuantificación de los elementos presentes en la muestra. En la Figura 3-8 se encierra en un círculo rojo una partícula de diferente tonalidad, indicando la presencia de un material diferente a la magnetita. En la Figura 3-9 se presenta una amplificación de dicha partícula acompañada por una partícula con un gris más claro, se efectúa la identificación elemental sobre la zona punteada, el difractograma de dicha zona revela la presencia de Hierro, Oxígeno y Silicio, para dar certeza e identificar la composición de cada partícula se identificó la zona a partir de colores designados a cada elemento, esto se muestra en la

Figura 3-10, concluyendo que la partícula oscura tiene una composición a base de silicio y la partícula clara a base de Hierro, mostrando que toda la muestra clara pertenece a la magnetita y la muestra oscura a contaminantes. Este análisis se realizó para cada una de las muestras, sin embargo, los difractogramas de la muestra MP-635 (Figura 3-13 y Figura 3-14) no revelan presencia de Silicio, lo que se convierte en un indicador de la pureza que tiene la magnetita en esta muestra. Para corroborar lo anterior el análisis se realizó por duplicado, estos resultados concuerdan con el resultado obtenido en el análisis DRX que indica que cerca del 100% de la muestra es Magnetita, como se puede observar en la Figura 3-5 y Tabla 3-5.

3.4.1 Muestra MP +400

Figura 3-8 Zona de análisis Elemental, muestra MP +400

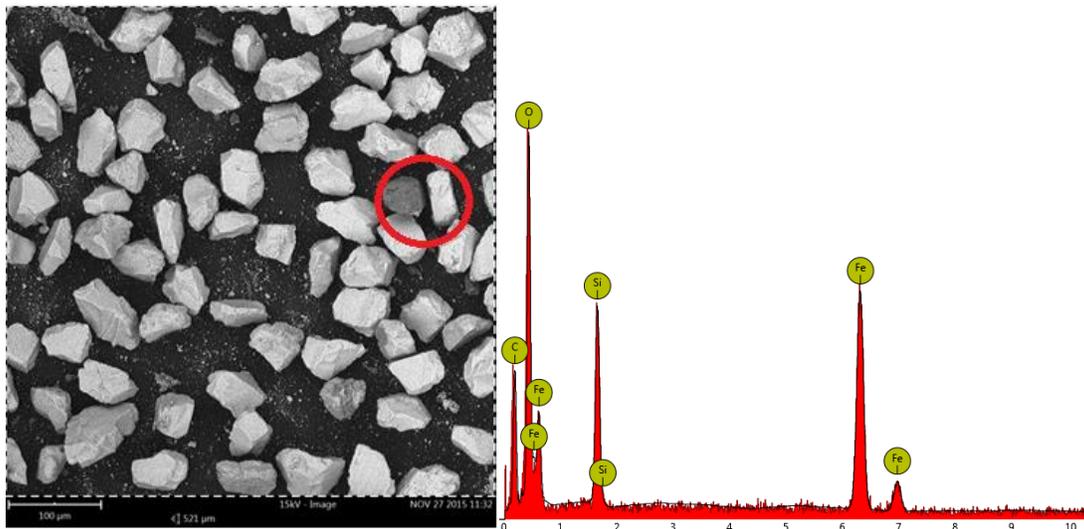


Tabla 3-6 Composición elemental MP+400

Número Elemento	Símbolo	Nombre Elemento	Concentración Atómico	Error
26	Fe	Hierro	20.5	0.0
8	O	Oxígeno	64.3	0.4
6	C	Carbono	5.5	1.7
14	Si	Silicio	1.0	1.0

Figura 3-9 Zona de análisis Elemental contaminación muestra MP +400 Y Difractograma

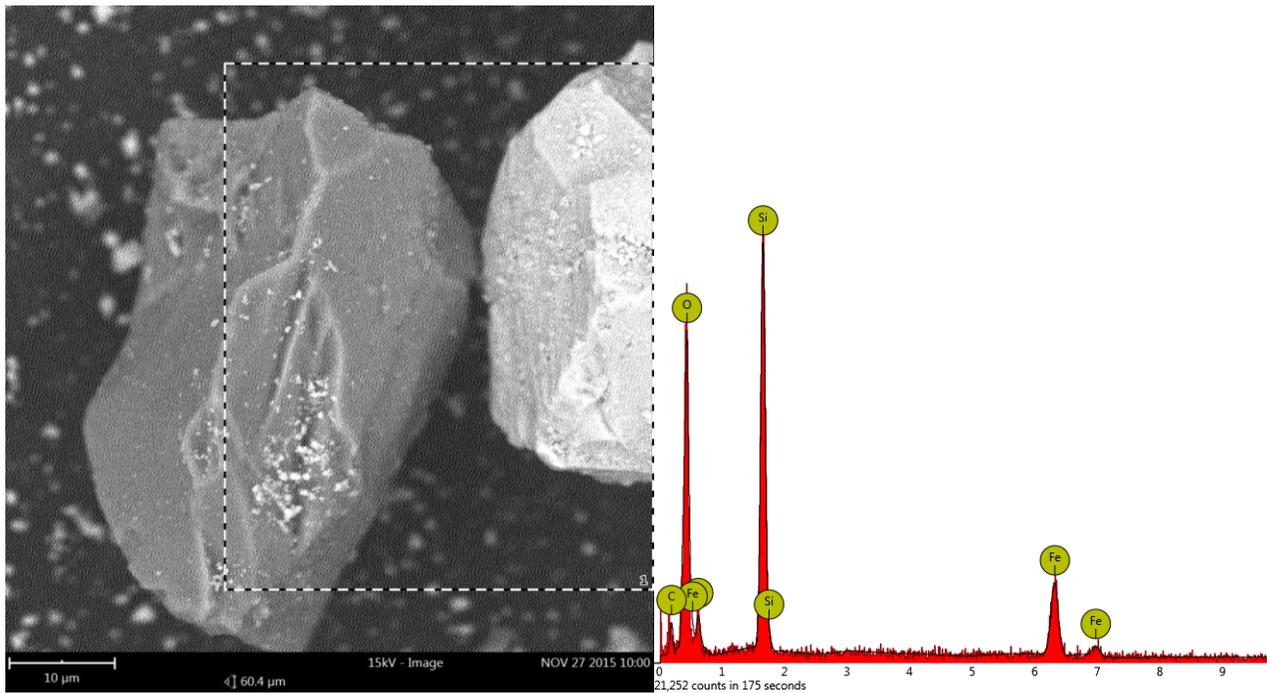


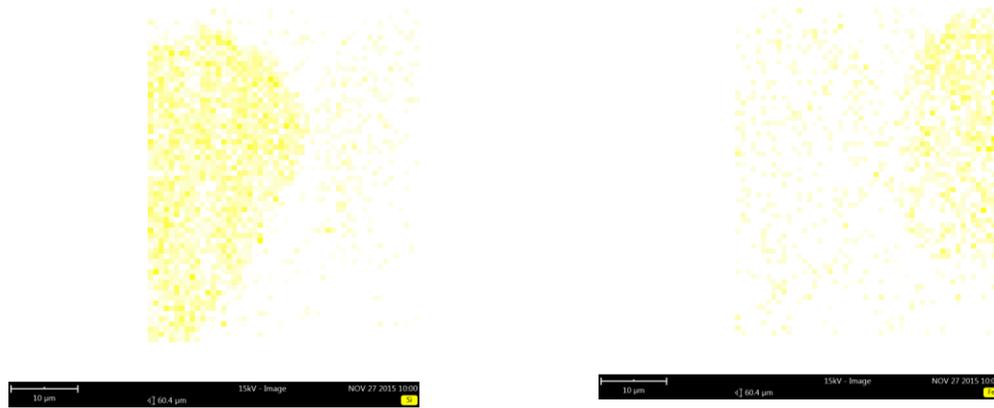
Tabla 3-7 Composición elemental MP+400, partícula contaminante.

Número Elemento	Símbolo	Nombre elemento	Concentración	Error
14	Si	Silicio	16.8	0.0
8	O	Oxígeno	71.7	0.4
26	Fe	Hierro	8.8	0.2
6	C	Carbono	2.7	1.9

Figura 3-10 Mapeo e identificación de principales elementos en la partícula contaminante muestra MP+400.

Map: Silicon

Map: Iron



3.4.2 Muestra MP +500

Figura 3-11 Zona de análisis Elemental, muestra MP +500 Y Difractograma MP+500

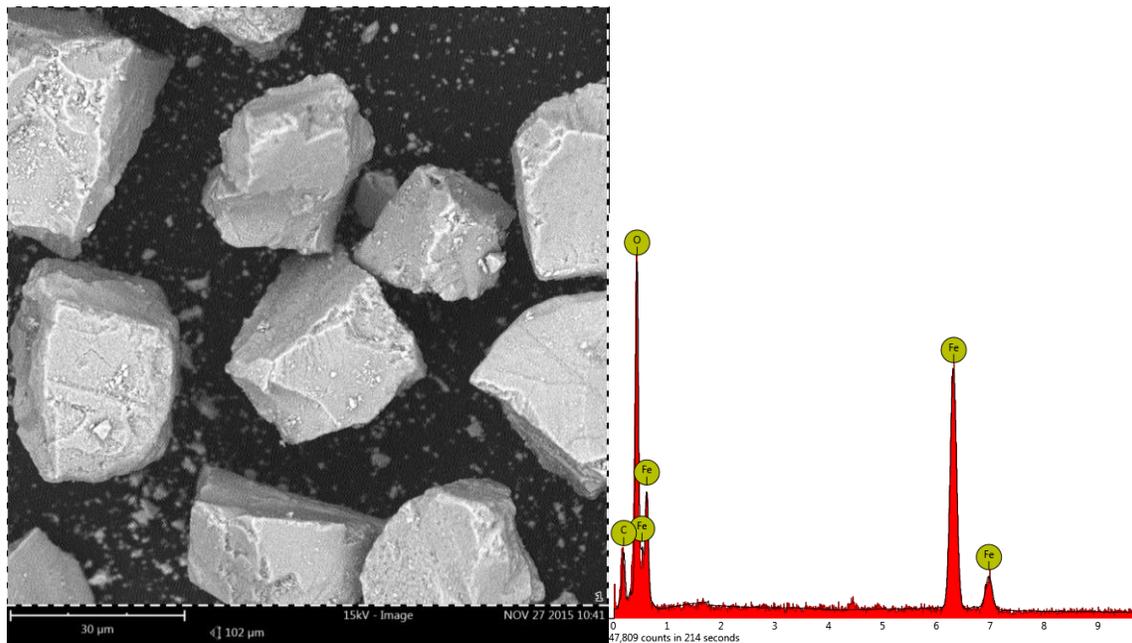


Tabla 3-8 Composición elemental MP+500

Número elemento	Símbolo Elemento	Nombre elemento	Concentración atómica	Error
26	Fe	Hierro	32.6	0.0
8	O	Oxígeno	64.0	0.4
6	C	Carbono	3.3	1.6

3.4.3 Muestra MP +635

Figura 3-12 Zona de análisis Elemental, muestra MP +635 Difractograma MP+635

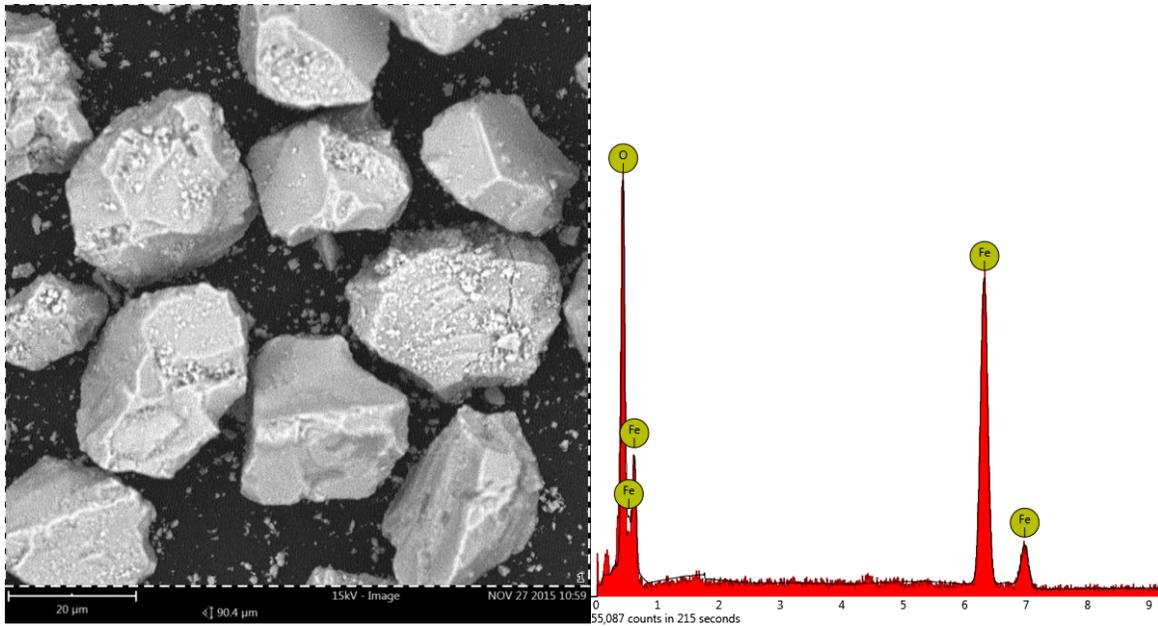


Tabla 3-9 Composición elemental MP+635

Número elemento	Símbolo elemento	Nombre del elemento	Concentración atómica	Error
26	Fe	Hierro	36.4	0.0
8	O	Oxígeno	63.6	0.4

3.4.4 Muestra MP -635

Figura 3-13 Zona de análisis Elemental, muestra MP -635 Y Difractograma MP-635

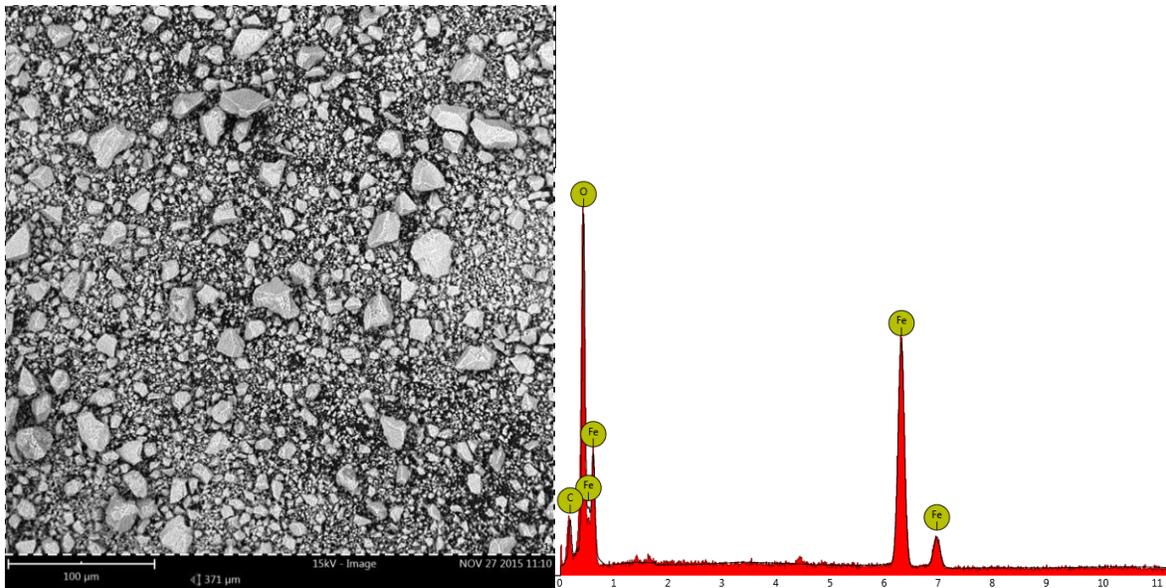


Tabla 3-10 Composición elemental MP-635

Número de elemento	Símbolo	Nombre de elemento	Concentración	Error
26	Fe	Hierro	31.4	0.0
8	O	Oxígeno	65.8	0.4
6	C	Carbono	2.8	1.5

Figura 3-14 Segunda Zona de análisis Elemental, muestra MP -635 Y Difractograma MP-635 diferente zona.

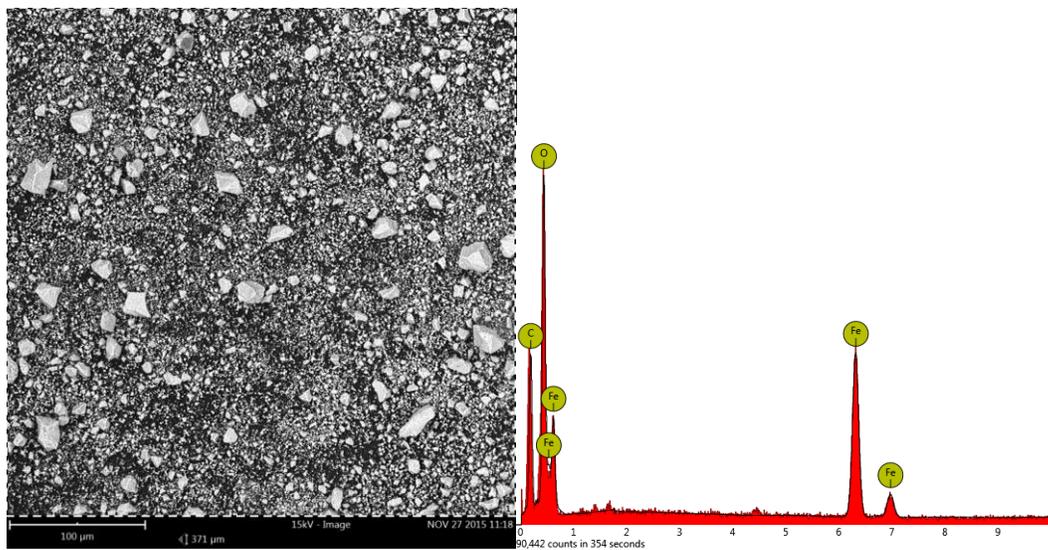


Tabla 3-11 Composición elemental MP-635 diferente zona.

Número de elemento	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
8	O	Oxígeno	66.9	0.4
26	Fe	Hierro	23.2	0.0
6	C	Carbono	10.0	1.6

3.5 Caracterización morfológica

La caracterización geométrica al igual que el tamaño de partícula son factores importantes que influirán en la reología de las suspensiones de FMR. A través del software particle metric de la empresa Phenom world, se realizó el análisis sobre una identificación de más de 1000 partículas para cada una de las muestras, MP+400, MP+500, MP+635 y MP-635. En las Figura 3-15, a Figura 3-18, se presentan las imágenes representativas para cada una de las muestra, de aquí se puede apreciar la exactitud en la identificación y la discriminación de cada una de las partículas, el software al realizar el reconocimiento de las partículas realiza una agrupación de ellas por familias del mismo tamaño, dando un color respectivo a cada tamaño, de esta manera se puede apreciar que existe dispersidad baja en los tamaños para cada una de las muestras.

Figura 3-15 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+400

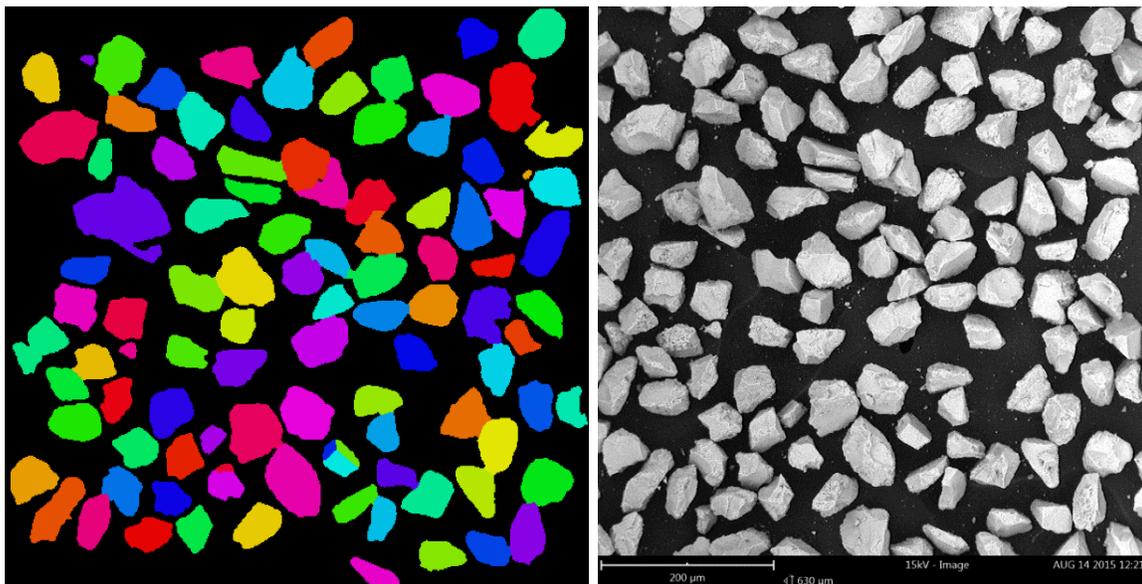


Figura 3-16 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+500

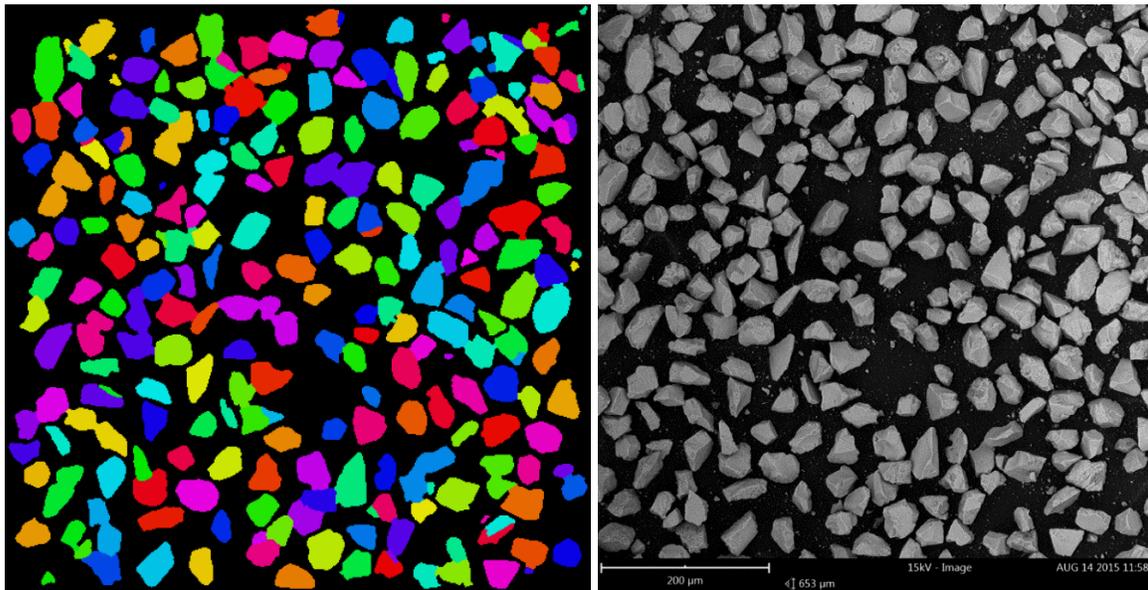


Figura 3-17 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP+635

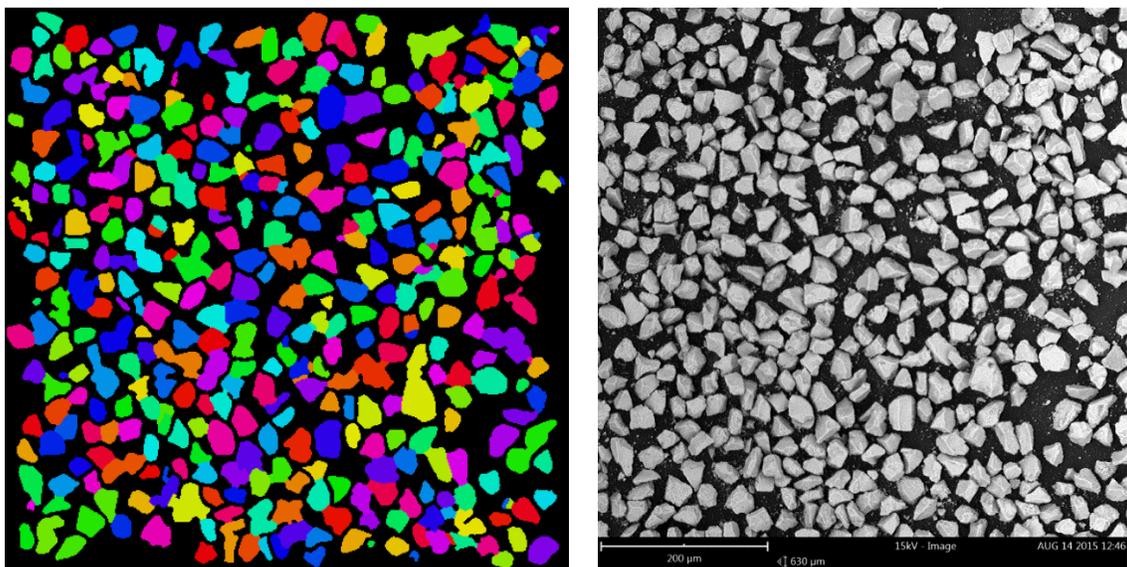
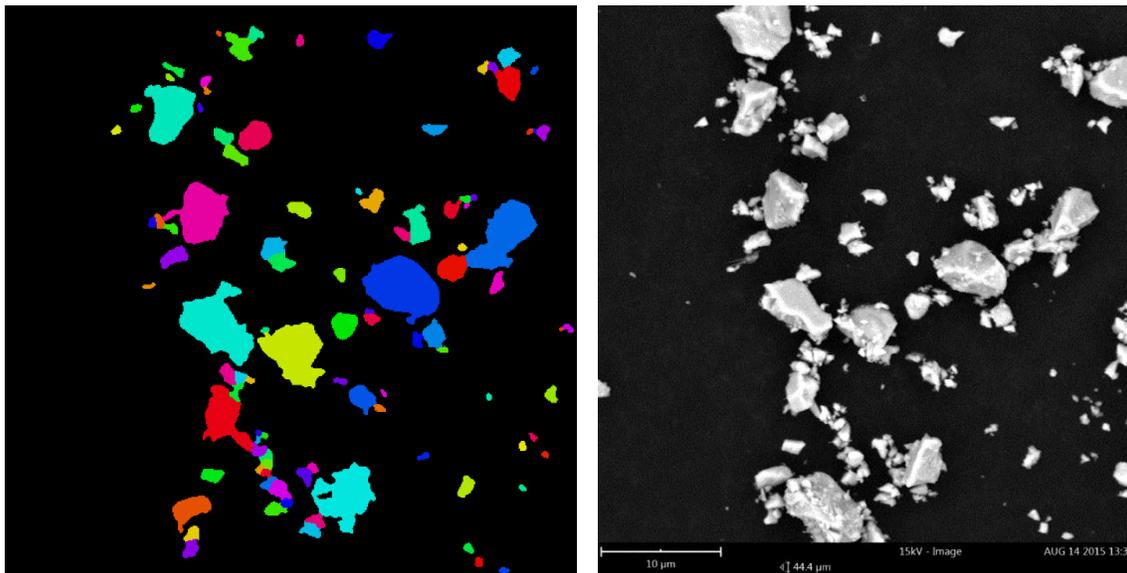


Figura 3-18 Ejemplo de identificación de partículas sobre la muestra MP-635



3.5.1 Propiedades morfológicas de partícula

En los resultados de la Tabla 3-12 y Figura 3-19 se puede apreciar que las propiedades de diámetro equivalente, eje mayor y menor, circunferencia y área, se reducen en secuencia con la clasificación de tamaño realizada por el tamizaje; a menor tamaño de partícula menor valor de dichas propiedades.

Tabla 3-12 Propiedades morfológicas para las muestras de estudio.

Propiedad	MP +400	MP +500	MP +635	MP -635
Número partículas muestreadas.	1017	2497	3679	1817
Diámetro equivalente	44.8 μm	28.9 μm	23.9 μm	1.49 μm
Mayor eje	55.8 μm	36.1 μm	32.1 μm	1.85 μm
Menor eje	36.5 μm	23.5 μm	19 μm	1.22 μm
Circunferencia	158 μm	102 μm	81.8 μm	5.55 μm
Área	1680 μm^2	718 μm^2	480 μm^2	3.75 μm^2
Relación de aspecto	0.668	0.662	0.678	0.678
Circularidad	0.468	0.463	0.48	0.48

La Tabla 3-12 y la Tabla 3-1 se pueden comparar los parámetros de D_{50} y diámetro equivalente. El D_{50} de la Tabla 3-1, es considerado como la mediana, medida que divide a la distribución de partícula en dos partes iguales, el diámetro equivalente para la Tabla 3-12 es considerado como la media o un promedio aritmético de la medida de todas las partículas, cuando estos dos parámetros son iguales se considera que la

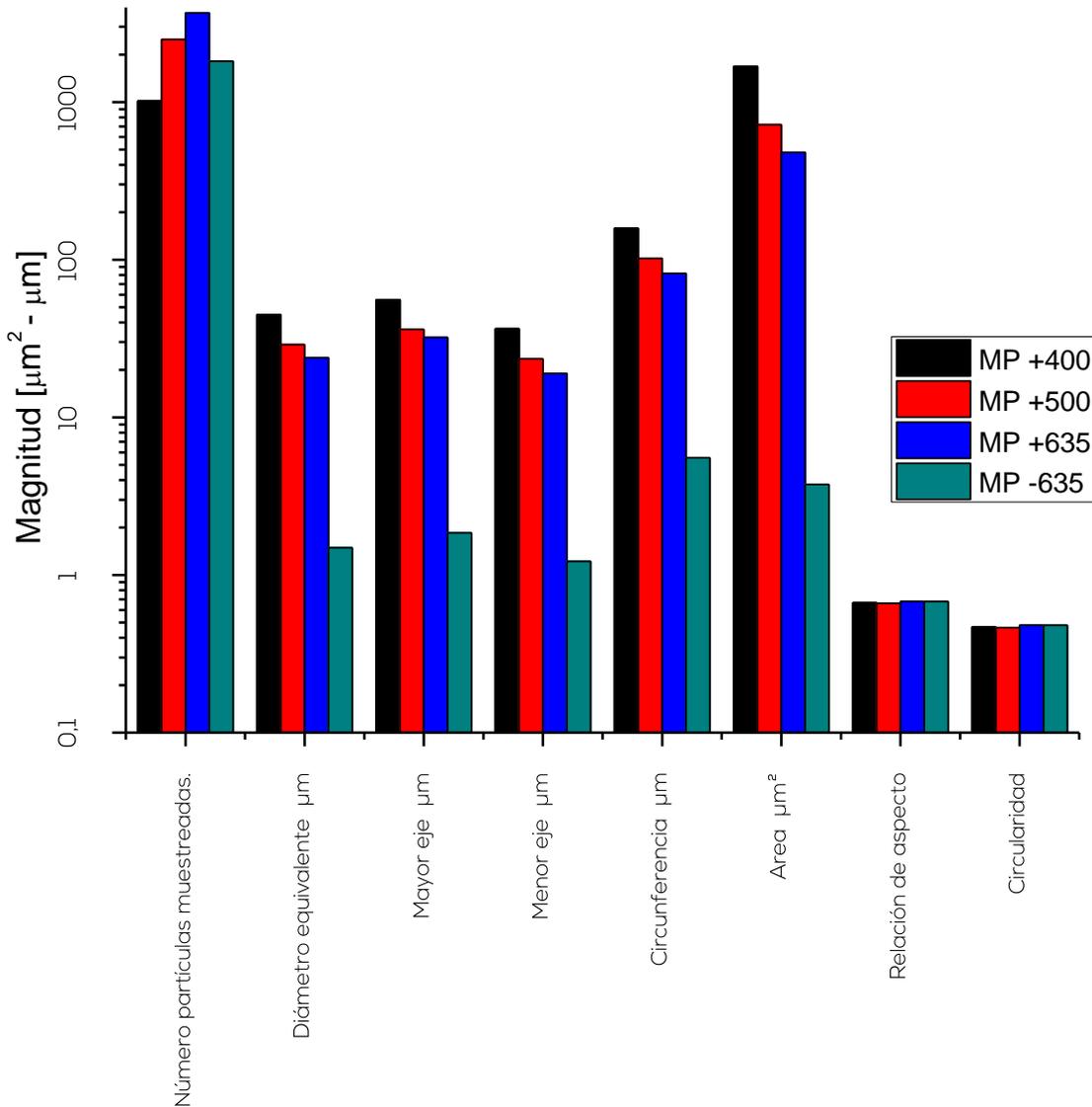
distribución de tamaño es normal o Gaussiana, y dará razón que existe un equilibrio de distribución entre todos los tamaños finos y gruesos, por el contrario cuando estos valores difieren encontrando que de acuerdo al resultado podrá existir mayor cantidad de finos o mayor cantidad de gruesos. En la Tabla 3-13 se presentan dichos parámetros, al analizarlos se encontró que en las muestras MP+400, MP+500 Y MP+635 tienden a poseer valores idénticos en sus parámetros, sin embargo, para la muestra MP-635 los valores difieren bastante, indicando que el diámetro equivalente se encuentra bajo el valor del D_{50} , con lo que se puede determinar que existe una mayor cantidad de finos que de gruesos en la distribución de tamaño de la muestra MP-635.

Tabla 3-13 Comparación diámetro equivalente y D_{50} .

Muestra	Diámetro equivalente	D_{50}
MP+400	44.8	44,2
MP+500	28.9	32,5
MP+635	23.9	23,4
MP-635	1.49	9,8

La relación de aspecto y de circularidad se mantiene igual para todas las muestras. La relación de aspecto puede oscilar en un valor de 0 a 1, donde 1 se puede detallar que la partícula es totalmente circular o cuadrada y en cero indica que se trata de una línea. Para las muestras el valor más próximo a 1 que a 0, indicando así una proporcionalidad entre el eje mayor y el eje menor de 0.67 en promedio con una tendencia de partículas cuadradas o redondas; el valor de circularidad también puede oscilar entre 0 y 1, cuando este valor es 1 será indicador que la morfología de la partícula es un círculo perfecto, cuando el valor tiende a cero indicará que la partícula es irregular o muy "puntiaguda", para las muestras es de notar que este valor en promedio se encuentra en 0.47 acercándose más a cero que al valor de 1, por lo anterior y uniendo los dos criterios anteriores en uno solo se tendría que las muestras tienden a presentar una morfología cuadrada, corroborando lo indicado visualmente en la microscopía SEM, donde se advirtió que las aristas y planos predominaban en las muestras.

Figura 3-19 Comparación de propiedades morfológicas para las muestras analizadas.



3.6 Reología

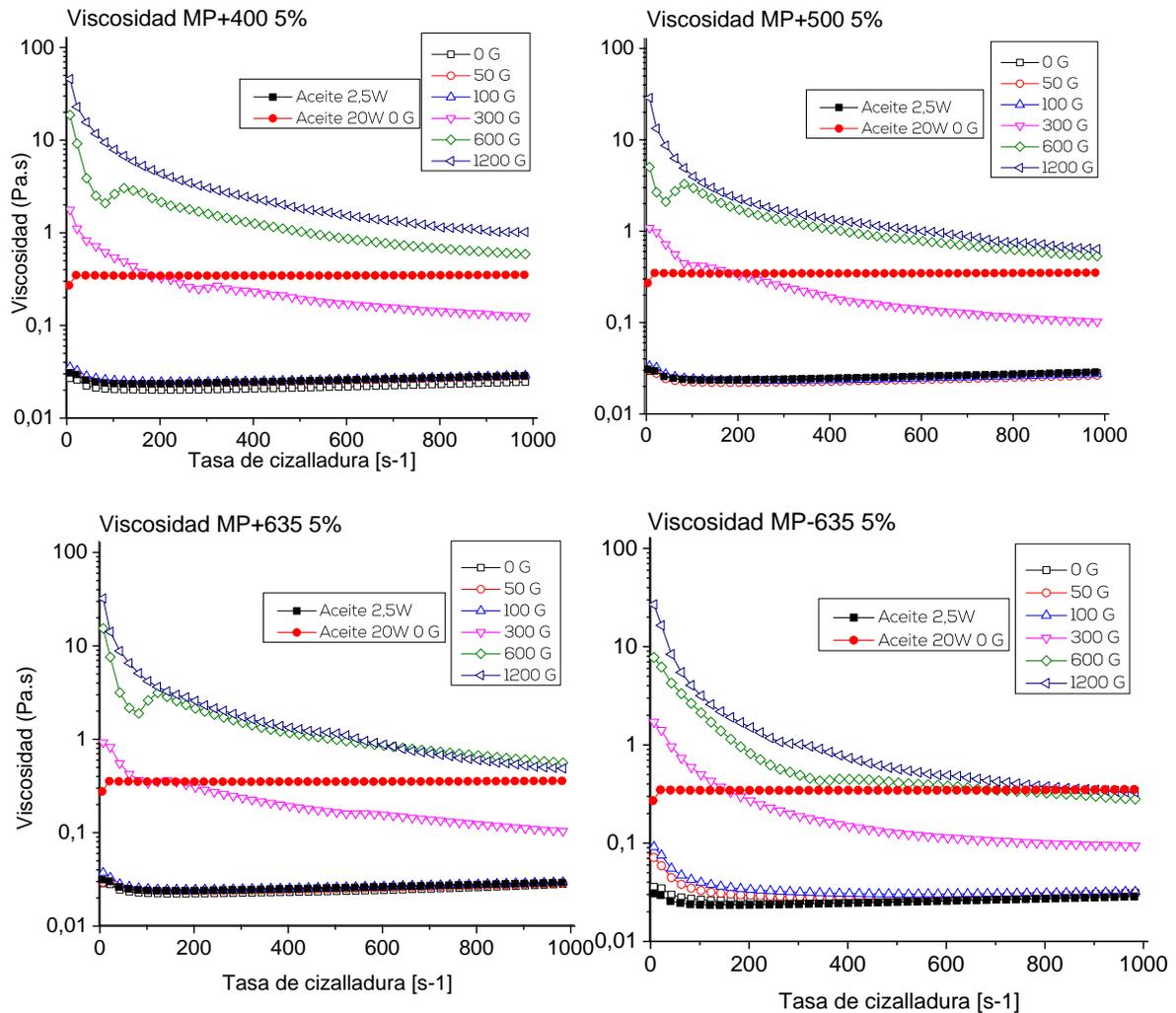
Como se indicó anteriormente se realizaron dos tipos de ensayos reológicos: en modo estático y dinámico, esto con el fin de simular cada una de las condiciones a las que puede estar sometido un FMR cuando se coloque en un sistema de amortiguamiento para motocicletas con diferentes propósitos. A continuación, se presentan los resultados y su respectivo análisis.

3.6.1 Curva de flujo a una concentración de 5%

Como puntos de referencia para verificar los incrementos de cada uno de los FMR fabricados, se toma la viscosidad del aceite 2.5W que tiene 0.025 Pa.s de viscosidad, el cual trabaja como medio para dispersar las partículas de Magnetita. Igualmente se tomó la viscosidad de un aceite 20W con una viscosidad de 0.34 Pa.s, aceite comercial que presenta la mayor viscosidad para sistemas de amortiguamiento de motocicleta, las viscosidades de estos dos aceites son indicadores del rango en el que deberá poseer la viscosidad del FMR para que pueda ser utilizado en cualquier motocicleta, sin importar el propósito de la misma, a dicha zona se le llamará *zona de trabajo*, la cual se encuentra entre las viscosidades de 0.025 Pa.s y 0.34 Pa.s.

En la Figura 3-20 se presenta las curvas de flujo para las suspensiones fabricadas con un 5% en volumen de partículas de magnetita dispersas en el aceite 2.5W, en la que se puede identificar que sin importar el tamaño y con la aplicación de un campo magnético entre los valores de 0 y 100 Gauss, no existe un cambio notable en la viscosidad de las suspensiones, a diferencia de lo que sucede cuando se aplican campos entre 300 gauss y 1200 gauss donde existe un cambio de 0.1 a 1 Pa.s en la viscosidad, indicando que con el aumento del campo existe un aumento de la viscosidad de hasta 20 veces. También en la figura se puede validar que con la aplicación del campo magnético en los FMR, estos toman un comportamiento cizallo adelgazante, sin importar que las partículas se encuentren dentro de un fluido Newtoniano. Para la curva de flujo de la muestra MP-635 se evidencia un incremento de la viscosidad en el rango de 0.01 s⁻¹ a 400 s⁻¹, con este incremento se puede observar que el FMR fabricado con la muestra MP-635 puede obtener viscosidades entre 0.25 Pa.s y 30 Pa.s con la dependencia de la tasa de cizalladura y del campo magnético. Superando así en casi 90 veces la viscosidad del aceite que se encuentra en el límite superior y en 1200 veces al aceite con el que se fabricó el FMR.

Figura 3-20 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético.



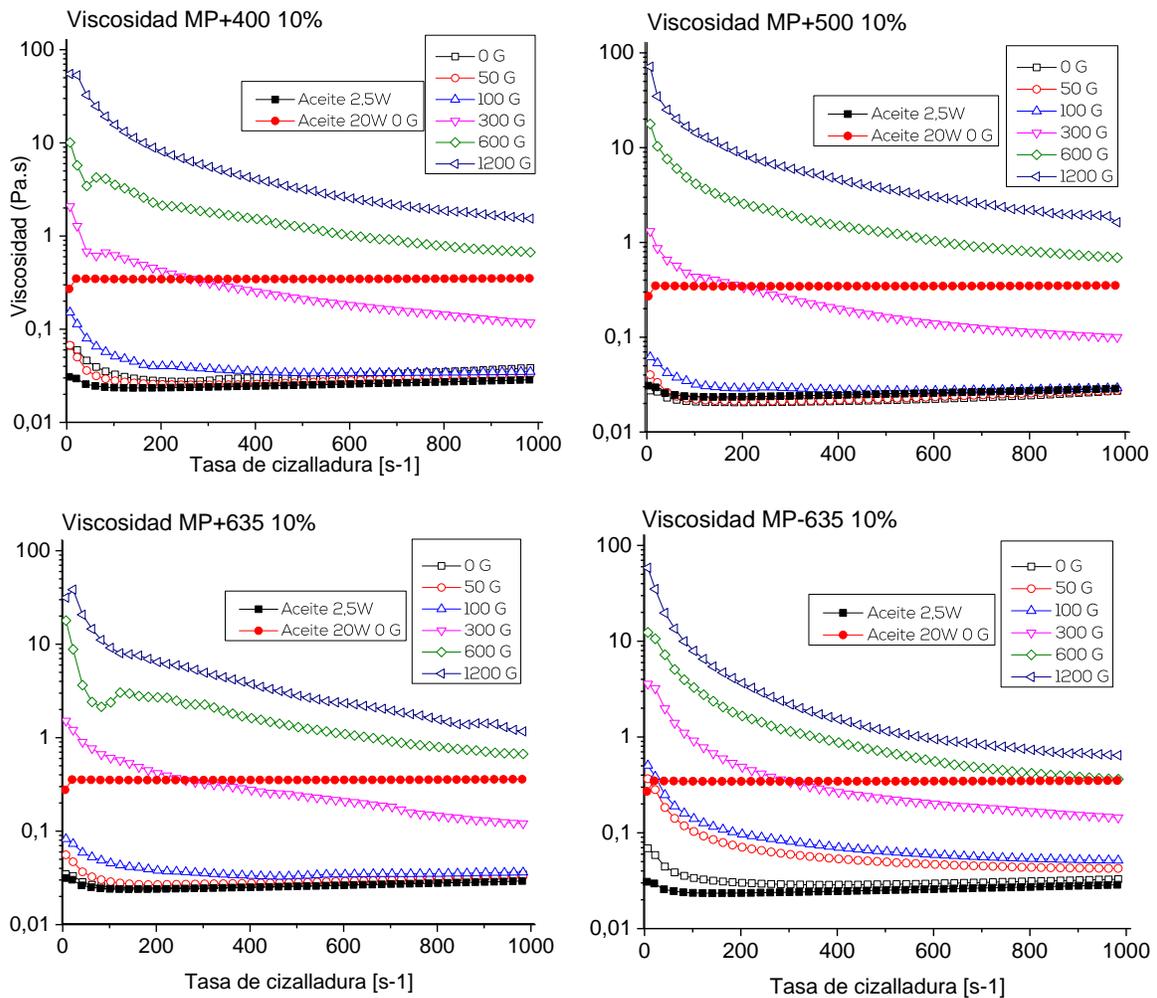
3.6.2 Curva de flujo a 10% en volumen.

Con el incremento de la concentración en volumen de las partículas a un valor de 10% , se hacen más evidentes los cambios de viscosidad, como se puede apreciar en la Figura 3-21, donde se observa que efectivamente el tamaño juega un papel importante en la viscosidad del FMR; por ejemplo, para la muestra MP-635 con un $D(50)$ de 9.8 micras y con campos de 50 y 100 gauss los efectos en la viscosidad son más notables que para las muestras MP+400, MP+500 y MP+635 con los mismos campos y que poseen un $D(50)$ de 44.2, 32,5 y 23.5 micras respectivamente. Para cada uno de los FMR fabricados con el 10% en concentración se puede lograr obtener un valor de viscosidad de la zona de trabajo con dependencia del campo magnético y la tasa de cizalladura, sin embargo, para la muestra MP-635 las probabilidades de

sustituir cualquier aceite se incrementan al poseer curvas de flujo que atraviesan la zona de trabajo.

Al hacer una comparación de la **Figura 3-21** se evidencia que los campos magnéticos bajos de 50 y 100 gauss logran tener más impacto en la viscosidad con los tamaños bajos de partícula y que por el contrario los campos magnéticos más altos como son 300, 600 y 1200 gauss impactan mucho más la viscosidad con tamaños altos. La posible razón de este efecto es que al trabajar campos magnéticos bajos con tamaños bajos existe una mayor probabilidad de formación de estructuras ya que el campo magnético tiene la suficiente fuerza para atraer partículas que son pequeñas y livianas y propiciar la formación de estructuras, por el contrario, con campos bajos y partículas de gran tamaño y gran peso, predominará más la fuerza de gravedad que la fuerza de atracción sobre la partícula, reduciendo las probabilidades de generación de estructuras. Sin embargo, cuando el campo es lo suficientemente grande, 300, 600 o 1200 gauss la formación de estructura se hará factible a cualquier tamaño de partícula, grandes como la muestra MP+400 o pequeñas como la muestra MP-635, por otra parte, al poseer una formación estructural con tamaños de partícula pequeños se tendrá mayor probabilidad de que la estructura se rompa por poseer mayor cantidad de puntos de ensamble o puntos de contacto partícula-partícula, lo que no sucederá con los tamaños grandes los cuales reducen sustancialmente dichos contactos, generando así mayor resistencia y por ende una mayor viscosidad.

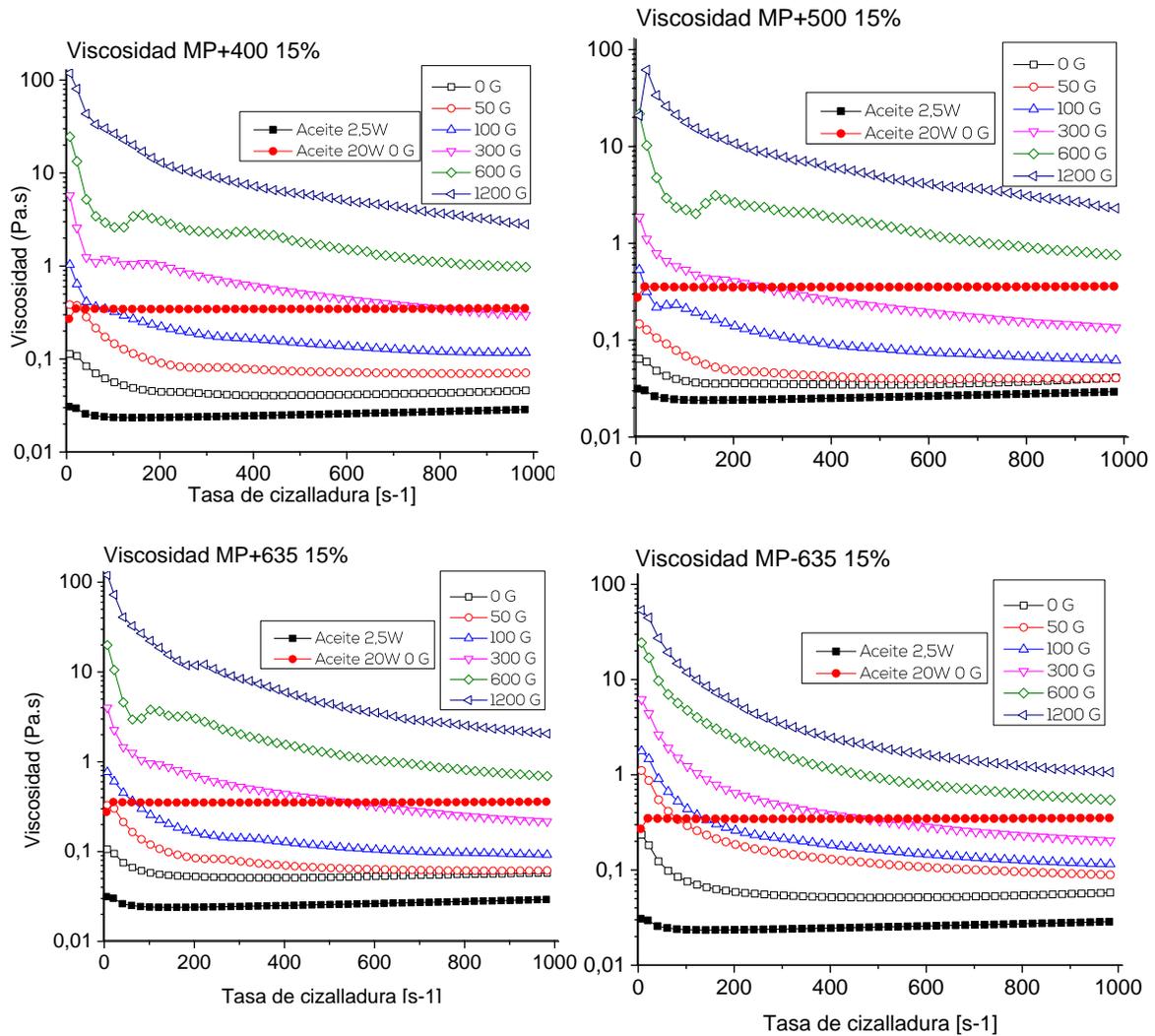
Figura 3-21 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético



3.6.3 Curva de flujo con concentración 15%

Para una fracción volumétrica de 15% los efectos mencionados anteriormente continúan, para todas las muestras presentadas en la Figura 3-22 se evidencia que han superado el límite inferior de la zona de trabajo, indicando así, que la fracción volumétrica para todas las muestras comienza a actuar como modificador reológico en este punto se puede indicar que todas las muestras cubren gran parte de la zona de trabajo gracias a cuatro parámetros, tamaño de partícula, campo magnético, concentración volumétrica y tasa de cizalladura. Parámetros que se analizan enseguida

Figura 3-22 Curva de flujo con concentración fija, para los diferentes tamaños de partícula con variación de campo magnético



3.6.4 Modificación de la viscosidad respecto al tamaño de partícula.

Para las curvas de flujo se hace un corte a 600 s⁻¹, para evidenciar el aporte de tamaño de partícula a la reología de los FMR, igualmente se integran los límites de viscosidad de la zona de trabajo.

En la Figura 3-23 se puede apreciar que la variación de tamaño de partícula tiene efecto de incremento sobre la reología del FMR, y se corrobora que campos magnéticos bajos provocan cambios de viscosidad mayores en tamaños de partícula pequeños y que por el contrario campos magnéticos altos causan mayor variación de

la viscosidad al asociarlos con tamaño de partícula grandes, si se sigue la curva MP-635 de color verde en las Figura 3-23, a la Figura 3-25 se observa que con campos de 50 y 100 gauss su viscosidad es mayor respecto a la viscosidad de las muestras MP+400, MP+500 y MP-635, y que sobre los 300 gauss presenta una transición para disminuir la viscosidad a 600 y 1200 gauss respecto a las demás muestras.

Para la Figura 3-25 se observa que entre las curvas existe un mayor distanciamiento a diferencia de lo que sucede en las Figura 3-23 y Figura 3-24, este distanciamiento posiblemente es producido por el aumento de la concentración volumétrica, cuando se aumenta la concentración el distanciamiento entre partículas disminuye y el contacto mecánico o contacto por rodadura aumenta, haciéndose visible el cambio de viscosidad presentado.

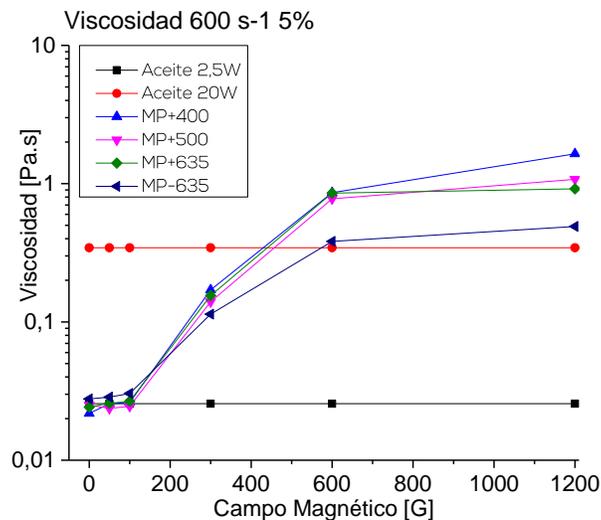


Figura 3-24 Viscosidad a 600 s-1 con ϕ 10%

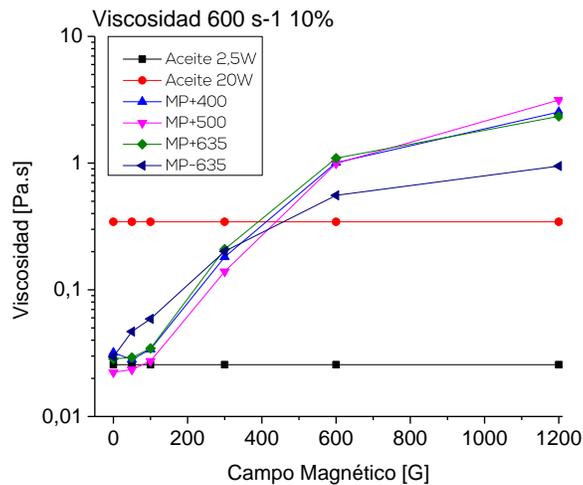
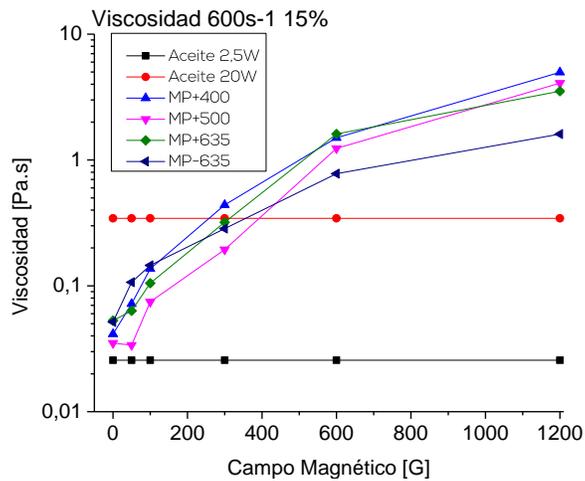


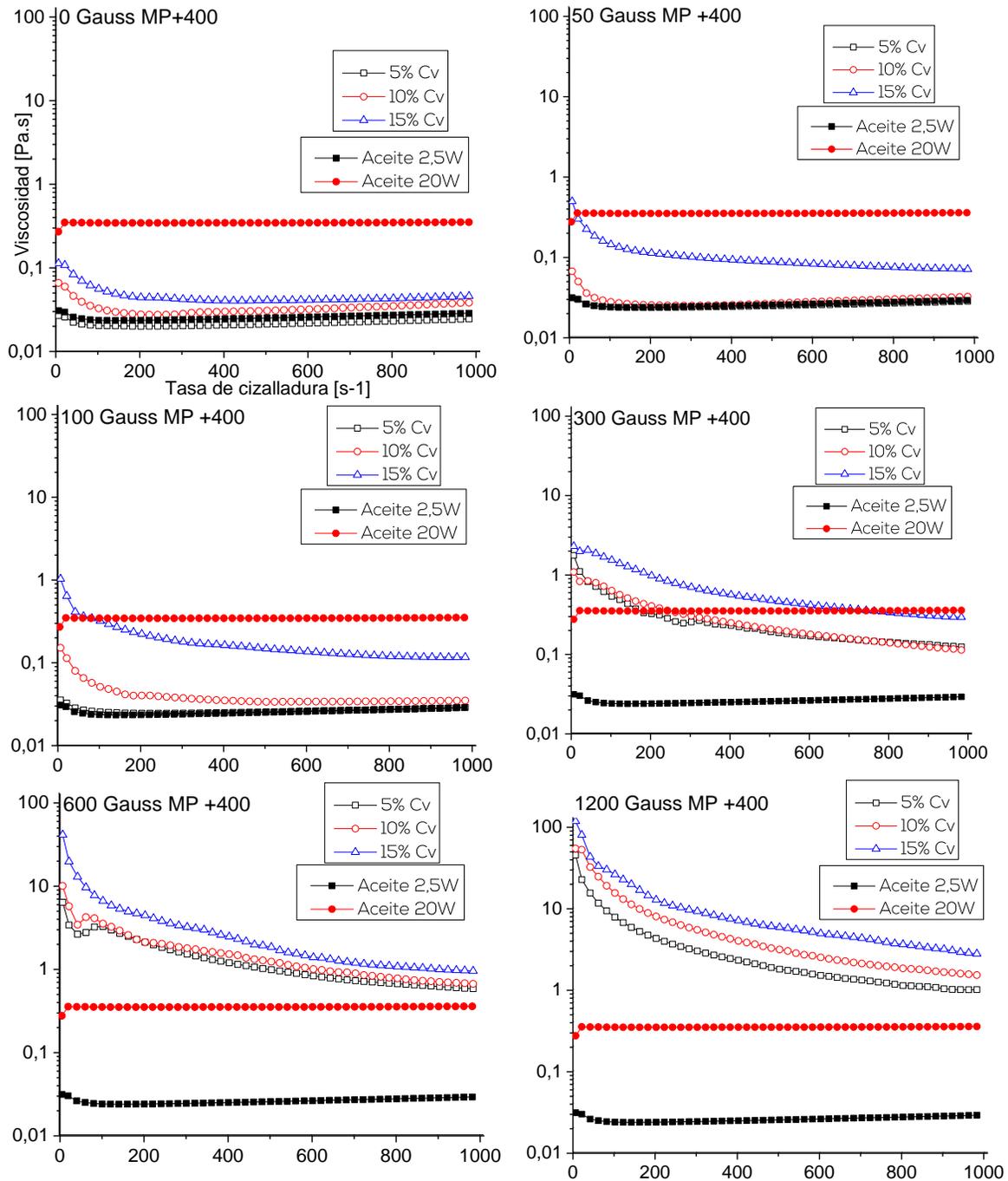
Figura 3-25 Viscosidad a 600 s-1 con ϕ 15%



3.6.5 Modificación de la viscosidad respecto a la concentración volumétrica.

Para las siguientes graficas se ha analizado cada una de las muestras con campos magnéticos fijos y con diferentes concentraciones volumétricas, de la Figura 3-26 se ratifica que a mayor concentración volumétrica se presenta una mayor viscosidad e igualmente que con el aumento del campo existe una mayor viscosidad siendo este último un factor más predominante en la reología del fluido que la misma concentración volumétrica. Cuando se aplican campos de 600 y 1200 gauss la viscosidad se incrementa sobre la zona de trabajo. Se vuelve a evidenciar que los campos magnéticos bajos no actúan sobre los tamaños de partícula grandes, que su efecto se hace notable en campos magnéticos altos.

Figura 3-26 Viscosidad para la muestra MP+400 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos



La muestra MP+500 presenta un comportamiento similar que la muestra MP+400, igualmente en cualquiera de las tres concentraciones y con campos de 600 y 1200 supera la zona de trabajo, y con un campo de 300 gauss se hace una modificación significativa de la viscosidad en gran parte de la zona de trabajo.

Figura 3-27 Viscosidad para la muestra MP+500 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos

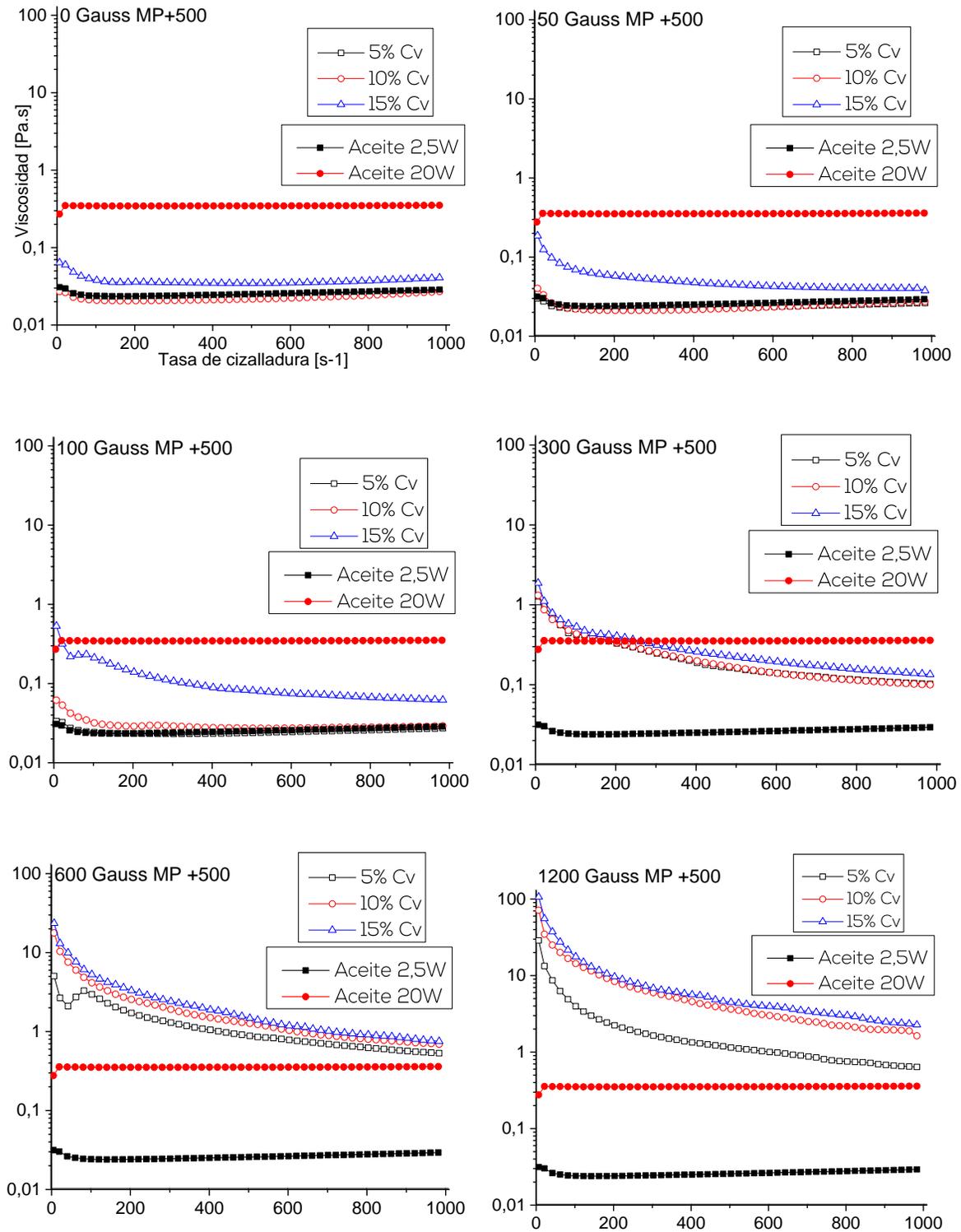
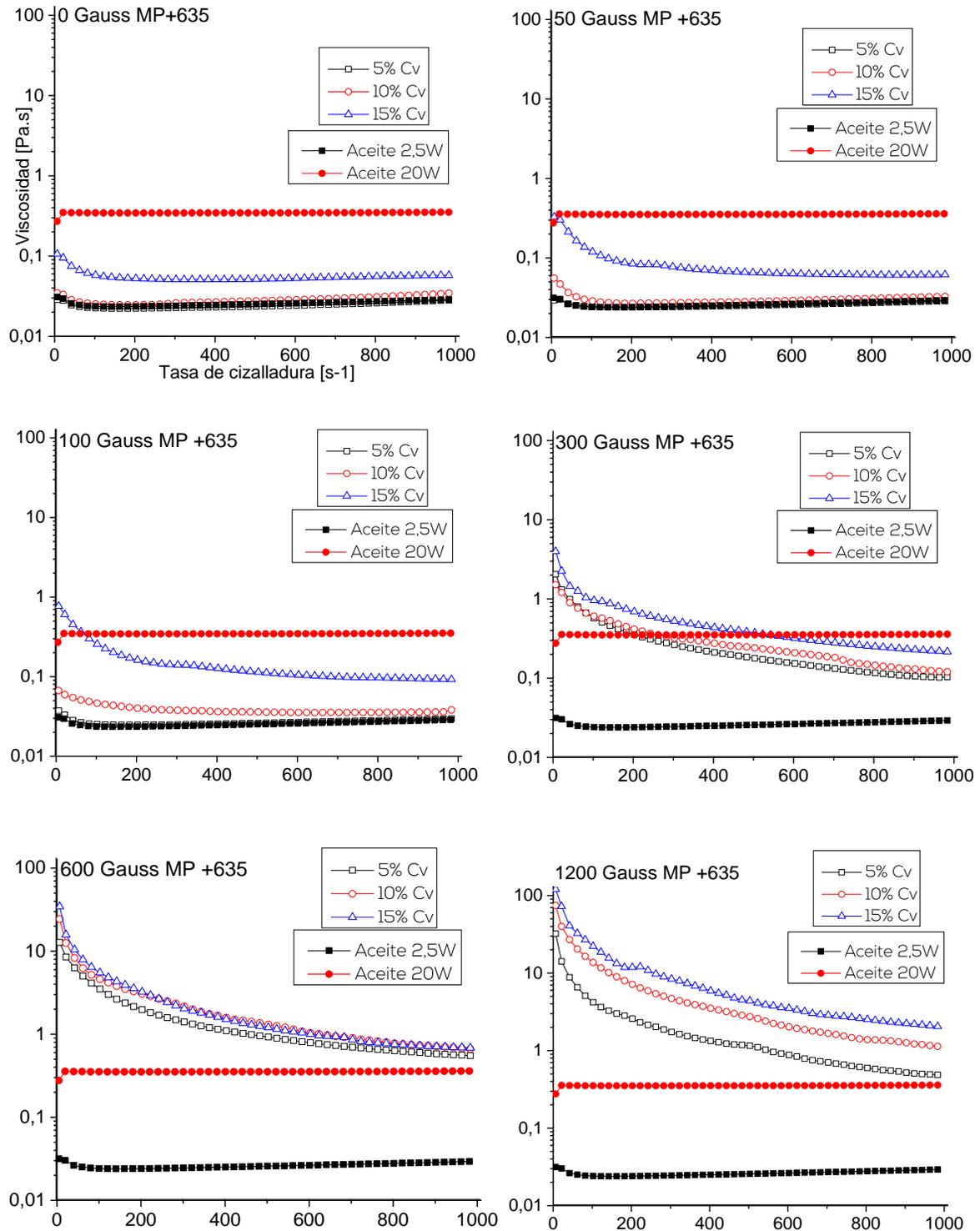
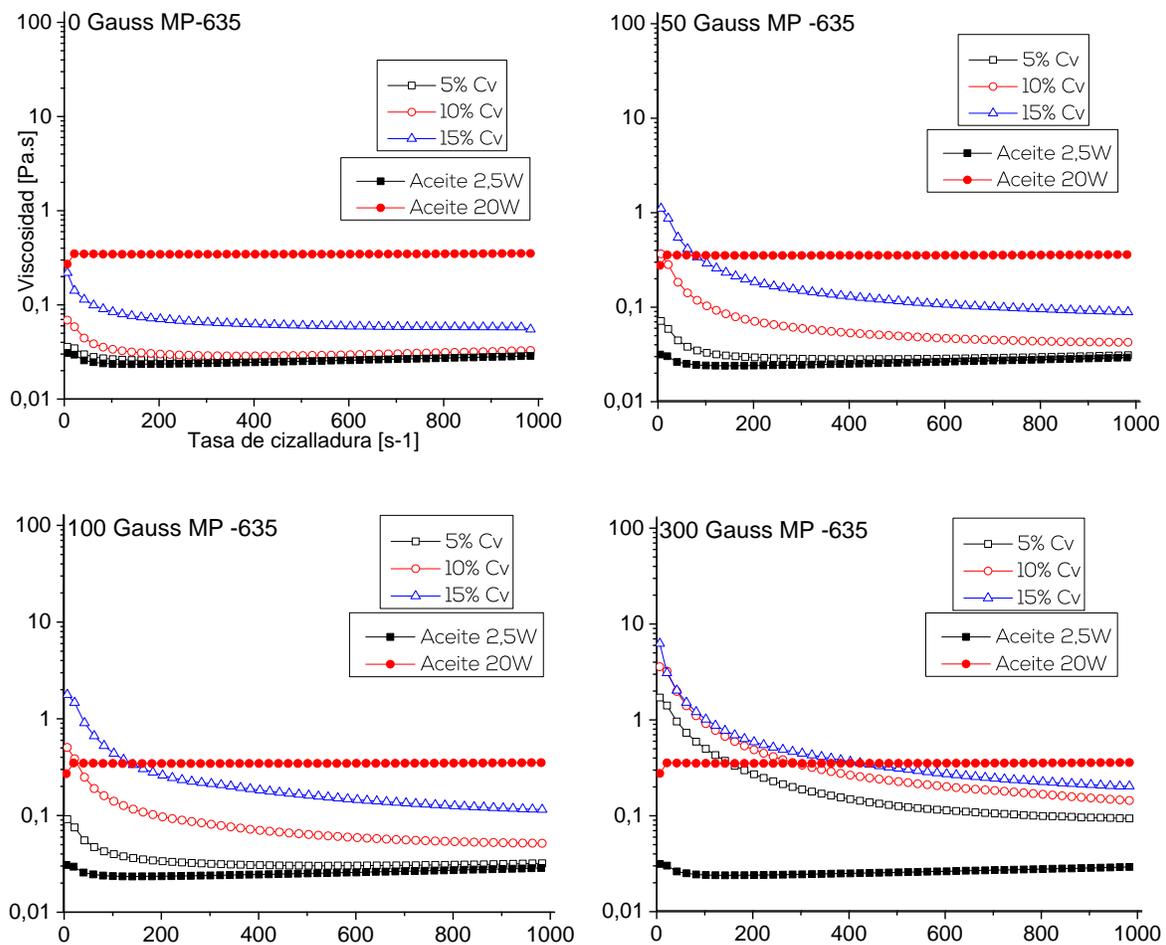


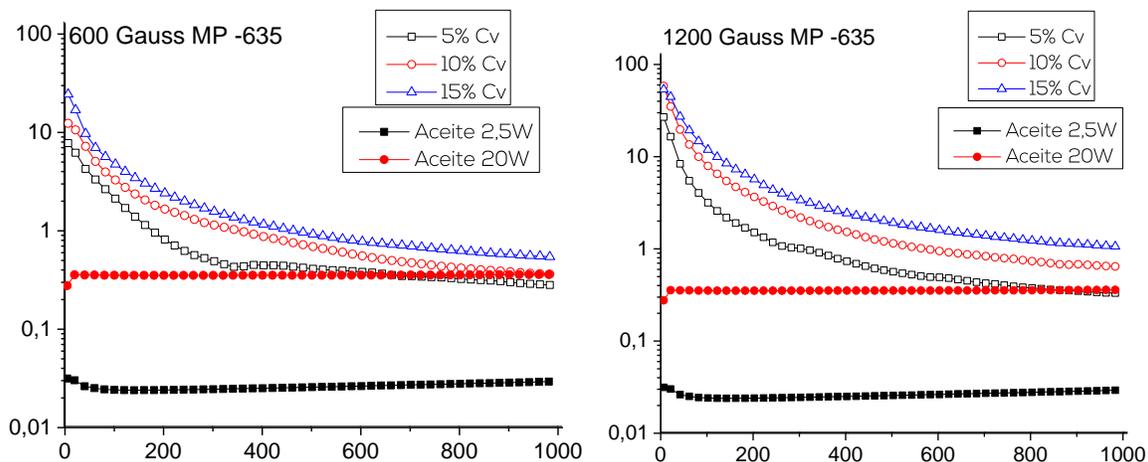
Figura 3-28 Viscosidad para la muestra MP+635 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos



En la Figura 3-28 se muestra las curvas de flujo para la muestra MP+635, donde se aprecian los mismos efectos que presentan las muestras anteriores. Para la muestra MP-635 mostrada en la Figura 3-29, se evidencia la activación de las partículas pequeñas con los campos bajos, donde inmediatamente al aplicar un campo de 50 gauss se observa un cambio en la viscosidad en el doble de su magnitud para cada uno de las fracciones volumétricas, por el contrario, esta es la única muestra que no alcanza a superar con la fracción volumétrica del 5% el umbral superior de la zona de trabajo, determinando así que la asociación campo magnético y tamaño de partícula tienen una relación importante y que debe ser estudiada al momento de diseñar un FMR.

Figura 3-29 Viscosidad para la muestra MP-635 a diferentes concentraciones volumétricas y campos fijos

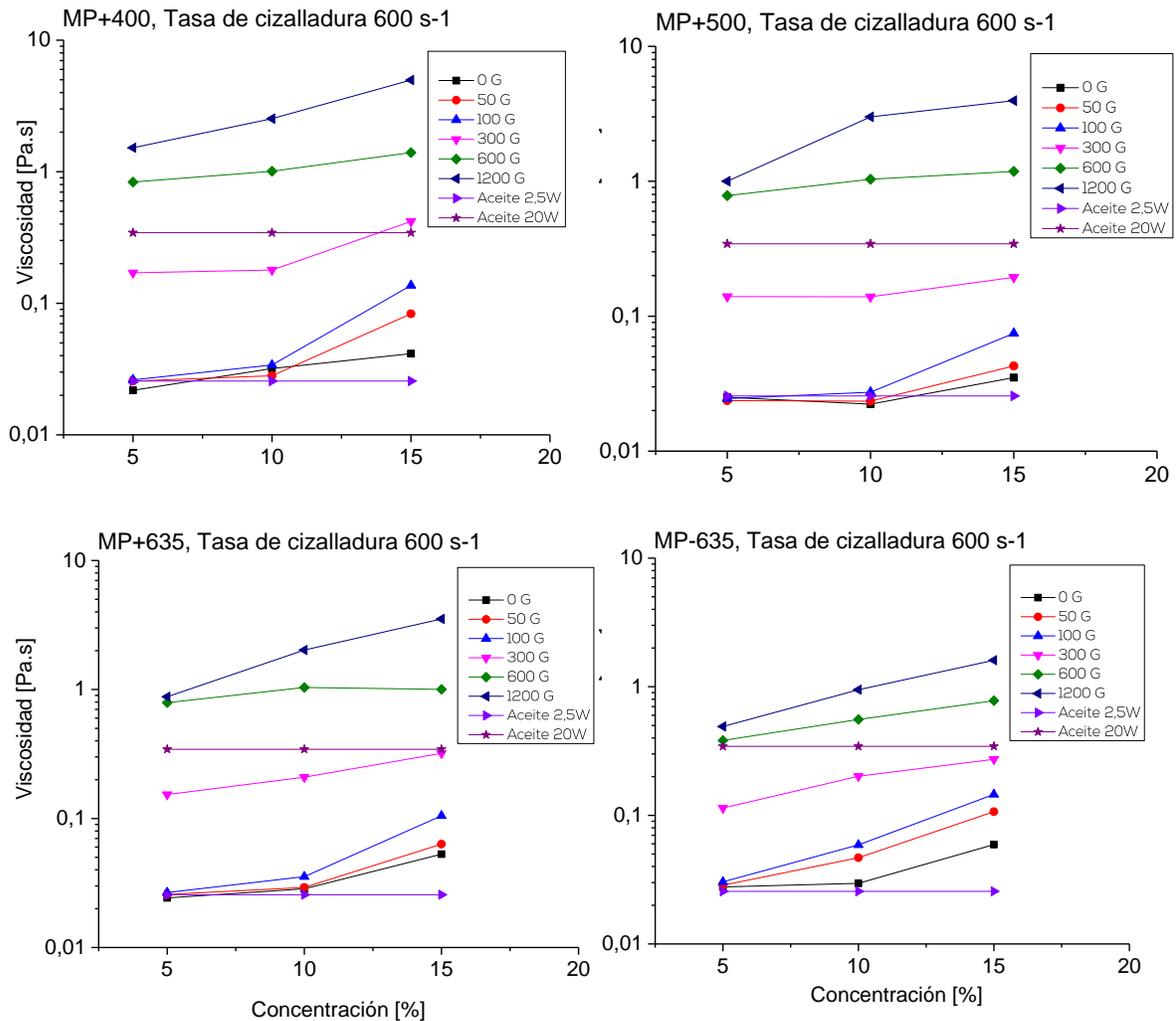




3.6.6 Viscosidad a Tasa de cizalladura fija.

Con los datos obtenidos de la **Figura 3-26** a la **Figura 3-29** se forma la **Figura 3-30**, donde se parecía que el aumento de la concentración volumétrica aumenta la viscosidad, para la muestra MP+400 y una fracción volumétrica de 5% se obtienen variaciones en la viscosidad desde 0.03 Pa.s a 1.5 Pa.s, un aumento en 50 veces su valor, para la fracción del 10% se registra cambios de 0.035 a 2.5 mostrando un aumento de 71 veces y para la fracción del 15% su valor oscila en 0.04 Pa.s y 6 Pa.s mostrando un cambio de 150 veces. Como se observa la variación de la viscosidad en un FMR ocurre en varios ordenes de magnitud, de aquí su poder de aplicación en distintos entornos ingenieriles. Para las muestras MP+500, MP+635 dichos cambios son similares, sin embargo, para la muestra MP+635 con una fracción de 5% el rango de cambio se encuentra entre 0.03 Pa.s y 0.5 Pa.s registrando un cambio de aproximadamente 16 veces, para la concentración de 10% la variación es de 0.03 Pa.s a 0.9 Pa.s, registrando cambios de 30 veces y para el concentración de 15% entre 0.05 Pa.s y 1.2 Pa.s, para una variación de 24 veces. Como se puede apreciar los cambios en viscosidad para partículas grandes y con campos grandes son más drásticos, por otra parte, si se hace el mismo análisis sobre campos magnéticos bajos, 50 y 100 gauss y con una concentración del 10%, los cambios para las muestras MP+400, MP+500 Y MP+635 son relativamente iguales, sin embargo, al verificar esto mismo para la muestra MP-635 la variación esta alrededor de hasta 4 veces.

Figura 3-30 Viscosidad evaluada a tasa de cizalladura fija, variación campo magnético y concentración volumétrica.



3.6.7 Curvas de esfuerzo para las diferentes muestras a volumen constante

Con las curvas de esfuerzo se puede visualizar que generalmente el comportamiento que gobierna a los FMR es un comportamiento cizallo adelgazante. Como es indicado en los antecedentes este es un comportamiento que se puede modelar a través de la ecuación de Herschel Bulkley o con el modelo de Bingham, en la sección siguiente se obtiene el modelo respectivo para cada una de las curvas.

En la Figura 3-31 se puede apreciar que con el incremento de la tasa de cizalladura y del campo magnético existe un incremento del esfuerzo, se observa que para las muestras MP+400, MP+500 y MP+635, cuando se llega a valores de tasa de cizalladura de 200 s⁻¹ y con campos magnéticos de 600 y 1200 gauss el esfuerzo se estabiliza y converge a un solo valor. Igualmente se puede apreciar dicha estabilización para la muestra MP-635, no solo para los campos de 600 y 1200 gauss, sino también para 300 gauss.

Para todas las muestras y valores menores a 300 gauss se observa que el esfuerzo sigue en crecimiento hasta los 1000 s⁻¹, este comportamiento es indicador que el esfuerzo es dependiente de dos fenómenos entre las partículas: un primer fenómeno visualizado a campos bajos, donde el valor del esfuerzo final es dependiente de la formación de la estructura débil entre partículas, estructura que tendrá un valor de esfuerzo específico para poder romperse y que deberá ser constante a lo largo de la aplicación de la tasa de cizalladura. Un segundo fenómeno que es el choque entre las partículas, cuando las partículas no logran formar una estructura estable ya que el esfuerzo generado sobre el FMR es superior al esfuerzo de resistencia de la estructura, las partículas pasarán a seguir un flujo dominado por choque entre ellas y entre las paredes de los cilindros concéntricos, con el aumento de la tasa de cizalladura se da el aumento de los choques y por ende el del esfuerzo.

Cuando se aumenta el campo magnético a 600 y 1200 gauss se presenta estabilización del esfuerzo y esto ocurre probablemente porque con los campos magnéticos altos promueve la formación de estructuras rígidas, dichas estructuras permiten su rompimiento, pero no permiten su deformación total con el aumento de la tasa de cizalladura, por lo cual no existirán partículas libres que propicien choque entre ellas y que alteren el valor del esfuerzo. En la muestra MP-635 se aprecia que existe una estabilización para campos magnéticos de 300 gauss, posiblemente porque las partículas con menor tamaño propician más rápidamente la formación de las estructuras,

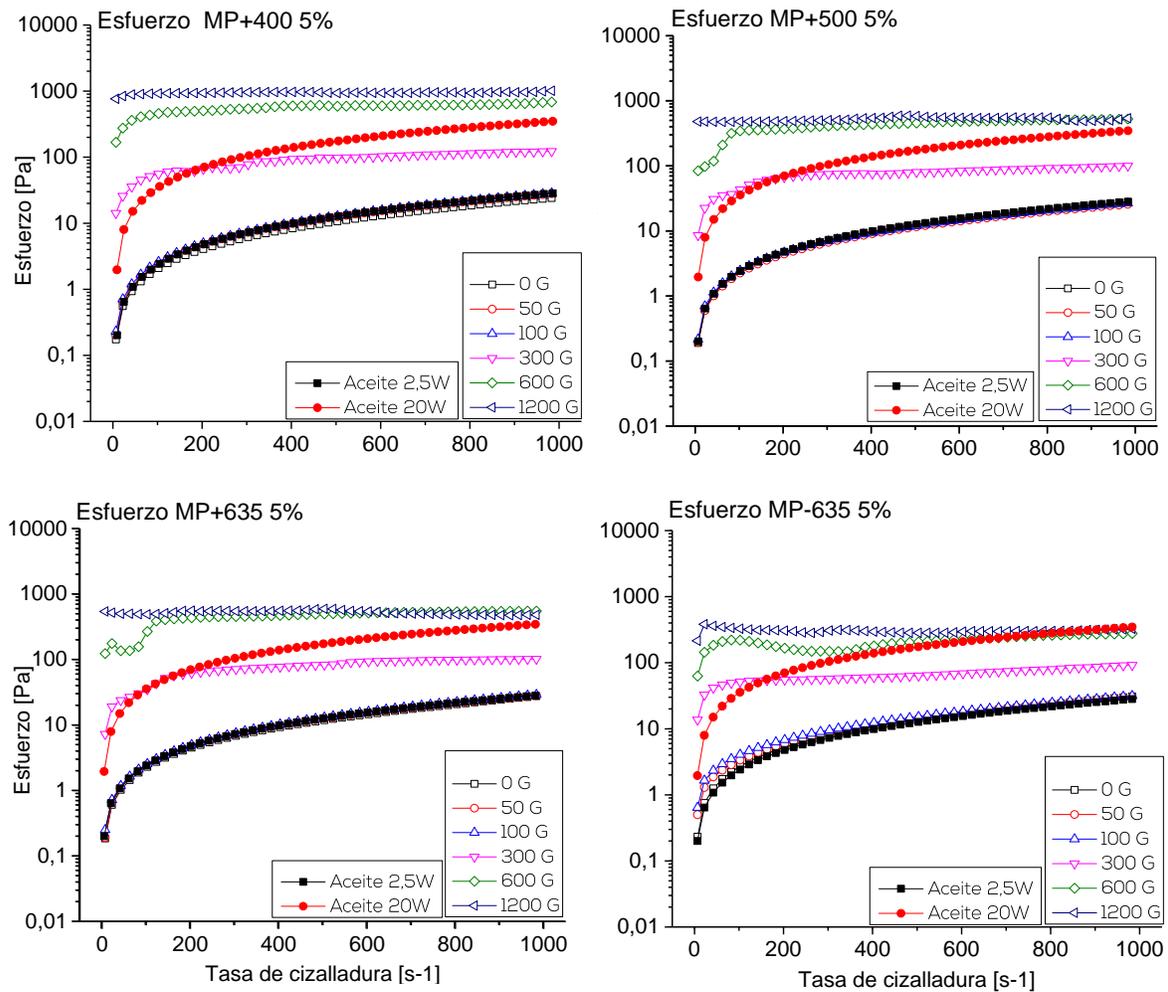
Es posible observar en general para la **Figura 3-31** que existe una tasa de cizalladura mínima de 50s⁻¹ que propicia el ordenamiento de estructuras de los FMR, esta tasa de cizalladura puede ayudar a que exista un ordenamiento partícula-partícula.

Los valores de esfuerzo a la mínima tasa de cizalladura (ver **Figura 3-31**) para la muestra MP+400 evidencia un cambio del esfuerzo de 0.2 Pa a 1000 Pa aproximadamente, lo que genera una variación de 5000 veces del esfuerzo al inicio de la tasa de cizalladura, lo cual puede ser debido a la formación de la estructura y a la resistencia que se le otorga a dicha estructura a medida que existe un mayor campo magnético. Para las tasas de cizalladura máximas, la variación del esfuerzo se encuentra entre 10 Pa y 1000

Pa, generando un cambio en el esfuerzo hasta de 100 veces; posiblemente debido a la misma razón que se anotó anteriormente.

Cabe resaltar la capacidad que tiene un FMR para cambiar su esfuerzo hasta en 3 órdenes de magnitud sólo con la aplicación de un campo magnético, mostrando así el potencial que pueden tener estos fluidos en aplicaciones ingenieriles.

Figura 3-31 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 5%

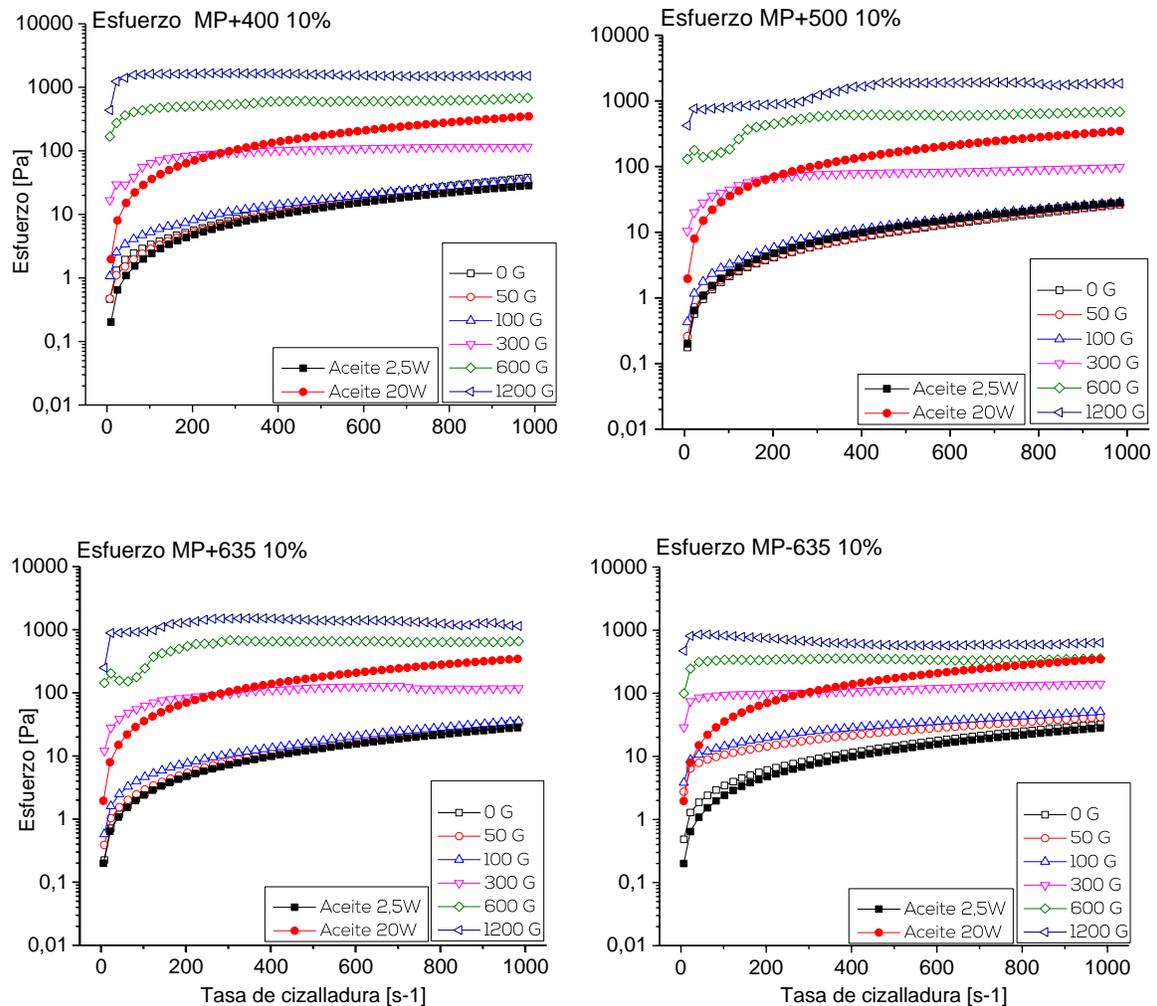


Con respecto a la influencia del tamaño de partícula sobre los esfuerzos (ver **Figura 3-31**), el esfuerzo disminuye a medida que disminuye el tamaño de partícula, nuevamente se evidencia que la resistencia de la estructura formada a 1200 gauss para un tamaño de partícula grande presenta mayor resistencia respecto a la estructura formada con tamaños pequeños y las mismas condiciones, la posible razón de esto es que la

cantidad de puntos de contacto por donde se genera el rompimiento de la estructura es menor en tamaños grandes comparado con los tamaños pequeños.

En la Figura 3-32 y Figura 3-33 se presentan las curvas de esfuerzo para las distintas muestras con una concentración del 10% y 15% respectivamente. Se observa que el comportamiento de las curvas con respecto a la estabilidad y al esfuerzo es generalizable para 10 y 15%.

Figura 3-32 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 10%



Los cambios de esfuerzo para las muestras con concentraciones al 10% variaron respecto a concentraciones del 5%, logrando obtener mayores valores de esfuerzo a una concentración del 10%; para la muestra MP+400 con concentración del 10%, el cambio del esfuerzo esta entre 0.2 Pa y 1100 Pa aproximadamente, se logra obtener 100 Pa de esfuerzo más que la obtenida para el mismo tamaño a 5% de concentración, sin embargo, se observa que la fracción volumétrica tiene un efecto en la muestra MP-

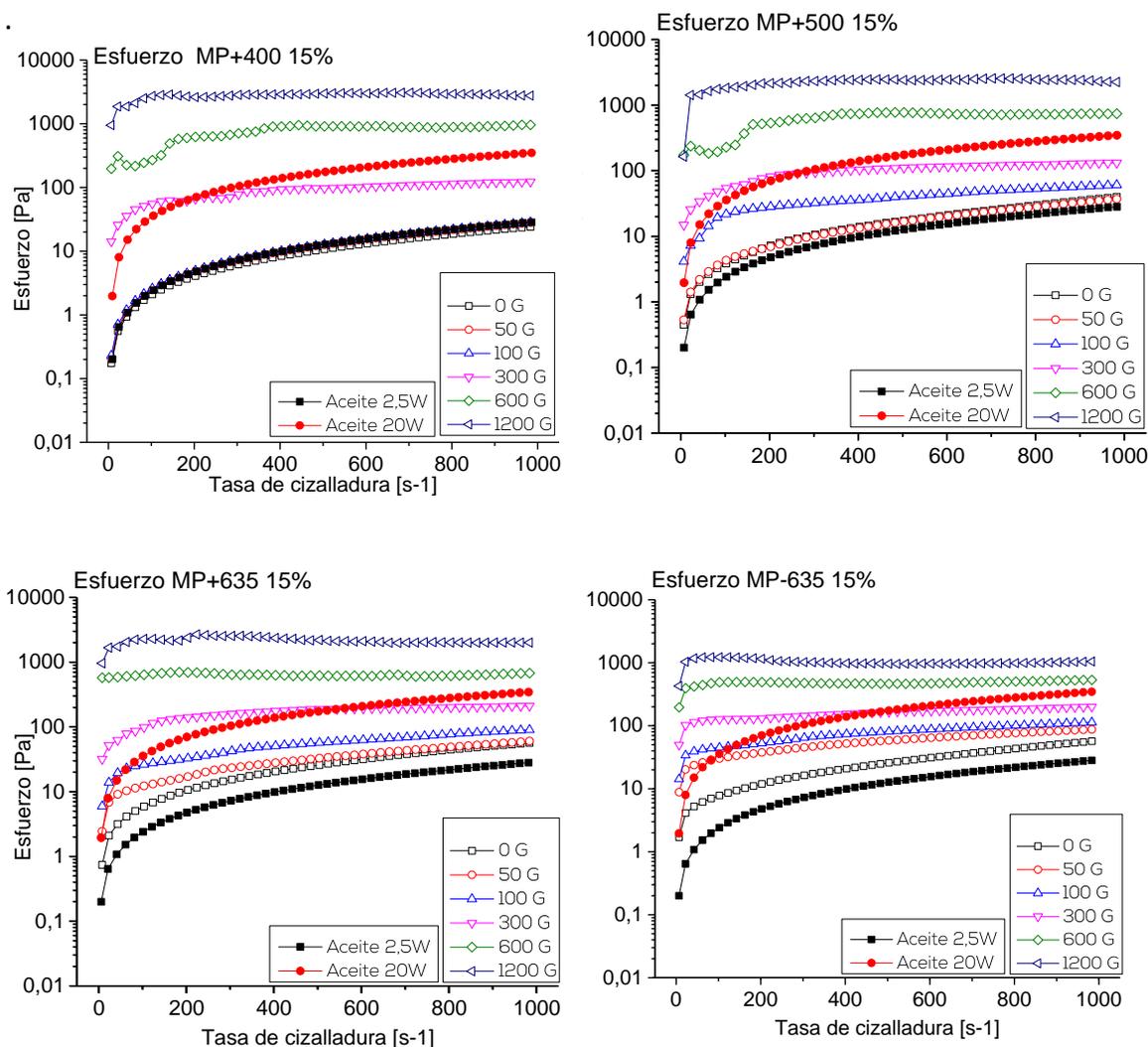
635 aumentando su valor inferior de esfuerzo, el cual para una concentración de 5% se encontraba en 0.2 Pa y para la concentración al 10% se registra un aumento de 0.4 Pa, lo que indica que con el aumento de la fracción volumétrica existirá un aumento en el resultado final del esfuerzo,

Para la Figura 3-33 se presentan las curvas de esfuerzo para las diferentes muestras con concentraciones al 15%, los valores de esfuerzo no logran aumentar en gran cantidad respecto a la muestras con concentraciones al 10%, para la muestra MP+400 se logra obtener que el mayor esfuerzo sigue siendo 1100 Pa igual que el obtenido para la muestra a una concentración del 10% y el menor esfuerzo obtenido cuando no se aplica campo magnético es de 0.2 Pa, igual a los esfuerzos obtenidos a 5% y 10% en concentración, sin embargo, cuando se observa la muestra MP-635 se encuentra que el esfuerzo de estabilidad se encuentra en 900 Pa, haciendo un incremento respecto a las muestras con concentración al 5% y 10%,

Con respecto a los esfuerzos a cero gauss es notable que el esfuerzo mínimo obtenido por la muestra MP-635 a concentraciones del 15% es superior al obtenido respecto a las muestras con 5% y 10% de concentración, a diferencia de lo que sucedió con la muestra MP+400 que su valor mínimo se hizo constante en todas las fracciones volumétricas, con estos resultados se puede indicar que la fracción volumétrica es un parámetro reológico que varía el esfuerzo de los FMR en asociación con el campo magnético, los resultados también muestran que dicho parámetro realiza una discriminación del efecto ocasionado en la reología del FMR de acuerdo al tamaño de partícula que se tenga,

Para tamaños grandes la influencia por parte de la fracción volumétrica en el esfuerzo no es significativos cuando no se aplican campos magnéticos, por el contrario, cuando se hace una reducción del tamaño de partícula como sucede en la muestra MP-635, se aprecia que al aumentar la concentración hay un aumento de la curva de esfuerzo cuando no se aplica campo magnético. La razón de la discriminación mencionada anteriormente es que al aumentar la concentración de partículas en una suspensión, el esfuerzo del FMR se hará dependiente de la cantidad de interacciones que se tengan entre las partículas, la cantidad de interacciones aumenta al reducir el tamaño de partícula, si se evalúa la muestra MP+400 Y MP-635 que son las muestras con el tamaño más grande de partícula y con el menor tamaño, respectivamente, se evidencia que para una concentración del 15% la cantidad de partículas que existen en la muestra MP+400 es menor respecto a la cantidad de partículas que existirán en la muestra MP-635, aunque el volumen sea igual. De aquí que los efectos de la concentración volumétrica sean más notables en MP-635 que MP+400.

Figura 3-33 Curvas de esfuerzo para distintas muestras a una concentración del 15%



Finalmente se puede indicar que, con el aumento de la concentración, la curva de esfuerzo puede moverse y distribuirse de una manera mucho más uniforme dentro de la zona de trabajo, la cual ahora se limita con la curva de esfuerzo obtenida para el aceite 2.5W y el aceite 20W.

3.6.8 Modelo reológico

Los FMR presentan un comportamiento que se puede modelar con la ecuación de Bingham o Herschel Bulkley, para verificar cual es el modelo de mayor correlación, se tomaron aleatoriamente las curvas de esfuerzo de dos FMR seleccionados, las dos muestras seleccionadas fueron la MP+400 a una concentración del 15% y un campo de 100 gauss, y la segunda la MP-635 a una concentración de 5% con un campo de 100

gauss., En la Figura 3-34 se pueden ver las curvas de esfuerzo para las dos muestras a la vez que las curvas de ajuste de cada uno de los modelos. En la **Tabla 3-14** se puede observar cada uno de los parámetros obtenidos para los modelos al igual que sus ajustes correspondientes, se tienen ajustes que son altos y que indicarían que con cualquiera de los dos modelos se podría ajustar las curvas de esfuerzo, sin embargo se observa que el modelo de Herschel Bulkley tiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.998$ para los dos, por esto se determina ajustar todas las curvas de esfuerzo a este modelo y así poder obtener el esfuerzo de fluencia,

Por otra parte es de saber que aunque el modelo de ajuste es alto, se debe tener en cuenta que este modelo solo toma en cuenta como parámetro fundamental y modificador reológico a la tasa de cizalladura, ver **Ecuación 5**, sin embargo, se debe considerar la elaboración de un modelo que integre el campo magnético, Se ha apreciado a lo largo de esta investigación que los campos magnéticos provocan una magnificación en un valor X del esfuerzo, por consiguiente en la construcción de un posible modelo se podría considerar al campo magnético como un factor multiplicativo con la tasa de cizalladura.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

Ecuación 5

Figura 3-34 Comparación de los modelos de Bingham y Herschel Bulkley.

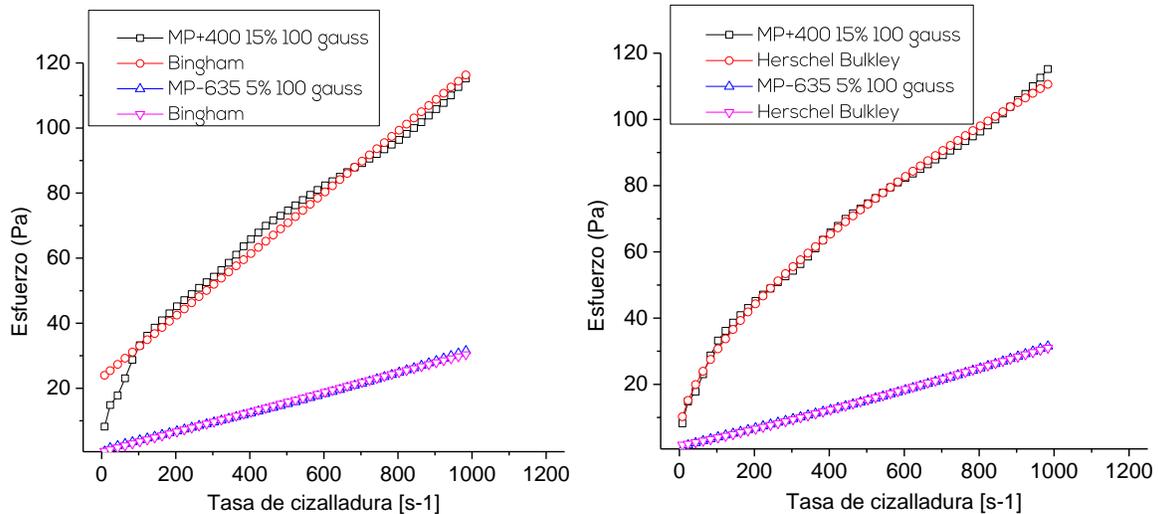


Tabla 3-14 Parámetros y ajuste para los modelos Herschel Bulckley y Bingham en dos FMR.

Modelo	Muestra	Coefficiente de determinación	Kl	Esfuerzo de fluencia	n
Bingham	MP+400 15% 100 gauss	0,9889	0,0946 9	23,23	No aplica
Herschel Bulckley	MP+400 15% 100 gauss	0,9987	1,396	5,092	0,6277
Bingham	MP-635 5% 100 Gauss	0,9987	0,0304 0	0,4693	No aplica
Herschel Bulckley	MP-635 5% 100 Gauss	0,9996	0,01207	1.612	0.92

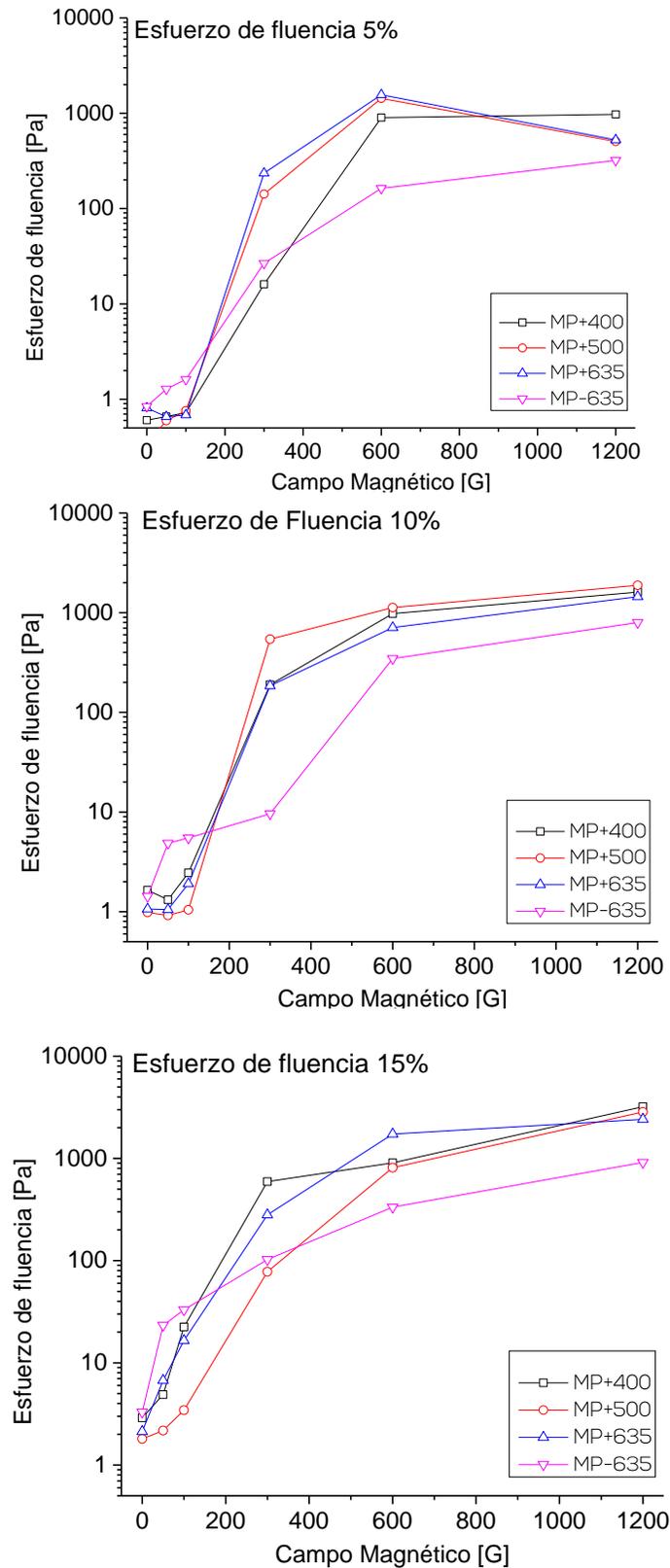
El modelo de Herschel Bulckley se ajusta a todas las curvas de esfuerzo de los FMR fabricados y se obtienen los parámetros n y K, lo cual se puede ver en el Anexo I, el coeficiente de determinación en promedio se mantuvo sobre 0.99.

3.6.9 Esfuerzo de Fluencia

En la Figura 3-35 se presenta los esfuerzos de fluencia obtenidos a través del modelo de Herschel Bulckley para cada una de las muestras de FMR a diferentes concentraciones, como generalidad se encuentra que a medida que aumenta el campo magnético en un FMR el esfuerzo de fluencia tiende a aumentar. Al analizar los esfuerzos de fluencia para las concentraciones de 5% y 10% se encuentra que para las muestras MP+400, MP+500 y MP+635 no varían en gran proporción cuando son aplicados campos magnéticos de 50 y 100 gauss respecto a las mismas muestras sin campo magnético, sin embargo, no sucede lo mismo para la muestra MP-635 la cual presenta los mayores cambios en esfuerzo de fluencia a campos bajos de 50 y 100 gauss, cuando se aumenta los campos a 300, 600 y 1200 gauss se aprecia que a concentraciones de 5% y 10% las muestras presentan amplios cambios de esfuerzo de fluencia con tendencia al incremento a excepción de las muestra MP+500 y MP+635 las cuales reducen su esfuerzo de fluencia para un campo de 1200 gauss y una fracción volumétrica de 5%. Lo cual no ocurre para concentraciones de 10% y 15%.

El esfuerzo de fluencia de la muestra MP-635 presenta los más altos valores esfuerzos de fluencia en todas las concentraciones con campos de 50 y 100 gauss, en 300 gauss presenta una zona de transición donde se obtienen los menores esfuerzos de fluencia en 600 y 1200 gauss, como se indicó anteriormente en esta investigación la posible explicación que la muestra MP-635 tenga mayores esfuerzos de fluencia con un campo de 50 y 100 gauss, es la posibilidad de formar estructuras gracias a que las partículas presentan pequeño tamaño y un liviano peso respecto a las demás muestras, las cuales presentan tamaños más grandes y por consiguiente un mayor peso.

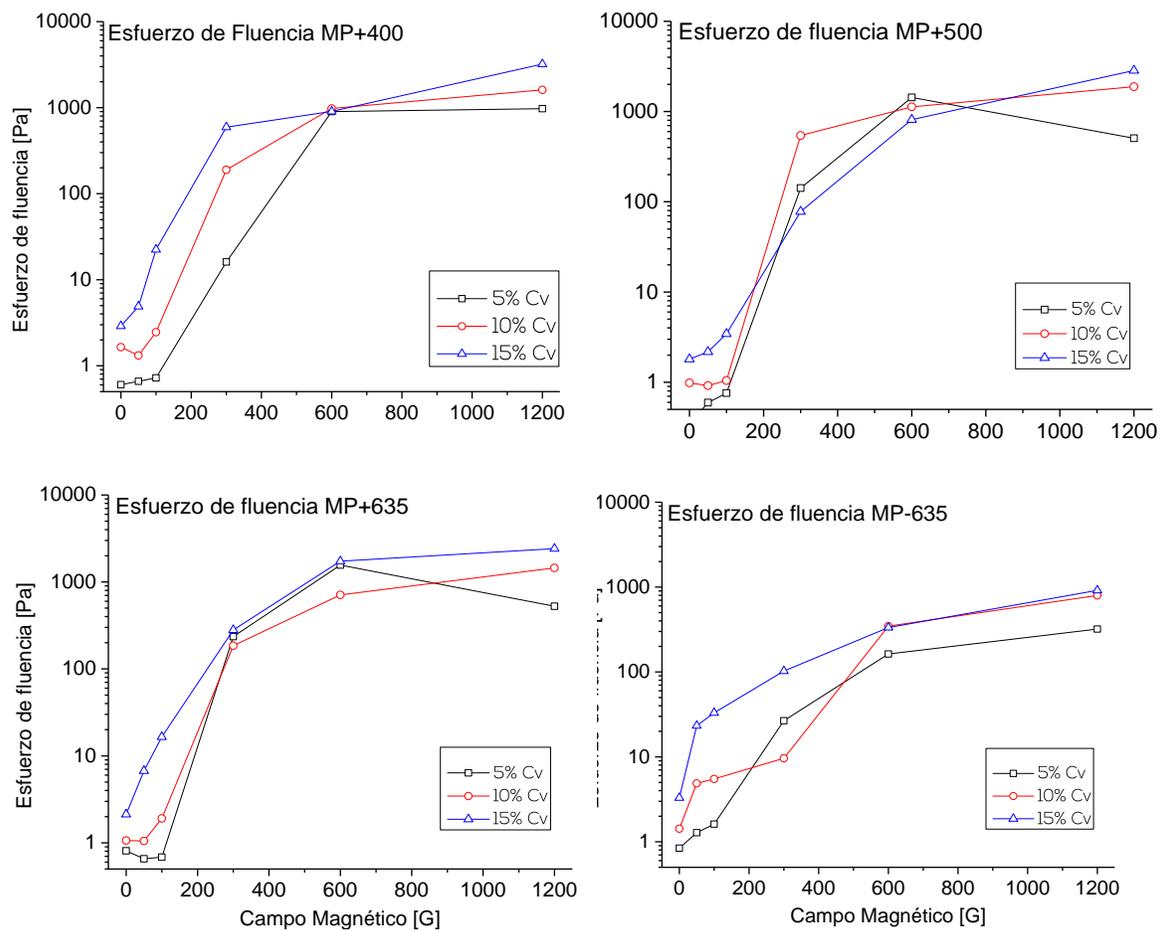
Figura 3-35 Esfuerzo de fluencia para los FMR a diferentes concentraciones volumétricas



Otro factor para que suceda esto, es que al poseer un tamaño más pequeño se tienen mayores áreas de contacto y por consiguiente una mayor interacción partícula-partícula lo que ocasiona un mayor esfuerzo de fluencia. Cuando se aplican los campos de 600 y 1200 gauss se forman estructuras fuertes y rígidas para las muestras MP+400, MP+500 Y MP+635, esto se da gracias a que con un tamaño de partícula grande darán a sus estructuras una menor cantidad de puntos de posibles rupturas a la vez que una mayor resistencia o un esfuerzo de fluencia mayor.

Con el incremento de la concentración se puede apreciar que se obtiene ganancia en valor de esfuerzo de fluencia obtenido para 1200 gauss, siendo así que a una concentración de 15% se presentan los mayores esfuerzos de fluencia comparando todas las pruebas realizadas.

Figura 3-36 Esfuerzo de fluencia para diferentes concentraciones



En la Figura 3-36 se muestran los esfuerzos de fluencia para cada una de las muestras con diferentes concentraciones volumétricas, se puede observar que efectivamente la concentración volumétrica tiene un aporte en el esfuerzo de fluencia de cada uno de

los FMR fabricados, en general con una concentración volumétrica de 15% se pueden tener mayores esfuerzos de fluencia en cualquier valor de campo magnético,

3.6.10 Curvas Oscilatorias, Amplitud y Frecuencia.

Los FMR pueden tener una transición de líquido a sólido con la aplicación de un campo magnético; cuando el fluido es sometido a un campo magnético moderado, el fluido obtendrá un comportamiento líquido y comportamiento sólido, el líquido será consecuencia de la fase continua, en este caso el aceite, y parte sólida será consecuencia de la fase dispersa, para este caso la magnetita.

Los ensayos oscilatorios permiten estudiar la parte viscosa(Líquida) y elástica(sólida) de un FMR, indicando en que entornos cada una de las partes prevalecerá, por ejemplo, con la formación de una estructura que puede tener resistencia de 10 Pa se puede pensar que el FMR tiene un comportamiento sólido, sin embargo, si se aplica un esfuerzo superior a los 10 Pa, la estructura se deformará y entonces el FMR pasará a ser más líquido que sólido, A continuación se presentan los resultados de ensayos oscilatorios que determinan el entorno en el que el fluido se comportará como sólido o líquido.

Los parámetros que se miden en esta investigación son G' que es conocido como módulo elástico o módulo de almacenamiento y es el indicador de la habilidad que tiene el FMR de almacenar energía, G'' es conocido como el módulo viscoso o el módulo de disipación, e indica la habilidad que tiene el FMR para disipar la energía y δ es el ángulo de desfase entre los dos módulos G' y G'' , indicando la relación existente entre los dos módulos, así, si el ángulo se encuentra inferior a 45° mostrará que la muestra es sólida, predomina el módulo de almacenamiento y si el ángulo es superior la muestra es viscosa o líquida y predomina el módulo de disipación.

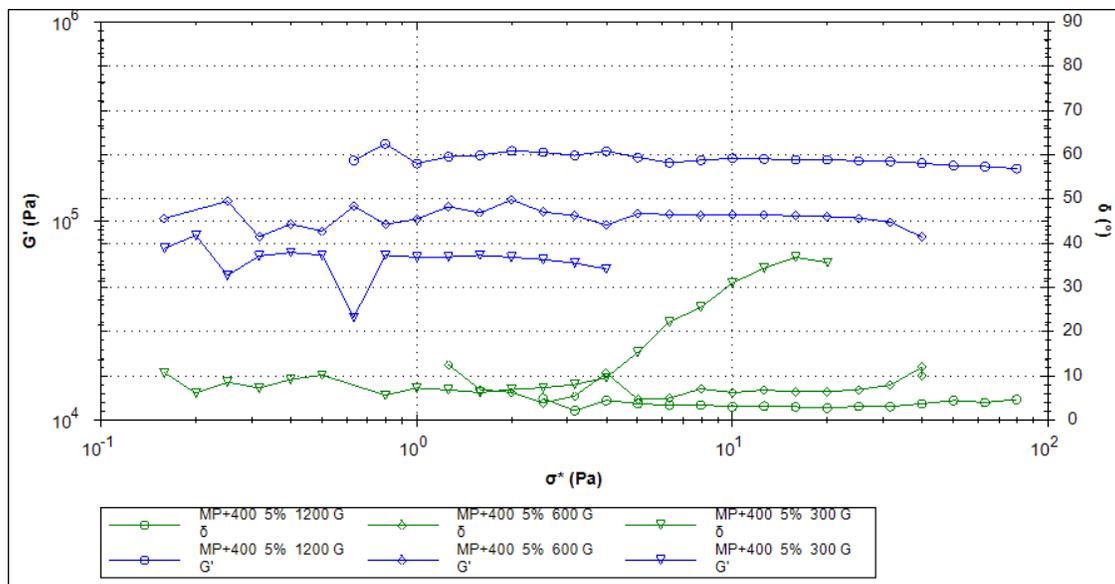
Para una aplicación de amortiguación se necesitan los dos módulos, en el momento que una motocicleta toma un bache necesitará que se disipe la energía del impacto y al mismo tiempo almacenarla con el fin que al superar el bache el sistema de almacenamiento retorne a su posición inicial, hoy en día esto se logra con el aceite como disipador y un resorte dentro del aceite que actúa como el módulo de almacenamiento.

Los ensayos oscilatorios se realizaron a todas las muestras, buscando la zona lineal viscoelástica, la cual es la zona donde en el FMR predomina el módulo elástico. A modo de reducir un poco el estudio oscilatorio se opta por:

- presentar los resultados para las muestras MP+400 y MP-635 a las diferentes concentraciones, ya que poseen los tamaños más grandes y más pequeños de toda los FMR formulados.
- Estudiar solo el módulo elástico ya que el modulo viscoso puede dominar en cualquier entorno al FMR sencillamente con la anulación del campo magnético.

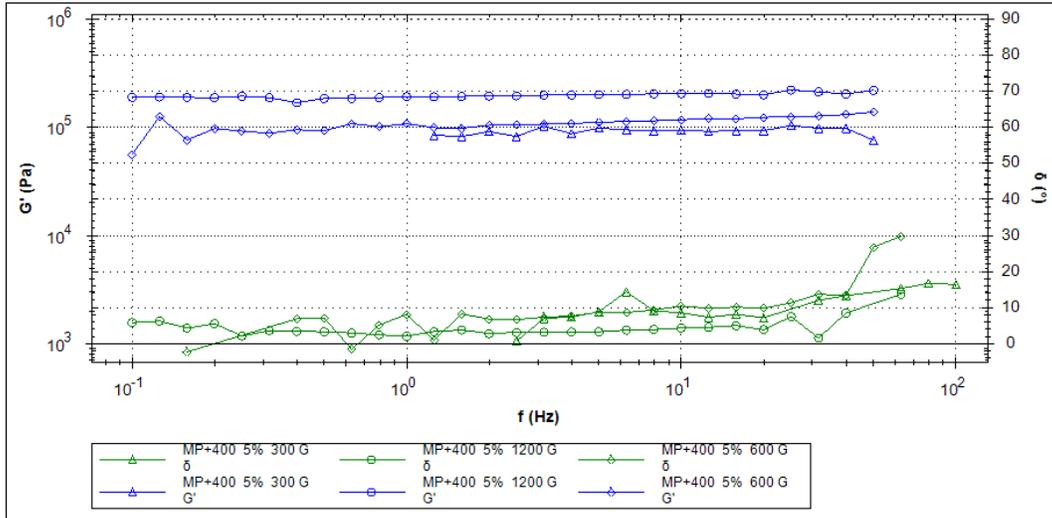
En la **Figura 3-37** se presenta la zona lineal viscoelástica o por sus siglas en ingles LVR (Linear Viscoelastic region) para la muestra MP+400 con concentración del 5%. Este FMR presenta una LVR solo en campos superiores a los 300 gauss, con el incremento del campo magnético se gana mayor resistencia en G' y una mayor extensión para la LVR.

Figura 3-37 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 5% con valor de frecuencia 1Hz



En la Figura 3-38 se presenta un barrido de frecuencia con un valor fijo de esfuerzo, el valor de esfuerzo es tomado de la LVR descrita anteriormente, por ejemplo, para un campo de 1200 gauss se tomó un valor de 10 Pa para desarrollar el barrido de frecuencia, con el fin de verificar en que frecuencias la estructura sigue siendo elástica, La LVR se mantiene en frecuencias entre 0.1 Hz y 40 Hz del esfuerzo aplicado. Se puede observar que las resistencia en frecuencia disminuye con la disminución del campo magnético, donde la muestra de 300 gauss presenta una resistencia en frecuencia entre 1 Hz y 40 Hz, sin embargo son valores suficientes para resistir las frecuencias que se llevan a cabo en la amortiguación de una motocicleta.

Figura 3-38 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 5%



En la Figura 3-39 y Figura 3-40 se determina que, con el aumento de la concentración volumétrica, los FMR con la aplicación de 100 gauss empiezan a tener un LVR, lo cual no sucedía a concentraciones de 5%. Esto posiblemente gracias a que con una cantidad mayor de partículas se propiciará una mayor posibilidad de formación de estructuras. Igualmente se logra una mayor resistencia en el barrido de frecuencia con el aumento de la concentración volumétrica,

Figura 3-39 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 10%

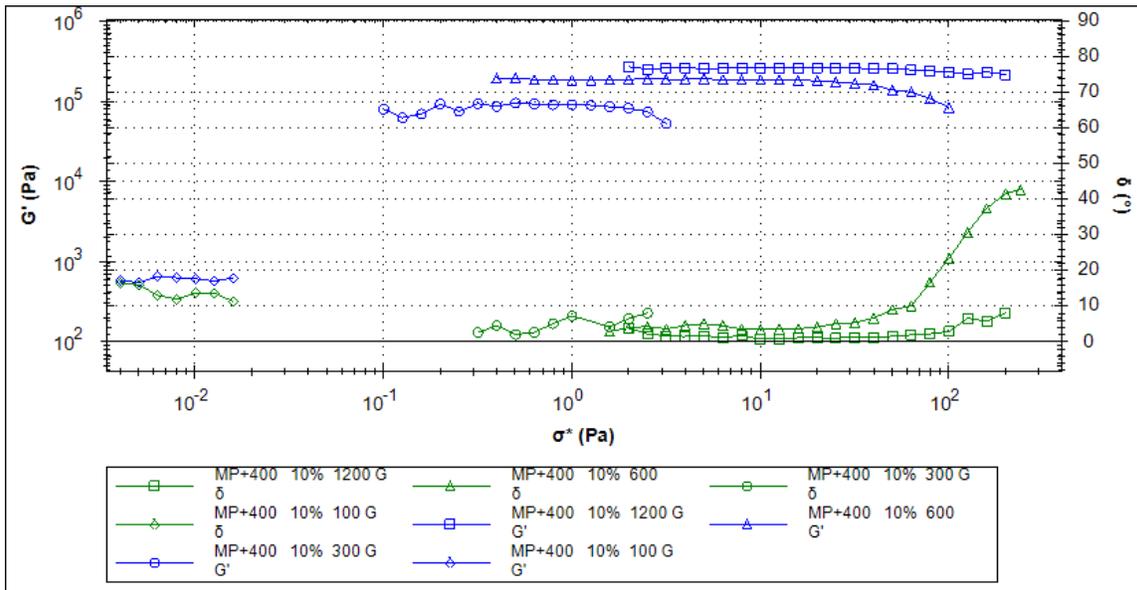
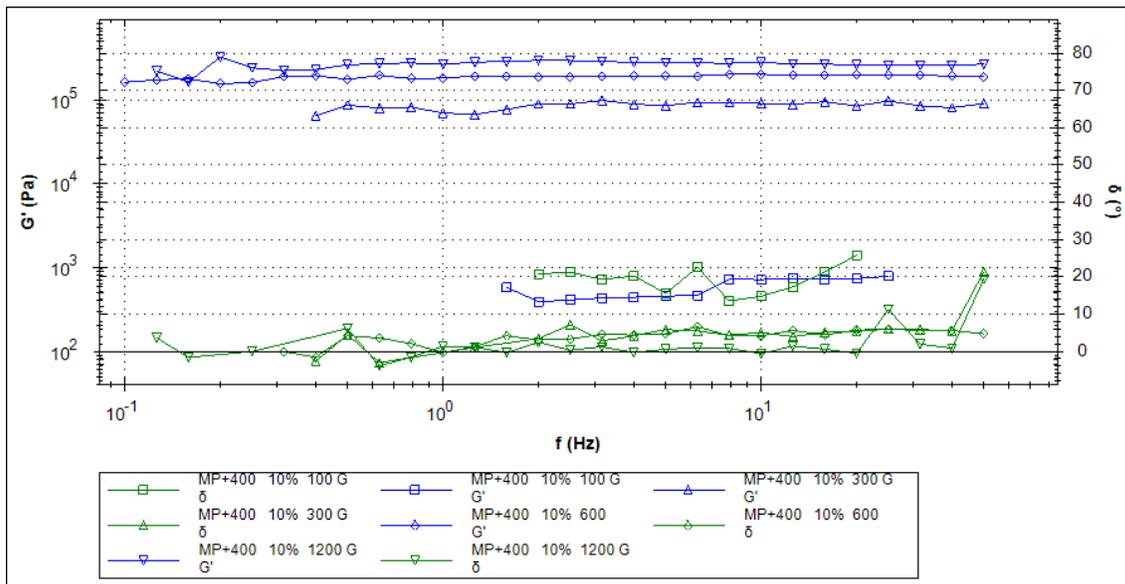


Figura 3-40 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 10%



En la Figura 3-41 y Figura 3-42 se determina que con el aumento de la concentración volumétrica a un 15% se puede llegar a obtener LVR entre los 2 Pa y 200 Pa.

Figura 3-41 Zona lineal viscoelástica muestra MP+400 con concentración 15%

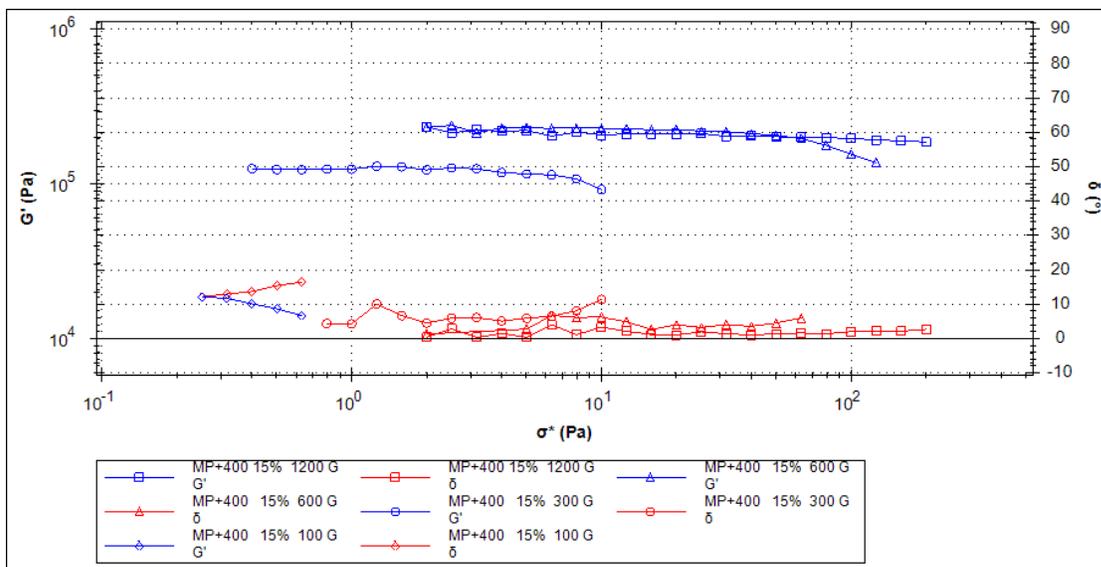
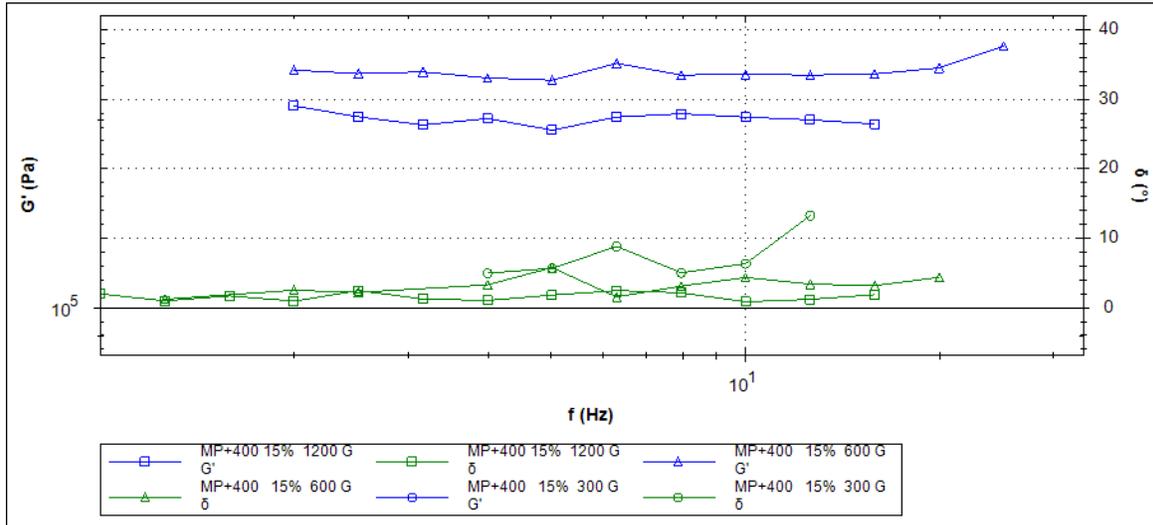


Figura 3-42 Barrido de frecuencia MP+400 con concentración 15%



En la Figura 3-43 y Figura 3-44, se observa que el tamaño de partícula otorga a los FMR, zonas lineales viscoelásticas con la aplicación de campos hasta de 50 gauss, pero como consecuencia de esto hace una reducción de la extensión que puede tener la LVR, como se indicó durante la investigación a menores tamaños se propicia la formación de estructuras a bajos campos, pero estas tienden a ser débiles con campos altos, contrario a los tamaños grandes.

Con concentraciones bajas y tamaños pequeños el módulo de almacenamiento resulta igual en magnitud que con tamaños grandes y con la diferencia que con tamaños bajos hay un mayor barrido de frecuencias.

Figura 3-43 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 5%

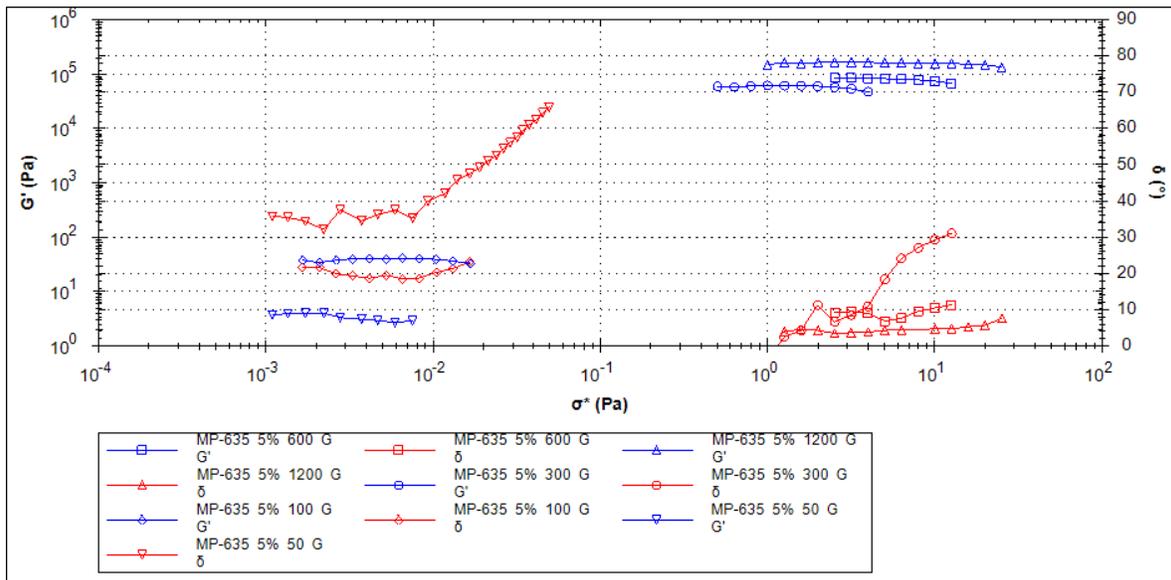
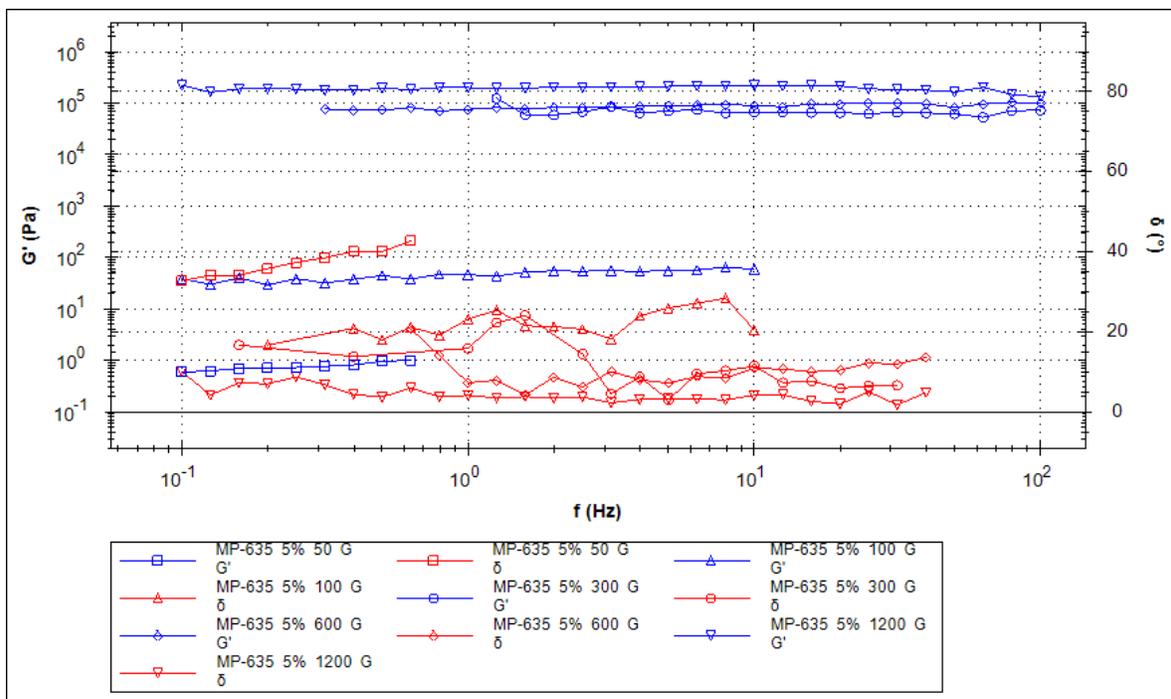


Figura 3-44 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 5%



De la Figura 3-45 a Figura 3-48, se puede determinar que:

- Con los tamaños pequeños se pueden obtener LVR más cortas que con tamaños más grandes.
- Con tamaños más pequeños se propicia la estructuración de la magnetita y aparecen LVR para campos bajos.
- A concentraciones más altas se gana en magnitud de G' y en una mayor extensión para los barridos de frecuencia.
- Los FMR con tamaños de partícula pequeñas son mejores respecto a los FMR con partículas grandes cuando de poseer una LVR se trata, no importa que con diferentes campos las LVR sean cortas en extensión para tamaños pequeños, pues si se analiza todo el FMR puede ser sometido a esos campos y por consiguiente esas zonas serán sumadas, logrando poder tener una LVR que cubre desde 0.01 Pa hasta 100 Pa,

Figura 3-45 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 10%

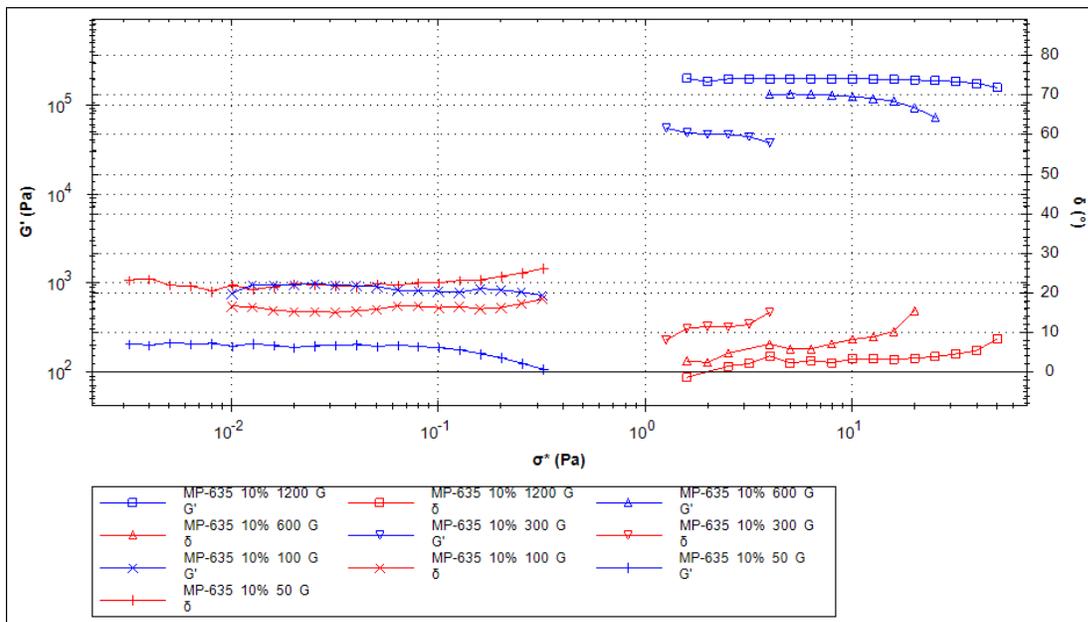


Figura 3-46 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 10%

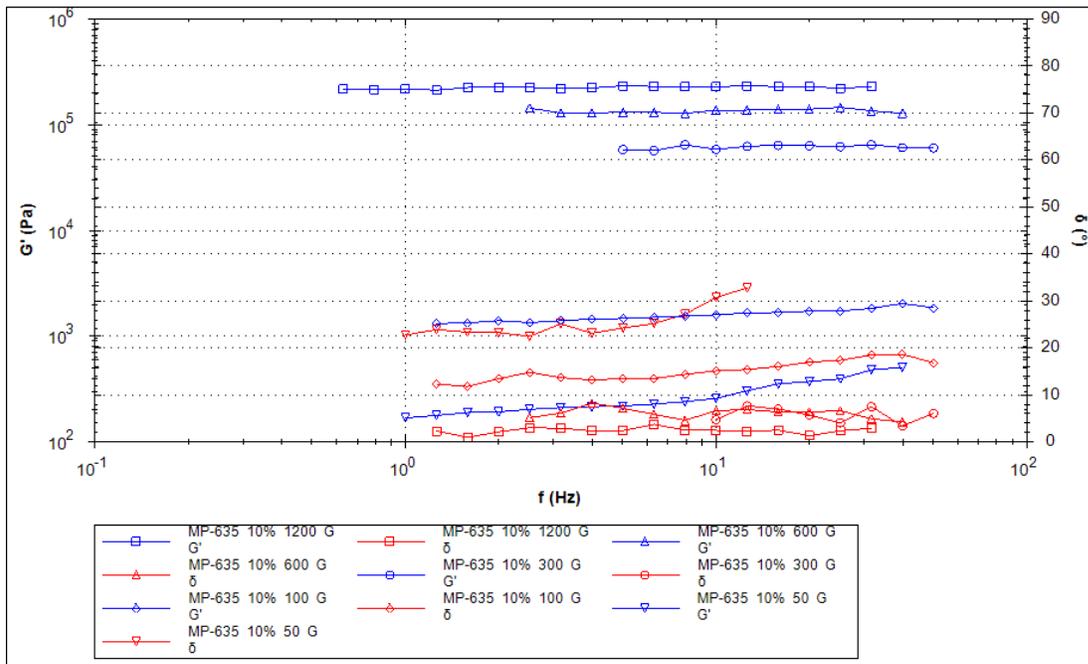


Figura 3-47 Zona lineal viscoelástica muestra MP-635 con concentración 15%

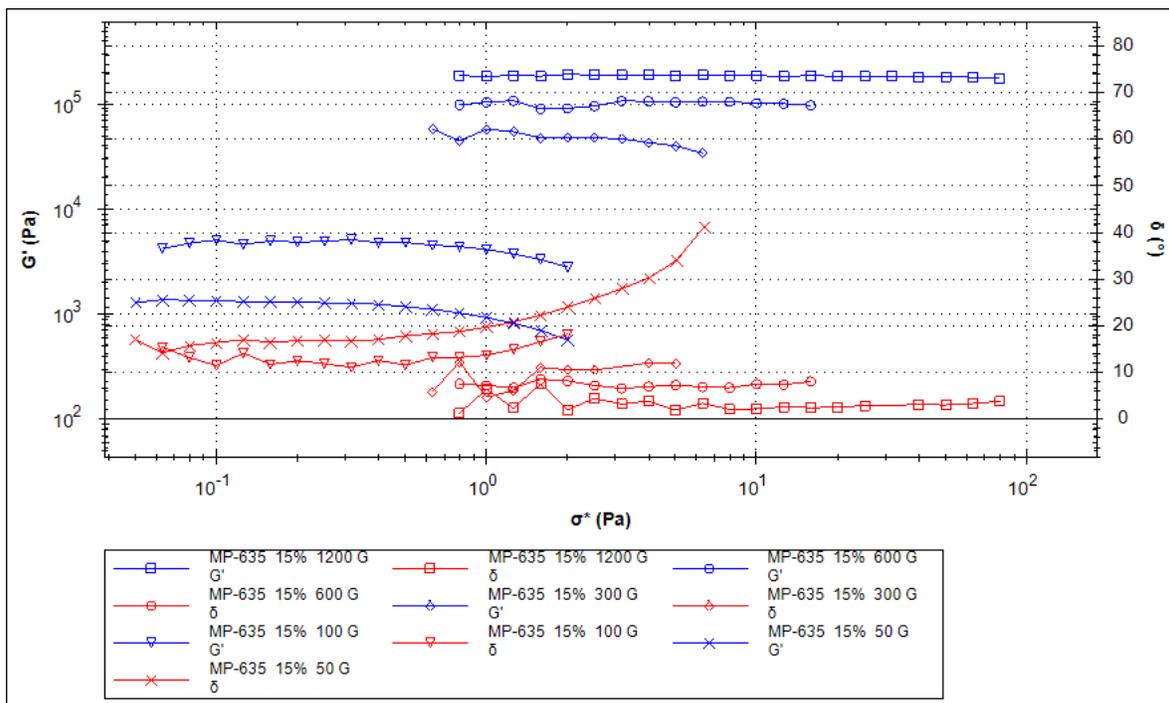
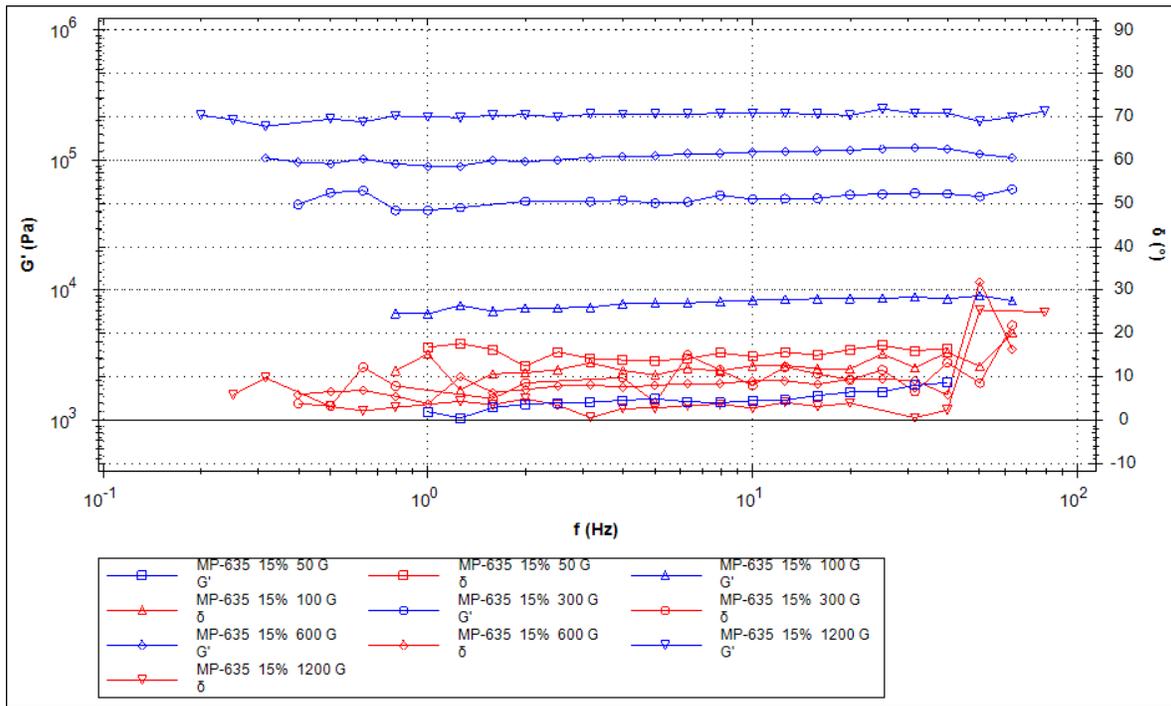


Figura 3-48 Barrido de frecuencia MP-635 con concentración 15%



4. Conclusiones

Los FMR a partir de magnetita proveniente de residuos aluviales pueden ser utilizados en sistemas de amortiguamiento gracias a que varían sus propiedades reológicas hasta tres órdenes de magnitud, esta ventaja potencial sobre otros materiales es principalmente debido a la aplicación del campo magnético y a la respuesta que presenta la magnetita en suspensión. Sin embargo, la fracción volumétrica y el tamaño de partícula son determinadores de los valores de esfuerzo y viscosidad que el FMR puede tomar. Cada una de las curvas de flujo obtenidas se modeló con Herschel Bulkley, el cual se ajusta al comportamiento pseudoplastico con una correlación superior de 0.99. En las pruebas de reología estacionaria se encontró que el tamaño de partícula determina la formación de estructuras, siendo así que con el incremento de tamaño se debe incrementar el campo magnético para que se dé inicio a la formación estructural dentro del fluido, con lo que se obtiene que los máximos cambios de viscosidad se alcanzan al aplicar campos magnéticos altos en FMR con tamaños de partícula grandes, si a lo anterior se suma el parámetro de la fracción volumétrica se obtiene que con el incremento de esta, se conciben viscosidades y esfuerzos de fluencia aún mucho más altos.

En reología dinámica se determinó que la fracción volumétrica propicia la formación de estructuras que son responsables de la elasticidad de la muestra, a campos bajos la elasticidad obtenida en el FMR proporciona una mayor resistencia en un amplio rango de frecuencias, con el aumento del campo magnético el rango de frecuencias de trabajo se ve disminuido ya que el fluido tiende a comportarse como sólido (aumento del G'). Los FMR que presentan tamaños de partícula pequeños son más eficaces para incrementar los rangos de elasticidad respecto a los FMR con partículas grandes, esto debido a que con tamaños de partícula menores a 20 micras se puede obtener elasticidad en cualquier valor de esfuerzo de la zona de trabajo sólo con la modificación del campo magnético.

Finalmente los FMR fabricados pueden ser utilizados en sistemas de amortiguación, ya sea de una motocicleta o de otros sistemas mecánicos, esto debido a que los valores obtenidos de viscosidad y esfuerzo estuvieron tanto dentro de la zona de trabajo definida y superaron los rangos de trabajo hasta en 4 veces los valores de viscosidad inicial.

5. Bibliografía

- Anton Paar. (2011). La serie de reómetros modulares compactos ::: *c921pooles-B*, 20.
- Ashtiani, M., Hashemabadi, S. H., & Ghaffari, a. (2015). A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 716–730. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.020>
- Atta, A. M., El-Mahdy, G. a., Al-Lohedan, H. a., & Al-Hussain, S. a. (2014). Synthesis of environmentally friendly highly dispersed magnetite nanoparticles based on rosin cationic surfactants as thin film coatings of steel. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(4), 6974–6989. <http://doi.org/10.3390/ijms15046974>
- Barnes, H. A. (1993). *AN INTRODUCTION TO RHEOLOGY*. (Elsevier, Ed.) (Tercera ed). Netherlands.
- Betancur, J. D., Restrepo, J., Arnache, O., Mazo Zuluaga, J., Morales, A. L., Barrero, C. A., ... Bohórquez, A. (2002). Análisis Mössbauer de la transformación Hematita a magnetita bajo tratamiento térmico en atmósfera controlada. *Revista Colombiana de Física*, 34(0120–2650), 410–414.
- Bica, I. (2002). Damper with magnetorheological suspension. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 241(2–3), 196–200. [http://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00009-4](http://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00009-4)
- Bica, I. (2004a). Magnetorheological suspension based on mineral oil, iron and graphite micro-particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 283(2–3), 335–343. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.05.036>
- Bica, I. (2004b). Magnetorheological suspension electromagnetic brake. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 270(3), 321–326. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.08.030>
- Bica, I., Liu, Y. D., & Choi, H. J. (2013). Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(2), 394–406. <http://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.10.008>
- Boczkowska, A., & Awietjan, S. (2012). Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers.
- Bossis, G., Laci, S., Meunier, a, & Volkova, O. (2002a). Magnetorheological fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252, 224–228. [http://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00680-7](http://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00680-7)
- Bossis, G., Laci, S., Meunier, a, & Volkova, O. (2002b). Magnetorheological fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252, 224–228.

- [http://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00680-7](http://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00680-7)
- Bossis, G., Volkova, O., Lacis, S., & Meunier, A. (2002). Magnetorheology: Fluids, Structures and Rheology, 202–230.
- Bustamante, O. (2009). *Reología de suspensiones: Viscosidad de suspensiones y pastas minerales bajo una aproximación termomecánica*. (U. N. De Colombia, Ed.) (primera). Medellín.
- Carrillo, U. S. J. L., & Hidalgo-aamf, E. De. (2010). Fluido magneto-reológico bajo perturbaciones magnéticas, 56(1), 123–133.
- Cavey, R. H., Sandu, C., & West, R. L. (2008). Design and Development of a Squeeze-Mode Rheometer for Evaluating Magneto-Rheological Fluids By Design and Development of a Squeeze-Mode Rheometer for Evaluating Magneto-Rheological Fluids.
- Chand, M., Kumar, S., Shankar, A., Porwal, R., & Pant, R. P. (2013). The size induced effect on rheological properties of Co-ferrite based ferrofluid. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 361, 38–42. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.10.003>
- Chen, Z. Q., Wang, X. Y., Ko, J. M., Ni, Y. Q., Billie F. Spencer, J., & Yang, G. (2003). MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge, 5057(1), 229–235. <http://doi.org/10.1117/12.498072>
- Choi, J. S., Park, B. J., Cho, M. S., & Choi, H. J. (2006). Preparation and magnetorheological characteristics of polymer coated carbonyl iron suspensions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304(1), 374–376. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.02.055>
- Donado, F., Mendoza, C. Y., Santiago-garc, R. V. J. A., & Hidalgo, E. De. (2007). Estudio experimental de la viscosidad de un fluido magneto-reológico a base de magnetita mineral, 53(1), 31–40.
- Drossel, W.-G., Kunze, H., Bucht, A., Weisheit, L., & Pagel, K. (2015). Smart3 – Smart Materials for Smart Applications. *Procedia CIRP*, 36, 211–216. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.055>
- Enriquez-torres, J. R., & Alonso-arreguin, E. (2007). 8° CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA.
- Flatau, a. ., & Chong, K. . (2002). Dynamic smart material and structural systems. *Engineering Structures*, 24(3), 261–270. [http://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00093-1](http://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00093-1)
- Gandhi, F., Wang, K. W., & Xia, L. (2001). Magnetorheological fluid damper feedback linearization control for helicopter rotor application. *Smart Materials and Structures*, 10(010201-017002), 96–113.
- Gravatt, J. W. (2003). Magnetorheological Dampers for Super-sport Motorcycle Applications by Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science In Mechanical Engineering Approved: Magneto-Rheolog.
- Gutierrez, C., Sanchez Herencia, J., & Moreno, R. (2000). ¿Plástico o pseudoplástico?. Métodos de determinación y análisis del punto de fluidez de suspensiones cerámicas, 105–117.
- Imaduddin, F., Mazlan, S. A., & Zamzuri, H. (2013). A design and modelling review of rotary magnetorheological damper. *Materials & Design*, 51(April), 575–591. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.042>
- ISO. (2009). ISO 13320:2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods.

- Jolly, M. R., Bender, J. W., Carlson, J. D., & Drive, Lord. (1999). Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids.
- José, A., Bombard, F., & Knobel, M. (2000). Avaliação de um fluido magneto-reológico em amortecedor protótipo, magneto-reômetro e magnetômetro, 1-7.
- Leblanc, J. L., & Barre, C. (2000a). ` s * , Jean L. Leblanc Claire Barre, *19*, 177-191.
- Leblanc, J. L., & Barre, C. (2000b). Recent developments in shear rheometry of uncured rubber compounds I. Design, construction and validation of a sliding cylinder rheometer, *19*, 177-191.
- Lee, W.-K., & Ilavsky, J. (2013). Particle size distribution in ferrofluid macro-clusters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *330*, 31-36.
<http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.10.018>
- López-López, M. T., Kuzhir, P., Lácis, S., Bossis, G., González-Caballero, F., & Durán, J. D. G. (2006). Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *18*(38), S2803-S2813.
<http://doi.org/10.1088/0953-8984/18/38/S18>
- Luis, L., Jose, B., Yamile, V., & Yamile Valencia. (2012). Reduction of vibrations in a building using magnetorheological dampers. *Dyna*, *171*, 205-214.
- Malvern instruments. (2009). *Diez maneras de controlar la reología cambiando las propiedades de la partícula (Tamaño , Potencial Z y Forma)*.
- Mesquida, C. D., & Lässig, J. L. (2012). INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS CON APLICACIONES EN INGENIERÍA, *16*, 27-36.
- Mezger, T. (2006). *The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*. Vincentz Network GmbH & Co KG.
- Moreno Botella, R. (2005). *Reología de suspensiones ceramicas*. (C. superior de investigaciones de España., Ed.) (PRIMERA ed).
- Mueller, S., Llewellyn, E. W., & Mader, H. M. (2009). The rheology of suspensions of solid particles. *Proceedings of the Royal Society*, *466*(2116), 1201-1228.
<http://doi.org/10.1007/BF01432034>
- Muhammad, A., Yao, X., & Deng, Z. (2006). Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control. *Journal of Marine Science and Application*, *5*(3), 17-29. <http://doi.org/10.1007/s11804-006-0010-2>
- Murphy, E. B., & Wudl, F. (2010a). The world of smart healable materials. *Progress in Polymer Science*, *35*(1-2), 223-251.
<http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.10.006>
- Murphy, E. B., & Wudl, F. (2010b). The world of smart healable materials. *Progress in Polymer Science*, *35*(1-2), 223-251.
<http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.10.006>
- Perez, M. C. F. D., Luis, J., Estrada, C., Maria, D., & Mendoza, E. (2002). *FLUIDOS ELECTRO Y MAGNETO-REOLOGICOS: TEORIA Y EXPERIMENTO*.
- Rabinow, J. (1948). The Magnetic Fluid Clutch A-idFigure, 1308-1315.
- Rabinow, J. (1951). Magnetic fluid torque and force transmitting device.
- Rao, M. A. (2009). *RHEOLOGY OF FLUID AND SEMISOLID FOODS* (Illustrate). Aspen Publisher.
- Supervisors, R. D., Prof, G., Coach, W., Prof, W., & Engineering, M. (2005). The Potential of Magneto-Rheological Fluid in Crashworthiness Design.
- Tanner, R. I. (2009). The changing face of rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid*

- Mechanics*, 157(3), 141-144. <http://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.11.007>
- Vargas, J. A., & Forero, A. H. (2011). Obtención de hierro a partir de arenas negras del Atlántico colombiano desembocadura del río Magdalena. *Revista de La Facultad de Ingeniería.*, 26(0716-3711), 19-26.
- Viota, J. L., Durán, J. D. G., & Delgado, a V. (2009). Study of the magnetorheology of aqueous suspensions of extremely bimodal magnetite particles. *The European Physical Journal. E, Soft Matter*, 29(1), 87-94. <http://doi.org/10.1140/epje/i2009-10453-3>
- Zapata, A. C. (2008). *Síntesis y caracterización de magnetitas pura y dopadas con cerio y titanio*. Universidad de Antioquia.

ANEXO 1, parámetros obtenidos para el ajuste dado por la ecuación de Hershel Bulkey sobre las curvas de esfuerzo para los FMR.

Muestra	Esfuerzo Fluencia	K1	n	Correlación
MP+400 0.5% 0 Gauss	0,6034	4,68E-03	1,235	0,9998
MP+400 0.5% 50 Gauss	0,6584	6,40E-03	1,211	0,9998
MP+400 0.5% 100 Gauss	0,7217	6,77E-03	1,205	0,9998
MP+400 0.5% 300 Gauss	16,07	16,07	0,3131	0,9952
MP+400 0.5% 600 Gauss	900	-	-0,2355	0,9669
MP+400 0.5% 1200 Gauss	973,2	-	-0,7273	0,9231
MP+500 5% 0 Gauss	0,3417	5,90E-03	1,221	0,9996
MP+500 5% 50 Gauss	0,5945	5,91E-03	1,212	0,9998
MP+500 5% 100 Gauss	0,7577	5,71E-03	1,221	0,9998
MP+500 5% 300 Gauss	141,9	136,4	0,08028	0,9841
MP+500 5% 600 Gauss	1,44E+03	-	-0,1058	0,981
MP+500 5% 1200 Gauss	506,1	0,01238	1,372	0,9867
MP+635 5% 0 Gauss	0,809	3,83E-03	1,282	0,9995
MP+635 5% 50 Gauss	0,6562	6,49E-03	1,21	0,9998
MP+635 5% 100 Gauss	0,6842	6,65E-03	1,212	0,9999
MP+635 5% 300 Gauss	235,5	-265,3	-0,09681	0,9962
MP+635 5% 600 Gauss	1,56E+03	-	-	0,9787
MP+635 5% 1200 Gauss	525,3	172,2	-1,133	0,03061
MP-635 5% 0	0,8415	5,91E-03	1,235	0,9997
MP-635 5% 50 Gauss	1,279	8,21E-03	1,185	0,9997
MP-635 5% 100 Gauss	1,612	0,01207	1,132	0,9996
MP-635 5% 300 Gauss	26,64	1,433	0,5397	0,9573
MP-635 5% 600 Gauss	163	7,73E-04	1,746	0,8474
MP-635 5% 1200 Gauss	320,6	-2,684	0,301	0,1729
MP+400 10% 0 Gauss	1,644	2,20E-03	1,406	0,9996
MP+400 10% 50 Gauss	1,318	2,77E-03	1,351	0,9997
MP+400 10% 100 Gauss	2,454	0,01466	1,113	0,9993
MP+400 10% 300 Gauss	189,4	-333,3	-0,222	0,9938
MP+400 10% 600 Gauss	979,9	-1,51E+03	-0,2189	0,9906

MP+400 10% 1200 Gauss	1,61E+03	-2,18E-04	1,935	0,6875
MP+500 10% 0 Gauss	0,9838	2,05E-03	1,364	0,999
MP+500 10% 50 Gauss	0,9177	2,53E-03	1,34	0,9997
MP+500 10% 100 Gauss	1,043	0,01302	1,109	0,9995
MP+500 10% 300 Gauss	543,3	511,3	0,0325	0,9882
MP+500 10% 600 Gauss	1,13E+03	-	-0,1539	0,9861
MP+500 10% 600 Gauss	1,88E+03	7,03E+03	-0,7739	0,8491
MP+635 10% 0 Gauss	1,063	2,72E-03	1,359	0,9994
MP+635 10% 50 Gauss	1,049	5,30E-03	1,258	0,9998
MP+635 10% 100 Gauss	1,908	0,01098	1,164	0,9992
MP+635 10% 300 Gauss	185	-301,8	-0,2243	0,9447
MP+635 10% 600 Gauss	710,3	-1,51E+03	-0,522	0,859
MP+635 10% 1200 Gauss	1,45E+03	-	-0,6002	0,8082
MP-635 10% 0 Gauss	1,424	6,24E-03	1,232	0,9996
MP-635 10% 50 Gauss	4,87	0,09586	0,8605	0,9988
MP-635 10% 100 Gauss	5,498	0,2909	0,7278	0,9985
MP-635 10% 300 Gauss	9,624	26,62	0,2272	0,9574
MP-635 10% 600 Gauss	346,4	-	-1,089	0,9748
MP-635 10% 1200 Gauss	796,8	-4,376	0,5817	0,6862
MP+400 15% 0 Gauss	2,894	7,40E-03	1,252	0,9992
MP+400 15% 50 Gauss	4,897	0,3144	0,7757	0,9996
MP+400 15% 100 Gauss	22,41	1,178	0,6397	0,9964
MP+400 15% 300 Gauss	593,3	-844	-0,1451	0,9935
MP+400 15% 600 Gauss	904,5	3,57E-10	3,479	0,03164
MP+400 15% 600 Gauss	3,21E+03	-	-0,4887	0,9464
MP+500 15% 0 Gauss	1,8	5,63E-03	1,276	0,9988
MP+500 15% 50 Gauss	2,171	0,1046	0,8432	0,9997
MP+500 15% 100 Gauss	3,445	1,904	0,4922	0,9942
MP+500 15% 300 Gauss	-77,84	56,73	0,1886	0,9995
MP+500 15% 600 Gauss	812,1	-	-0,5659	0,9173
MP+500 15% 600 Gauss	2,85E+03	-	-0,4251	0,9704

MP+635 15% 0 Gauss	2,128	0,01307	1,209	0,9998
MP+635 15% 50 Gauss	6,729	0,1023	0,9079	0,9996
MP+635 15% 100 Gauss	16,54	0,4648	0,7334	0,9995
MP+635 15% 300 Gauss	-280,9	239,4	0,1059	1
MP+635 15% 600 Gauss	1,73E+03	-	-0,09763	0,9202
MP+635 15% 1200 Gauss	2,42E+03	-1,39E-03	1,862	0,748
MP-635 15% 0 Gauss	3,297	0,0581	0,9892	0,9997
MP-635 15% 50 Gauss	23,28	0,1805	0,8485	0,9989
MP-635 15% 100 Gauss	33	0,4759	0,74	0,9987
MP-635 15% 300 Gauss	102,7	0,3544	0,8129	0,9974
MP-635 15% 600 Gauss	333,6	3,623	0,579	0,9738
MP-635 15% 1200 Gauss	914,8	2,17E+03	-0,6177	0,7336