

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO (II COHORTE)

TEMA: “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS MRF-140CG PARA DETERMINAR SU RESISTENCIA AL FLUJO BAJO LA APLICACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE INTENSIDAD VARIABLE”

Trabajo de Investigación, previo a la obtención del Grado Académico de Magister
en Diseño Mecánico

AUTOR: Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg.

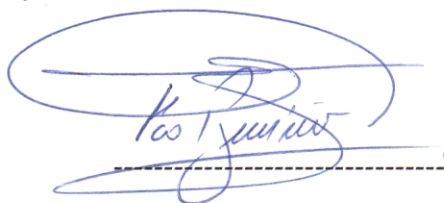
TUTOR: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

Ambato – Ecuador

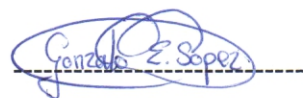
2017

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

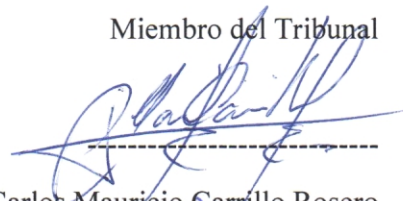
El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ing. Mg. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, e integrado por los señores: Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís, Ing. Mg. Carlos Mauricio Carrillo Rosero, Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG para determinar su resistencia al flujo bajo la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable”, elaborado y presentado por el señor Ing. Oscar Bladimir Arteaga López para optar por el Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



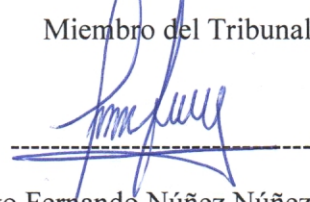
Ing. Mg. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes
Presidente del Tribunal



Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís
Miembro del Tribunal



Ing. Mg. Carlos Mauricio Carrillo Rosero
Miembro del Tribunal



Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez
Miembro del Tribunal

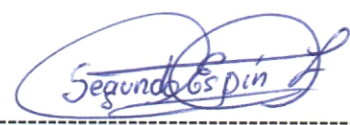
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación presentado con el tema: “Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG para determinar su resistencia al flujo bajo la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg., Autor bajo la Dirección de Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg., Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg.
c.c.1802379261

AUTOR



Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.
c.c.0501500771

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'O. Arteaga', is written over a horizontal dashed line.

Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg.

c.c. 1802379261

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Portada.....	i
A la Unidad Académica de Titulación.....	ii
Autoría del trabajo de investigación.....	iii
Derechos de autor.....	iv
Índice general de contenidos.....	v
Agradecimiento.....	xiii
Dedicatoria.....	xiv
Resumen	xv
Abstrac.....	xvi
Introducción.....	1
CAPÍTULO I.....	2
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1 Tema.....	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.2.1 Contextualización.....	2
1.2.2 Análisis Crítico	4
1.2.3 Prognosis.....	5
1.2.4 Formulación del Problema	6
1.2.5 Preguntas Directrices	6
1.2.6 Delimitación del Problema.....	6
1.2.6.1 Delimitación de Contenido	6
1.2.6.2 Delimitación Espacial	6
1.2.6.3 Delimitación Temporal	7
1.3 Justificación.....	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo General	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes Investigativos.....	9
2.2 Fundamentación Filosófica	11

2.3 Fundamentación Legal	12
2.4 Fundamento Teórico	12
2.4.1 Materiales Inteligentes	12
2.4.1.1 Los Fluidos Magnetoreológicos	14
2.4.1.2 Los Materiales Piezoeléctricos	15
2.4.1.3 Las Aleaciones con Memoria de Forma	16
2.4.2 Fluidos Magnetoreológicos	18
2.4.2.1 Introducción	18
2.4.2.2 Composición de los MRF	19
2.4.3 Propiedades de los MRF	21
2.4.3.1 Viscosidad	22
2.4.3.2 Resistencia a la Fluencia por Cizallamiento	22
2.4.3.3 Resistencia Viscosa	23
2.4.3.4 Permeabilidad Magnética	24
2.4.3.5 Propiedades del Fluido MRF-140CG	25
2.4.4 Modos de Operación de los MRF	26
2.4.4.1 Modo de Válvula	26
2.4.4.2 Modo de Corte Directo	29
2.4.4.3 Modo de Aplastamiento	30
2.4.5 Fundamentos de la Mecánica de Fluidos	30
2.4.5.1 Introducción	30
2.4.5.2 Fluido	31
2.4.5.3 Viscosidad	32
2.4.5.4 Fluidos Newtonianos	34
2.4.5.5 Fluidos No-Newtonianos	35
2.4.6 Campo Magnético	36
2.4.6.1 Campo Magnético en un Alambre Recto	37
2.4.6.2 Campo Magnético en un Solenoide	38
2.4.6.3 Materiales Magnéticos	39
2.4.7 Resistencia al Flujo	42
2.4.7.1 Introducción	42
2.4.7.2 Modelos para los MRF	43
2.5 Categorías Fundamentales	47
2.6 Hipótesis	48
2.7 Señalamiento de Variables	48
2.7.1 Variable Independiente	48

2.7.2 Variable Dependiente.....	48
2.7.3 Término de Relación.....	48
CAPÍTULO III.....	49
METODOLOGÍA	49
3.1 Enfoque	49
3.2 Modalidad Básica de la Investigación.....	49
3.2.1 Documental	49
3.2.2 Bibliográfica.....	50
3.2.3 De Campo	50
3.3 Nivel o Tipo de Investigación.....	50
3.3.1 Descriptivo	50
3.3.2 Experimental	50
3.3.3 Asociación de variables.....	51
3.4 Población y Muestra.....	51
3.4.1 Población.....	51
3.4.2 Muestra.....	51
3.5 Operacionalización de Variables.....	52
3.5.1 Variable Independiente: Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG	52
3.5.2 Variable Dependiente: Resistencia al flujo bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable	53
3.6 Recolección de la Información.....	54
3.6.1 Información para Determinar las Propiedades del Fluido MRF-140CG	54
3.6.2 Información para Seleccionar el Modelo Dinámico	58
3.6.3 Información para Evaluar la Resistencia al Flujo del MRF-140CG	60
3.7 Procesamiento y Análisis de la Información.....	60
3.7.1 Plan de Procesamiento	60
3.7.2 Plan de Análisis e Interpretación de Resultados	60
CAPÍTULO IV.....	62
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	62
4.1 Resultados de las Propiedades del Fluido MRF-140CG.....	62
4.1.1 Resultados para la Viscosidad Aparente	62
4.1.2 Resultados para la Viscosidad Plástica y el Esfuerzo Cortante	70
4.2 Resultados del Modelo Dinámico	77
4.2.1 Resultados para el Modelo Empírico	77
4.2.2 Resultados para el Modelo Plástico de Bingham.....	79

4.2.3 Resultados para el Modelo Bi-Viscoso	83
4.2.4 Resultados para el Modelo de Herschel–Bulkley	88
4.3 Resultados de la Resistencia al Flujo	92
4.4 Verificación de la Hipótesis	93
CAPÍTULO V	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1 Conclusiones	96
5.2 Recomendaciones.....	98
CAPÍTULO VI.....	99
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	99
6.1 Tema.....	99
6.2 Antecedentes de la Propuesta.....	99
6.3 Justificación.....	100
6.4 Objetivos	103
6.4.1 Objetivo General	103
6.4.2 Objetivos Específicos.....	103
6.5 Análisis de Factibilidad.....	103
6.6 Fundamentación	104
6.6.1 Parámetros Funcionales de los Amortiguadores Magnetoreológicos	104
6.6.2 Ciclo de Marcha Humana.....	108
6.7 Metodología	109
6.7.1 Parámetros de Diseño.....	109
6.7.2 Dimensionamiento del Amortiguador Magnetoreológico	109
6.7.3 Cálculo de las cargas que actúa en el cilindro.....	113
6.7.4 Diseño del Solenoide para Inducir el Campo Magnético.....	115
6.7.5 Diseño de los Componentes Mecánicos del Amortiguador	120
6.7.5.1 Diseño del Pistón	120
6.7.5.2 Diseño del Cilindro	122
6.7.5.3 Diseño del Vástago	125
6.8 Administración.....	128
BIBLIOGRAFÍA	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Efectos piezoeléctricos directo e inverso	15
Figura 2.2. Mecanismo del efecto memoria de forma	17
Figura 2.3. Comportamiento de los MRF en ausencia y presencia de campo magnético	18
Figura 2.4. Resistencia a la fluencia típica de varios MRF a base de aceite.....	23
Figura 2.5. Típica curva $B - H$ para varios MRF comerciales	24
Figura 2.6. Modos de operación de los MRF	26
Figura 2.7. Principio de funcionamiento de los MRF en modo de válvula.	27
Figura 2.8. Funcionamiento de los MRF en modo de válvula.....	28
Figura 2.9. Funcionamiento de los MRF en modo de corte directo.....	29
Figura 2.10. Deformación de un bloque colocado entre dos placas paralelas	31
Figura 2.11. Esfuerzo normal y cortante en la superficie de un fluido	32
Figura 2.12. Comportamiento del flujo de fluido entre dos placas paralelas.....	33
Figura 2.13. Comportamiento reológico de varios fluidos.	34
Figura 2.14. Curvas de fluidez y de viscosidad para fluidos newtonianos	35
Figura 2.15. Campo magnético en un imán permanente.....	37
Figura 2.16. Campo magnético en un alambre largo recto	38
Figura 2.17. Líneas de campo magnético para un solenoide	38
Figura 2.18. Diferencia entre solenoide en vacío y con núcleo	41
Figura 2.19. Efecto de la permeabilidad del material del núcleo sobre B	41
Figura 2.20. Condición de no-deslizamiento en un fluido en movimiento.....	42
Figura 2.21. Comportamiento de MRF en un modelo idealizado Bingham	45
Figura 2.22. Comportamiento de los MRF en un modelo bi-viscoso	46
Figura 2.23. Comportamiento de MRF en un modelo de Herschel-Bulkley	47
Figura 2.24. Red de categorías fundamentales.....	47
Figura 3.1. Sistema para baño termostático Julabo F-25.	55
Figura 3.2. Reómetro rotacional Anton Paar Physica MCR-501 equipado con célula magnetoreológica.	56
Figura 3.3. Célula magnetoreológica MRD-70/1Text	57
Figura 3.4. Banco de pruebas para amortiguadores Dyno-Shock 11.....	59
Figura 4.1. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a $0\ T$	62
Figura 4.2. Viscosidad aparente en función de la temperatura a $0\ T$	63
Figura 4.3. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a $200\ mT$...64	
Figura 4.4. Viscosidad aparente en función de la temperatura a $200\ mT$	64

Figura 4.5. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 400 mT...	65
Figura 4.6. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 400 mT.	66
Figura 4.7. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 600 mT...	66
Figura 4.8. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 600 mT.	67
Figura 4.9. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 800 mT...	68
Figura 4.10. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 800 mT.	68
Figura 4.11. Viscosidad aparente promedio en función del campo magnético.	69
Figura 4.12. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 0 T.	70
Figura 4.13. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 0 T.	71
Figura 4.14. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 200 mT.	71
Figura 4.15. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 200 mT.	72
Figura 4.16. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 400 mT.	73
Figura 4.17. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 400 mT.	73
Figura 4.18. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 600 mT.	74
Figura 4.19. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 600 mT.	75
Figura 4.20. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 800 mT.	75
Figura 4.21. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 800 mT.	76
Figura 4.22. Esfuerzo cortante promedio en función del campo magnético.....	77
Figura 4.23. Recta y ecuación de regresión lineal para 200 mT.	79
Figura 4.24. Recta y ecuación de regresión lineal para 400 mT.	80
Figura 4.25. Recta y ecuación de regresión lineal para 600 mT.	80
Figura 4.26. Recta y ecuación de regresión lineal para 800 mT.	81
Figura 4.27. Regresión lineal en la zona elástica a 200 mT.....	83
Figura 4.28. Regresión lineal en la zona viscosa a 200 mT.....	84
Figura 4.29. Regresión lineal en la zona elástica a 400 mT.....	84
Figura 4.30. Regresión lineal en la zona viscosa a 400 mT.....	84
Figura 4.31. Regresión lineal en la zona elástica a 600 mT.....	85
Figura 4.32. Regresión lineal en la zona viscosa a 600 mT.....	85
Figura 4.33. Regresión lineal en la zona elástica a 800 mT.....	85
Figura 4.34. Regresión lineal en la zona viscosa a 800 mT.....	86
Figura 4.35. Curva de tendencia potencial ajustada para 200 mT.	88
Figura 4.36. Curva de tendencia potencial ajustada para 400 mT.	89
Figura 4.37. Curva de tendencia potencial ajustada para 600 mT.	89
Figura 4.38. Curva de tendencia potencial ajustada para 800 mT.	90
Figura 4.39. Porcentaje de error promedio de los modelos para MRF.	92

Figura 4.40. Resistencia al flujo del fluido MRF-140CG en función del campo magnético.	93
Figura 4.41. Verificación de la hipótesis de la investigación.	95
Figura 6.1. Componentes principales de un amortiguador magnetoreológico.....	104
Figura 6.2. Descomposición de fuerza en los amortiguadores magnetoreológicos	105
Figura 6.3. Relación entre el espesor del canal de flujo, el rango dinámico y la fuerza controlable.....	106
Figura 6.4. Cilindro magnetoreológico: (a) pistón de una etapa; (b) pistón de dos etapas.....	107
Figura 6.5. Ciclo normal de marcha y ciclo de marcha con prótesis	108
Figura 6.6. Geometría propuesta para el amortiguador magnetoreológico.....	110
Figura 6.7. Corte transversal del solenoide.....	117
Figura 6.8. Condiciones de frontera para al análisis de electromagnetismo.....	118
Figura 6.9. Distribución y dirección del campo magnético en el plano YZ.	119
Figura 6.10. Distribución y dirección del campo magnético en 3D.....	119
Figura 6.11. Condiciones de frontera en el pistón del amortiguador.	120
Figura 6.12. Características del mallado del pistón.	121
Figura 6.13. Distribución de esfuerzos en el pistón.	121
Figura 6.14. Distribución del factor de seguridad en el pistón.	122
Figura 6.15. Condiciones de frontera en el cilindro del amortiguador.	123
Figura 6.16. Características del mallado del cilindro.....	123
Figura 6.17. Distribución de esfuerzos en el cilindro.	124
Figura 6.18. Distribución del factor de seguridad en el cilindro.....	124
Figura 6.19. Vástago del amortiguador.....	125
Figura 6.20. Ensamblaje del prototipo de amortiguador magnetoreológico.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de materiales inteligentes en función del estímulo y respuesta.....	13
Tabla 2.2. Propiedades de MRF comerciales a base de aceite	25
Tabla 3.1. Operacionalización de la variable independiente.....	52
Tabla 3.2. Operacionalización de la variable dependiente.....	53
Tabla 3.3. Prueba a velocidad fija.....	59
Tabla 3.4. Prueba a velocidad variable	59
Tabla 4.1. Resultados para el modelo empírico de Dr. Dave.....	78
Tabla 4.2. Resultados para el modelo plástico de Bingham.	82
Tabla 4.3. Resultados para el modelo Bi-viscoso.	87
Tabla 4.4. Resultados para el modelo de Herschel–Bulkley.....	91
Tabla 6.1. Costos de los ensayos de laboratorio.	128
Tabla 6.2. Costos para la construcción del amortiguador magnetoreológico.	129

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a las autoridades y docentes de la Maestría de Diseño Mecánico de la Universidad Técnica de Ambato, quienes con su profesionalismo y don de gente nos supieron encaminar para cumplir los objetivos propuestos.

A mi tutor, Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, por su acertada dirección para culminar con éxito el presente proyecto y por su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme vida, salud y la oportunidad de seguir siempre adelante, ya que sin sus bendiciones nada de esto sería posible.

A mi esposa Liliana, por su amor y compañía en todos los instantes de mi vida, por su apoyo y comprensión incondicional en la realización de este proyecto y además por compartir conmigo los momentos más felices y más tristes de mi vida.

A mis padres y hermanos, por su esfuerzo y sacrificio, por el ejemplo que me han dado, por el apoyo y amor que siempre me han brindado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

TEMA:

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS FLUIDOS
MAGNETOREOLÓGICOS MRF-140CG PARA DETERMINAR SU
RESISTENCIA AL FLUJO BAJO LA APLICACIÓN DE CAMPOS
MAGNÉTICOS DE INTENSIDAD VARIABLE”

AUTOR: Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg.

DIRECTOR: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

FECHA: 22 de septiembre del 2017

RESUMEN

En la investigación se evalúa en qué medida se alteran las propiedades de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG conforme aumenta la intensidad del campo magnético, para así predecir su comportamiento en dispositivos que utilizan dichos materiales, aportando con ello al diseño de dispositivos mecánicos inteligentes, cada vez más sofisticados, fiables y eficientes, acorde a cada necesidad. Para medir las propiedades del fluido MRF-140CG se utilizó un reómetro rotacional Anton Paar Physica MCR-501 equipado con una célula magnetoreológica MRD-70/1Text. De los resultados de la investigación se determinó que el modelo plástico de Bingham es el que predice con mayor precisión el comportamiento dinámico del fluido MRF-140CG, con un porcentaje de error promedio cercano al 4%, demostrando que en ausencia de campo magnético la viscosidad del fluido disminuye a medida que aumenta la temperatura, mientras que; bajo la acción de un campo magnético, la resistencia al flujo del fluido aumenta con la intensidad del campo, alcanzando un valor máximo de 42,014 kPa a 800 mT.

Descriptores: Materiales inteligentes, Fluidos magnetoreológicos, MRF-140CG, Resistencia al flujo, Campo magnético.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
POSTGRADUATE CENTER
MECHANICAL DESIGN MASTER DEGREE PROGRAM

THEME:

“STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF MRF-140CG MAGNETO-
RHEOLOGICAL FLUIDS TO DETERMINE ITS RESISTANCE TO FLOW
UNDER THE APPLICATION OF MAGNETIC FIELDS OF VARIABLE
INTENSITY”

AUTHOR: Ing. Oscar Bladimir Arteaga López, Mg.

TUTOR: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

DATE: September 22th, 2017

ABSTRACT

The research assesses the extent to which the properties of MRF-140CG magneto-rheological fluids are altered as the intensity of the magnetic field increases, in order to predict their behavior in devices that use these materials, thus contributing to the design of intelligent mechanical devices, each more sophisticated, reliable and efficient, according to each need. To measure the properties of the MRF-140CG fluid, a Anton Paar Physica MCR-501 rotational rheometer equipped with a MRD-70 / 1Text magneto-rheological cell was used. From the results of the investigation, it was determined that Bingham's plastic model predicts the dynamic behavior of the MRF-140CG fluid with greater precision compared with others, with an average error rate close to 4%, demonstrating that in the absence of magnetic field the viscosity of the fluid decreases as the temperature increases, whilst under the action of a magnetic field, the resistance to the flow of the fluid increases with the intensity of the field, reaching a maximum value of 42.014 kPa at 800 mT.

Keywords: Smart materials, Magneto-rheological fluids, MRF-140CG, Resistance to flow, Magnetic field.

INTRODUCCIÓN

En el trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación, denominado “Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG para determinar su resistencia al flujo bajo la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable” es de mucha importancia para predecir el comportamiento de estos materiales bajo la acción de un campo magnético específico y así optimizar el diseño de dispositivos inteligentes y prótesis robóticas.

La investigación fue desarrollada en los Laboratorios del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mediante ensayos en el reómetro rotacional Anton Paar Physica MCR-501, de acuerdo con lo que establece la norma DIN-53018.

En el capítulo I, se analiza el Problema de Investigación desde: contextualización, análisis crítico, prognosis, formulación del problema, preguntas directrices, delimitación del problema, justificación y el planteamiento de los objetivos.

En el capítulo II, se conforma el Marco Teórico para sustentar el trabajo de investigación, se elabora: los antecedentes, el fundamento teórico, fundamentación filosófica y legal, las categorías fundamentales, la hipótesis y el señalamiento de las variables.

En el capítulo III, se explica la Metodología a seguir en el proceso de investigación y está conformado por: enfoque, modalidad básica de investigación, población y muestra, operacionalización de variables, plan de recolección de datos y el plan de procesamiento de la información.

En el capítulo IV, se Analizan e Interpretan los Resultados de la investigación, el capítulo está compuesto por: recolección de datos preliminares, análisis de las propiedades de los MRF, análisis de los modelos dinámicos, determinación de la resistencia al flujo y verificación de la hipótesis.

Por último, en el capítulo V, se generan las Conclusiones y Recomendaciones del trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Tema

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS MRF-140CG PARA DETERMINAR SU RESISTENCIA AL FLUJO BAJO LA APLICACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE INTENSIDAD VARIABLE”

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Contextualización

En los últimos años, en los centros de investigación de varias universidades y empresas a nivel mundial, se realizan investigaciones con el propósito de desarrollar materiales funcionales avanzados para su uso en aplicaciones de ingeniería. Una categoría de estos materiales avanzados que está experimentando actualmente procesos de investigación extensivos es la de los llamados “materiales inteligentes”.

Los materiales inteligentes son aquellos que tiene la capacidad de convertir un tipo de energía en otro, debido a que una o varias de sus propiedades pueden ser modificadas de manera controlada, como respuesta a estímulos externos diferentes, tales como: la temperatura, los campos magnéticos o eléctricos, la humedad, etc. Cada tipo de material inteligente tiene una propiedad diferente que puede ser alterada (forma, color, viscosidad, resistencia, etc.), y de esta depende el tipo de aplicación que se le puede dar al material [1].

Existen una gran diversidad de materiales inteligentes, entre los que se incluyen los materiales piezoeléctricos, que convierten la energía mecánica en electricidad; los

fluidos magnetoreológicos, cuyas propiedades son controladas mediante la aplicación de campos magnéticos; las aleaciones con memoria de forma, que responden mecánicamente al calor aplicado, etc. Se destacan los fluidos magnetoreológicos debido a su gran potencial para ser aplicados en diversos campos de la ingeniería como son: dispositivos biomecánicos, prótesis inteligentes, exoesqueletos robóticos, sistemas de amortiguamiento para vehículos y para construcciones civiles, etc.

Es así que, el estudio de los fluidos magnetoreológicos y sus potenciales aplicaciones constituyen una nueva área en expansión de la investigación científica, que tiene como propósito garantizar en un futuro inmediato una serie de avances e innovaciones tecnológicas que permitan utilizar dichos fluidos en dispositivos inteligentes que mejoren la calidad de vida de las personas. Sin embargo, todas las aplicaciones de los fluidos magnetoreológicos requieren un conocimiento profundo de sus propiedades y de cómo se comportan ante estímulos externos, con el fin de estudiar y determinar las variables que influyen sobre sus características, los atributos que poseen, su velocidad de respuesta, etc., para así predecir su comportamiento y ajustarlos a la medida de cada aplicación.

La Corporación Lord en Carolina del Norte - Estados Unidos, desarrolla y comercializa varios tipos de fluidos magnetoreológicos como el MRF-140CG; así como también varios tipos de dispositivos que contienen estos fluidos como: amortiguadores, frenos y embragues, pero no siempre estos dispositivos se ajustan a todas las aplicaciones de ingeniería [2]. Además, la Corporación Lord no proporciona la información completa de todas las propiedades que se requieren para diseñar dispositivos mecánicos utilizando estos fluidos, ni tampoco los datos necesarios para conocer en qué medida se alteran dichas propiedades, cuando se someten a la acción de campos magnéticos de intensidad variable. Por lo tanto, se desconoce cómo inciden estas variables en la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos.

A nivel de Latinoamérica se han publicado varias investigaciones realizadas por Universidades de México, Colombia y Chile, relacionadas con la obtención y

aplicación de los fluidos magnetoreológicos. Varias de estas investigaciones se enfocan en desarrollar sus propios fluidos magnetoreológicos y estudiar su comportamiento para determinar si satisfacen los diferentes requerimientos de amortiguación en automóviles y motocicletas con diferentes propósitos de conducción. Sin embargo, muchos de estos fluidos presentan normalmente problemas de sedimentación y estabilidad, no tienen una composición homogénea, no alcanza los niveles de rendimiento de los fluidos comerciales y son difíciles de replicar para utilizarlos en diferentes tipos de aplicaciones.

En el Ecuador, en años recientes se han desarrollado, en algunas instituciones de educación superior, proyectos de investigación relacionados con la aplicación de los fluidos magnetoreológicos en el diseño de sistemas de ingeniería, principalmente en el campo automotriz, pero se ha dejado de lado el estudio de sus propiedades y la caracterización de los mismos, de manera que no existe la información suficiente para garantizar que el fluido seleccionado es el que mejor se ajusta a los requerimientos de una aplicación específica, ni tampoco para predecir su comportamiento cuando se incorporan en cierto dispositivo mecánico.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en coordinación con otras Universidades de país, como la Universidad Técnica de Ambato y la Escuela Politécnica Nacional, pretenden realizar proyectos de investigación que involucran la utilización de fluidos magnetoreológicos para el desarrollo de prótesis inteligentes y exoesqueletos robóticos, sin embargo, no se dispone de la información suficiente para determinar qué tipo de fluido magnetoreológico tendrá un mejor comportamiento en dichas aplicaciones y bajo qué condiciones externas deben trabajar.

1.2.2 Análisis Crítico

Varios dispositivos de uso cotidiano ya están incorporando materiales inteligentes en su fabricación y el número de aplicaciones para ellos está creciendo de manera constante en los diferentes campos de la ingeniería. Por esta razón, la aplicación de los materiales inteligentes en general y los fluidos magnetoreológicos en particular, adquieren cada día mayor importancia, principalmente debido a que estos pueden

realizar las funciones de varias piezas en forma simultánea, simplificando de este modo su diseño, al mismo tiempo que aumenta su confiabilidad, ya que tienen menos piezas que se pueden romper o desgastarse.

Por otro lado, para garantizar que los fluidos magnetoreológicos respondan a la velocidad requerida y presenten un comportamiento adecuado, acorde a las necesidades de cada aplicación, es necesario un conocimiento exhaustivo de todas sus propiedades y un estudio de su comportamiento ante los diferentes estímulos externos, en especial cuando se van a utilizar en dispositivos de tecnología avanzada como prótesis robóticas y exoesqueletos, donde los espacios disponibles son reducidos y se exige una respuesta rápida y precisa.

Con el estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable, se pretende evaluar en qué medida se alteran sus propiedades mecánicas conforme se varía el campo magnético, para así poder predecir su comportamiento dentro de los dispositivos que se desarrollen utilizando estos materiales, aportando con ello al diseño de sistemas mecánicos cada vez más sofisticados, fiables y eficientes, acorde a cada necesidad.

1.2.3 Prognosis

La aplicación eficiente de los nuevos materiales requiere de un conocimiento profundo de todas sus propiedades con el fin de aprovechar adecuadamente sus características y ventajas. Por lo tanto, si no se realiza el estudio de cómo las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG inciden en su resistencia al flujo cuando se someten a diferentes campos magnéticos, no se generará la información necesaria para determinar cuál es su comportamiento y cuál es su área de aplicación específica, originando con ello problemas al momento de utilizar estos materiales en el diseño de cualquier dispositivo mecánico, debido a que no responderán de la manera esperada y tampoco se adaptarán a los requerimientos específicos de cada aplicación, lo que ocasiona pérdida de tiempo y de recursos en el desarrollo de varios prototipos de un dispositivo hasta determinar su diseño óptimo.

1.2.4 Formulación del Problema

¿Cómo inciden en la resistencia al flujo las propiedades de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG que se alteran bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable?

1.2.5 Preguntas Directrices

¿Cómo se pueden medir las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG que se alteran bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable?

¿Cuál es el modelo dinámico que mejor predice el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG cuando se encuentran bajo la influencia de un campo magnético externo?

¿Cómo influyen las diferentes intensidades de campo magnético en la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG?

¿Cómo diseñar un dispositivo mecánico que aproveche las propiedades de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG?

1.2.6 Delimitación del Problema

1.2.6.1 Delimitación de Contenido

El estudio realizado se encuentra enmarcado dentro de las líneas de investigación de la Maestría de Diseño Mecánico en el área de los Materiales Inteligentes y su aplicación para el diseño de dispositivos mecánicos inteligentes. Las asignaturas que están relacionadas con el tema de investigación son: Materiales para Ingeniería, Diseño de Productos, Diseño por Elemento Finito, Diseño Mecánico de Equipos, Fiabilidad de Sistemas Mecánicos

1.2.6.2 Delimitación Espacial

La investigación necesaria para el desarrollo del tema propuesto se realizó en:

- Laboratorios del Departamento de Energía y Mecánica de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Laboratorio del Departamento de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea - España.
- Laboratorios del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico y Carrocero de Tungurahua.

1.2.6.3 Delimitación Temporal

La presente investigación fue desarrollada en el periodo comprendido desde mayo del 2017 hasta septiembre del 2017.

1.3 Justificación

Las variables responsables de las características de los fluidos magnetoreológicos son varias y muy diferentes: el tipo de partícula, así como el tamaño, geometría y cantidad utilizada; el fluido portador, que tiene una influencia importante en la viscosidad del fluido y en la sedimentación de las partículas; y los diferentes aditivos añadidos para el control de variables tales como sedimentación, viscosidad, velocidad de respuesta y estabilización del fluido. Por lo tanto, el estudio de estas características y su influencia sobre la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG, es importante para predecir el comportamiento de estos materiales bajo la acción de un campo magnético específico y ajustarlos a la medida de las aplicaciones.

También fue importante realizar la presente investigación debido a que en nuestro país no se ha desarrollado ningún estudio acerca de la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG, por lo que, esta investigación es novedosa y es un aporte bibliográfico para el diseño de cualquier dispositivo mecánico que utilice este tipo de material.

Fue factible desarrollar el presente estudio ya que se cuenta con los conocimientos y recursos necesarios (materiales, equipos de medición, laboratorios, etc.) para

poder ejecutar de manera adecuada las diferentes etapas y actividades que involucra el presente trabajo de investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG para determinar su resistencia al flujo bajo la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Medir mediante procedimientos normalizados las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG que se alteran bajo la acción de campos magnéticos de diferentes intensidades.
- Determinar el modelo dinámico que predice de forma más precisa el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG bajo la acción de un campo magnético.
- Evaluar la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG cuando se encuentran bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable.
- Proponer el diseño de un prototipo de dispositivo mecánico que aproveche de forma óptima las propiedades de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos

Los trabajos y estudios previos más relevantes que tienen relación con el tema en estudio se describen a continuación:

S. Premalatha, R. Chokkalingam y M. Mahendran (2012), en el artículo científico publicado por American Journal of Polymer Science en USA, titulado: “Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids”, analizan el comportamiento de flujo de los fluidos magnetoreológicos (MRF) en términos de su estructura interna, estabilidad y propiedades magneto-mecánicas. Obtienen la tensión elástica de cada uno de los MRF, establecen que el esfuerzo cortante aumenta con la deformación por cizallamiento y que el fluido presenta un comportamiento no newtoniano en ausencia de campo magnético. Concluyen que el comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento se observa en los datos de resistencia viscosa y de barrido magnético. Determinan además que los valores del módulo de almacenamiento y módulo de pérdida también aumentan, lo que indica propiedades elásticas muy fuertes [3].

B. K. Kumbhar, S. R. Patil y S. M. Sawant (2015), en el artículo científico publicado por Elsevier del Engineering Science and Technology Journal en USA, titulado: “Synthesis and characterization of magneto-rheological (MR) fluids for MR brake application”, sintetizan varias muestras de MRF con diferentes composiciones para identificar cuál es más adecuada para aplicaciones de frenado. En base a los resultados de síntesis y caracterización y mediante el análisis cualitativo de varias muestras de MRF, determinan cuales no cumplen con los requisitos para aplicación de frenado, pero pueden usarse en aplicaciones de bajo esfuerzo elástico. También establecen que la diferencia entre las viscosidades de las muestras examinadas es

muy pequeña cuando no se aplica campo magnético, sin embargo, la resistencia de cizallamiento es significativa en presencia de campo magnético [4].

C. Molina, M. Ardila, y A. Hernández (2014), en el artículo científico publicado por Ingenio Magno en Colombia, titulado: “Modelling of magnetorheological fluid produced by mineral magnetite”, establece la correlación entre los resultados del cambio de densidad de un MRF expuesto a un campo magnético de intensidad variable, mediante los resultados de la simulación por elementos finitos en ANSYS. A nivel de laboratorio prepararon varias muestras de MRF y realizaron pruebas de variación de la densidad en función de la intensidad de un campo magnético. La correlación entre los resultados de las pruebas de laboratorio y los resultados de la simulación, fue de 0,92: lo cual indica que la predicción del comportamiento de los MRF, es un procedimiento confiable [5].

Y. Sato, K. Sunakoda, H. Sodeyama y K. Hiramoto (2013), en el artículo científico publicado por la IEEE Xplore de la SICE Annual Conference en Japón, titulado: “Investigation on the detailed resistance force of MRF damper”, presentan el estudio realizado a un amortiguador de MRF y establecen los métodos para calcular la fuerza de amortiguación generada por la resistencia al flujo de los MRF, utilizando las teorías de fluido newtoniano y el modelo de Bingham que se extrae a partir de la ecuación de Buckingham-Reiner. También analizan las propiedades dinámicas del MRF aplicando un desplazamiento de entrada sinusoidal y cambiando el diámetro del orificio. Miden las relaciones velocidad-fuerza y energía de disipación-frecuencia, para finalmente comparar las fuerzas de resistencia al flujo obtenidas de forma analítica con los resultados experimentales, concluyendo que son semejantes [6].

M. Mrokowska, P. Rowinski, y M. Kalinowska (2015), en el artículo científico publicado por Hydrology Earth System Sciences en Polonia, titulado: “A methodological approach of estimating resistance to flow under unsteady flow conditions”, realizan una evaluación y análisis de los parámetros de resistencia al flujo bajo condiciones inestable y proponen una metodología para mejorar la evaluación de la resistencia al flujo. Además del análisis crítico de los métodos

existentes presentan nuevos enfoques y establecen ecuaciones para determinar los parámetros de resistencia para diferentes tipos de canal [7].

C. D. Mesquida y J. L. Lässig (2014), en el artículo publicado por la Asociación Argentina de Mecánica Computacional, titulado: “Solución numérica de la ecuación constitutiva para fluidos magnetoreológicos”, presentan la metodología de Dorfmann para la obtención de expresiones no lineales y tridimensionales que relacionen los esfuerzos con la deformación de los MRF. El estudio plantea la resolución de un caso particular de flujo de Couette circunferencial, viscoso, laminar y estacionario, con campo magnético radial. Con la solución determinan el perfil de velocidades para los distintos valores del campo magnético aplicado y concluyen que el incremento del campo magnético resulta en perfiles de velocidad más aplanados, notándose un incremento en la viscosidad del fluido y por ende menores velocidades [8].

2.2 Fundamentación Filosófica

La presente investigación se fundamentó en el paradigma crítico propositivo, ya que las características de este paradigma permiten ser flexibles en cuanto a consideraciones de diseño y métodos de elaboración que influyen en la presente investigación, proporcionando una mejor comprensión acerca del comportamiento de los MRF cuando se aplica un campo magnético.

Además, la investigación permitió una correcta interpretación, comprensión y explicación de las variables relacionadas con el objeto de estudio, para así considerar las cualidades más no las cantidades que en el desarrollo de dicha investigación se encontraron durante el transcurso investigativo del tema.

Mediante el paradigma propuesto se pudo plantear alternativas de solución al problema en desarrollo, abarcando enfoques cuantitativos y cualitativos para encontrar argumentaciones que permitieron verificar la hipótesis planteada del problema.

2.3 Fundamentación Legal

Para establecer el marco legal que siguió la presente investigación fue necesario mencionar las normas y estándares que tienen relación con el estudio:

- ASTM D7836 - Standard test methods for measurement of yield stress of paints, inks and related liquid materials.
- ASTM D1480 - Standard test method for density and relative density (specific gravity) of viscous materials by Bingham pycnometer.
- EN 3219 - Determination of viscosity of plastics, polymers, resins in the liquid state or as emulsions or dispersions using a rotational viscometer with defined shear rate
- DIN 13342 - Newtonian fluids and non-Newtonian liquids; concepts, rheological equations.
- DIN 53018 - Measurement of the dynamic viscosity of newtonian fluids with rotational viscometers.
- DIN 53019 - Viscometry: measurement of viscosities and flow curves by means of rotational viscometers, principles and geometry of measuring system.
- ISO 2954 - Vibración mecánica en maquinaria rotativa y alternativa – Requerimientos para los instrumentos de medida de la severidad de vibración
- ISO 2631-1 - Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de las exposiciones humanas a las vibraciones de cuerpo completo. Requisitos generales.

2.4 Fundamento Teórico

2.4.1 Materiales Inteligentes

Se denominan materiales inteligentes (*smart materials*) a aquellos que manifiestan un cambio en sus propiedades, su estructura, su composición o su forma, como respuesta a estímulos proveniente del ambiente en el que se encuentran. Estos

estímulos externos pueden ser: presión, temperatura, campos eléctricos o magnéticos, humedad, pH, imposición de una deformación mecánica, etc. [9]

Por lo tanto, los materiales inteligentes poseen la cualidad o capacidad de responder de modo controlable a los cambios producidos en el ambiente. Entre las propiedades que pueden ser modificadas están las propiedades mecánicas (dureza, flexibilidad, deformación, tensión, etc.), propiedades electromagnéticas (ferromagnéticos, paramagnéticos, etc.), propiedades térmicas (transiciones de fase), propiedades ópticas (transmisión de la luz), así como también, colorimetría, propiedades acústicas y propiedades químicas [10].

Todos los materiales inteligentes poseen en común la capacidad de convertir un tipo de energía en otro y los dos tipos principales de dispositivos de conversión de energía son los sensores y los actuadores, los cuales representan las más importantes aplicaciones de los materiales inteligentes. A pesar que no todos los expertos coinciden en cuáles deben ser los materiales que se incluyen en la clase de los inteligentes, la tabla 2.1 propone una clasificación para los materiales inteligentes más utilizados en aplicaciones comerciales.

Tabla 2.1. Clasificación de materiales inteligentes en función del estímulo y respuesta [11].

MATERIALES		ESTÍMULO	RESPUESTA
Termoeléctricos		Calor	Corriente eléctrica
Piezoeléctricos		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica
Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica
Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica
Magnetoreológicos	Elastómero MR	Campo Magnético	Viscosidad
	Fluido MR		
	Ferrofluido		
Electrereológicos	Elastómero ER	Campo Eléctrico	Viscosidad
	Fluido ER		
Materiales Memoria de Forma	Shape Memory Alloys, SMA	Temperatura	Deformación mecánica
	Polímeros SMA		
	Ferromagnéticos SMA, FSMA	Campo Magnético	

De estos materiales, los que tiene mayor aplicación en el diseño de dispositivos mecánicos inteligentes son:

- Los fluidos magnetoreológicos cuyas propiedades son controladas mediante la aplicación de campos magnéticos.
- Los materiales piezoeléctricos que convierten la energía mecánica en electricidad.
- Las aleaciones con memoria de forma que responden mecánicamente al calor aplicado.

2.4.1.1 Los Fluidos Magnetoreológicos

Los fluidos magnetoreológicos (MRF) son materiales que experimentan cambios drásticos en sus propiedades mecánicas cuando se encuentran bajo la influencia de un campo magnético externo. Estos cambios dependen directamente de la intensidad del campo magnético y son completamente reversibles, es decir recupera sus propiedades iniciales casi instantáneamente cuando se elimina el campo aplicado.

Los MRF consisten en tres componentes principales: partículas ferromagnéticas dispersas, un líquido portador y un estabilizador. Las partículas ferromagnéticas son de forma esférica y tamaño micrométrico. El líquido portador sirve como un medio aislante continuo y puede ser aceite hidrocarburo o aceite sintético de alta resistividad eléctrica y baja viscosidad. El estabilizador se utiliza para mantener las partículas suspendidas en el fluido [11].

Los MRF tienen gran interés debido a que proporcionan una interfaz de respuesta simple y rápida entre los controladores electrónicos y los sistemas mecánicos. A diferencia de otros materiales inteligentes, los MRF ya se han introducido con éxito en aplicaciones comerciales, gracias a que su resistencia a la fluencia puede ser controlado de forma rápida y precisa. En la actualidad el control de vibraciones es el campo de mayor aplicación de los MRF, en el desarrollo de sistemas de amortiguamiento activo, frenos, embragues, válvulas y dispositivos robóticos [12]. La gama de aplicaciones es enorme e indica su potencial para desarrollos futuros.

2.4.1.2 Los Materiales Piezoeléctricos

Estos materiales tienen dos propiedades especiales que están relacionadas entre sí: el efecto piezoeléctrico directo y el inverso. El primer efecto se produce cuando se ejerce una carga de compresión o expansión sobre el material y este genera una pequeña descarga eléctrica [9]. Esto se conoce como efecto piezoeléctrico directo (figura 2.1a). Lo contrario se produce cuando al material piezoeléctrico se le aplica un voltaje y este reacciona deformándose. Esto se conoce como efecto piezoeléctrico inverso (figura 2.1b). Este efecto es un proceso reversible, lo que implica que recupera su forma o polarización en cuanto se deja de ejercer la carga mecánica o el campo eléctrico [1].

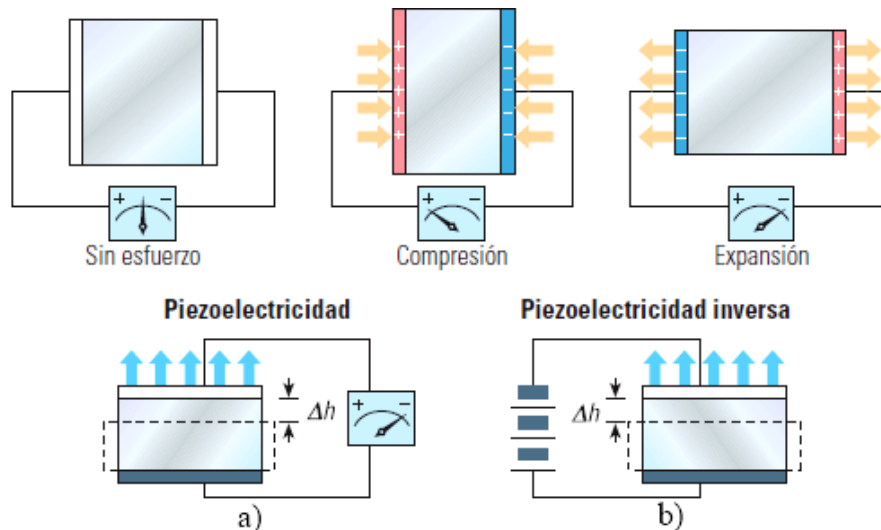


Figura 2.1. Efectos piezoeléctricos directo e inverso [1].

La piezoelectricidad inicialmente fue desarrollada en algunos polímeros naturales, como la queratina, el colágeno, algunos polipéptidos y algunos polímeros sintéticos. Sin embargo, en la actualidad, el tipo de material piezoeléctrico más utilizado son los cerámicos policristalinos, los cuales poseen un rango mucho más amplio de características útiles y funcionan bajo diferentes condiciones operativas.

La principal aplicación de los materiales piezoeléctricos es el desarrollo de sensores y actuadores electromecánicos inteligentes como: sensores para diversos parámetros físicos: fuerza, presión, movimiento, aceleración, impacto lateral, etc. Elementos piezoeléctricos también se instalan en los inyectores de combustible y

estos son capaces de proporcionar una respuesta rápida y precisa para controlar el volumen de inyección [13].

Otra aplicación de los sensores piezoeléctricos son las pinturas inteligentes. Este tipo de pintura utiliza polvo cerámico como pigmento y resina epóxica como aglomerante. La mezcla se aplica sobre una superficie y se polariza a temperatura ambiente. La película de pintura resultante actúa como un sensor de vibraciones y emisiones acústicas, de manera que la degradación estructural puede ser monitoreada, permitiendo una detección oportuna de fallas catastróficas en la industria aeroespacial y otras estructuras [14].

Las principales restricciones de los materiales piezoeléctricos (cerámicos) es la fragilidad, la fatiga y el envejecimiento. Sin embargo, investigaciones recientes han permitido desarrollar materiales compuestos piezoeléctricos que superan estas restricciones y son más durables.

2.4.1.3 Las Aleaciones con Memoria de Forma

La memoria de forma se define como la capacidad de un material para recuperar la forma original que tenía a una determinada temperatura incluso después de haber sufrido grandes deformaciones. Es decir, estos materiales, luego de ser deformados, recuperan su forma inicial cuando se les aplica calor por encima de la temperatura de transición [15]. El mecanismo que permite este comportamiento es la transformación de fase de austenita a martensita, gracias a un cambio de estructura cristalográfica sin difusión, es decir, un reacomodo de los átomos debido a una deformación por cizalladura sin migración de átomos [16].

Para grabar la forma original o “entrenar” una muestra para que “recuerde” dicha forma, la muestra debe recocerse a una alta temperatura mientras se la sostiene en una posición fija. Como se muestra en la figura 2.2, el calentamiento genera una fase inelástica, dura, de alta temperatura denominada austenita. El enfriamiento o descenso rápido de temperatura subsiguiente de la muestra, produce una fase elástica, más deformable, de baja temperatura, denominada martensita. Si la muestra entrenada se deforma y se somete al calor nuevamente, el movimiento

termal hace que los átomos formen la red de austenita, restituyendo de esta manera la forma original de la muestra.

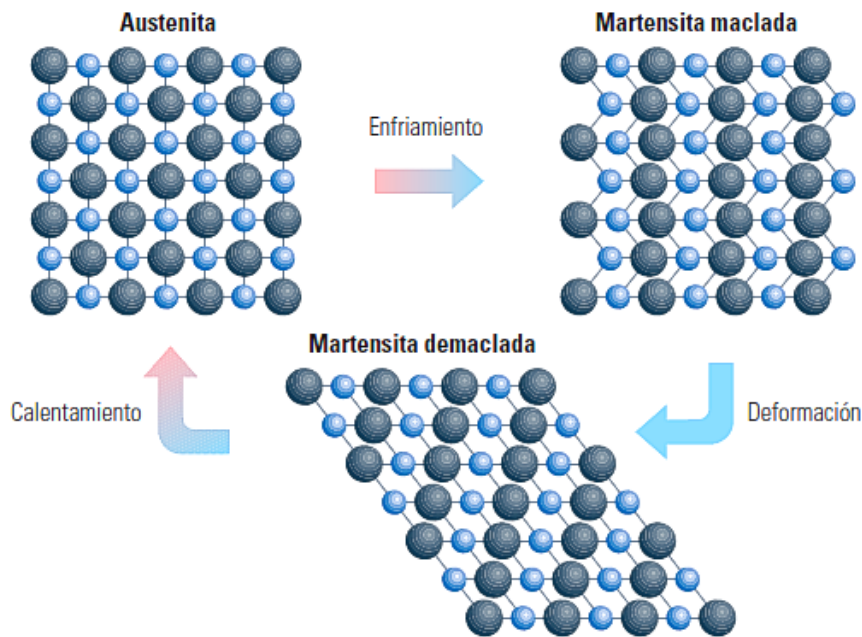


Figura 2.2. Mecanismo del efecto memoria de forma [1].

El procedimiento anterior describe el efecto conocido como efecto de memoria de forma simple (de una sola vía), en el que el material recuerda una sola forma. Sin embargo, mediante un entrenamiento adecuado, algunos materiales pueden recordar dos formas diferentes; la una a una temperatura baja y la otra a una temperatura más elevada, exhibiendo de esta manera un efecto de memoria de forma de dos vías [16].

El fenómeno de memoria de forma se puede generar en varias aleaciones metálicas de dos y tres componentes, de las cuales, el Nitinol, las aleaciones de cobre-zinc-aluminio [CuZnAl] y cobre-aluminio-níquel [CuAlNi] son las más utilizadas. También existen polímeros con memoria de forma, sin embargo, el Nitinol sigue siendo el más utilizado para aplicaciones de ingeniería, debido a su mayor capacidad para recuperarse de las deformaciones, notable resistencia a la corrosión, mayor ductilidad, y su elevada biocompatibilidad [17].

De acuerdo con las necesidades, las aleaciones con memoria de forma (AMF), se pueden utilizar como actuador o como sensor. El modo más utilizado de actuación

es la contracción lineal de un actuador de alambre. Un actuador fabricado con alambre de Nitinol es capaz de levantar una carga elevada, por lo menos una vez, pero con el fin de prevenir la “amnesia”, que es el factor que limita la vida del actuador, la carga debe ser reducida. Es decir, los actuadores de AMF son capaces de generar una gran cantidad de trabajo por un par de veces o una cantidad menor de trabajo por muchas veces y pueden activarse térmica o eléctricamente [18].

2.4.2 Fluidos Magnetoreológicos

2.4.2.1 Introducción

Los MRF son un tipo de material inteligente cuyas características cambian rápidamente y pueden ser controladas fácilmente mediante la aplicación de un campo magnético externo. El cambio es proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado, puede ser controlado con alto grado de precisión mediante la variación de dicha intensidad y es inmediatamente reversible después de remover el campo. Los cambios físicos pueden ser bastante sustanciales, convirtiendo un fluido de baja viscosidad en una sustancia mucho más viscosa, casi sólida [11].

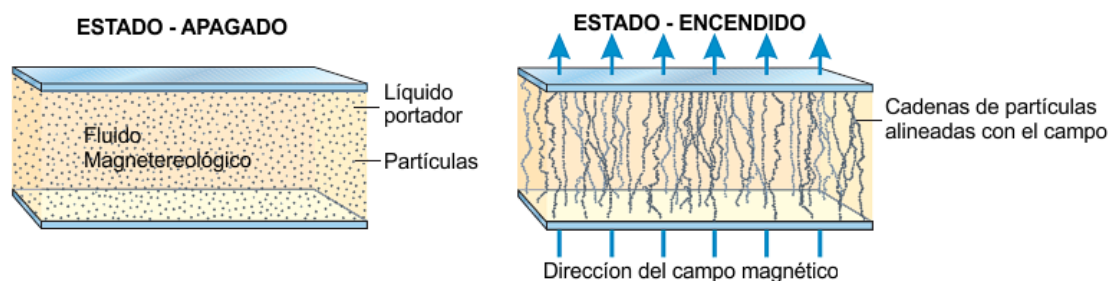


Figura 2.3. Comportamiento de los MRF en ausencia y presencia de campo magnético [1].

Como se observa en la figura 2.3, en los MRF sin campo magnético, las partículas dispersas se distribuyen en forma aleatoria en el líquido portador, dando como resultado una baja viscosidad aparente. Una vez aplicado el campo magnético, inicia el efecto magnetoreológico que causa que las partículas dispersas se polaricen e interactúen entre ellas alineándose y formando cadenas o estructuras columnares paralelas a la dirección del campo aplicado. Cuanto mayor es la intensidad del campo, las cadenas forman estructuras columnares de mayor espesor, que aumentan

la viscosidad aparente y la resistencia al flujo del material, en dirección perpendicular a la dirección del campo magnético [19].

En consecuencia, la energía mecánica necesaria para producir las estructuras tipo cadena se incrementa conforme crece el campo aplicado, dando como resultado un material con características viscosas y resistencia a la fluencia dependiente de la intensidad del campo magnético. El periodo de tiempo durante el que estos eventos suceden es del orden de los milisegundos.

2.4.2.2 Composición de los MRF

Los MRF son básicamente una mezcla de tres componentes principales: partículas magnéticamente polarizables, líquido portador y una variedad de aditivos. Aunque es posible crear una suspensión de MRF sólo con líquido portador y partículas magnéticas, estas son altamente inestables y no funcionan satisfactoriamente. Generalmente es necesario un conjunto adecuado de aditivos para lograr un MRF estable y de larga duración. Por este motivo, en los últimos años gran parte de la actividad de investigación sobre los MRF se ha centrado en el desarrollo de aditivos que permitan a la vez, fuerzas elevadas en presencia de campo magnético, fuerzas bajas sin campo magnético y larga vida en aplicaciones altamente dinámicas [20].

Partículas magnéticamente polarizables

Comúnmente las partículas magnéticamente polarizables dispersas en los MRF son hierro en polvo de alta pureza, aleaciones de hierro y níquel, aleaciones de hierro y cobalto, aceros inoxidable magnéticos y ferritas, aunque es posible utilizar cualquier otra partícula polarizable.

La resistencia a la fluencia máxima que alcanzan los MRF varía aproximadamente como el cuadrado de la magnetización de saturación de las partículas. En este sentido, las mejores partículas son las de aleación de hierro y cobalto que tienen una magnetización de saturación alrededor de 2,4 Teslas. Desafortunadamente, el alto costo del cobalto, que representa aproximadamente el 50% de volumen de estas aleaciones, las hace demasiado costoso para la mayoría de aplicaciones. Las partículas más rentables son el hierro puro que tiene una magnetización de

saturación de 2,1 Teslas. Prácticamente todos los otros metales y aleaciones tienen magnetizaciones de saturación más bajas que las del hierro, lo que resulta en MRF sustancialmente más débiles que sólo son adecuados para aplicaciones donde se requiere bajo esfuerzo elástico [21].

El tamaño de las partículas está en el rango de 1-10 μm y sus fracciones típicas de volumen oscilan entre el 20% y el 45%. La elección de la fracción de volumen ideal para una aplicación en particular es siempre una situación de costo-beneficio [22]. Mientras que la resistencia a la fluencia máxima en el estado-encendido varía más o menos proporcionalmente a la fracción de volumen de partículas polarizables, la viscosidad en el estado-apagado aumenta a un ritmo aún más rápido con el aumento del contenido de partículas.

Líquido portador

Los líquidos portadores más comunes para los MRF son aceites, los mismos que pueden ser aceites minerales, aceites sintéticos o mezclas de ambos. En general, los aceites de hidrocarburos para los vehículos son la primera opción debido a su buena lubricidad, durabilidad y la disponibilidad de una amplia gama de aditivos [20]. Otros líquidos portadores especiales para los MRF son aceites de silicona, glicoles y agua, aunque generalmente tienen propiedades inferiores que los aceites de hidrocarburos en términos de lubricidad y durabilidad. Los aceites de silicona ofrecen propiedades bien controladas para una amplia gama de temperaturas con menor variación de viscosidad que los hidrocarburos sintéticos [20, 22].

Los MRF a base de agua ofrecen la más alta resistencia a la fluencia en estado-encendido y menor viscosidad en estado-apagado. Sin embargo, su alta presión de vapor significa que debe considerarse la pérdida de líquido por evaporación. Por este motivo el agua sólo se utiliza como líquido portador en aplicaciones donde la evaporación no es una preocupación, es decir, en dispositivos que están absolutamente sellados [22]. Por lo tanto, los MRF a base de agua no son apropiados para sistemas que contienen juntas deslizantes como los amortiguadores, debido a que la película de agua que se adhiere sobre la superficie del vástago, luego se evapora y conduce a una pérdida progresiva del fluido.

Aditivos

Una amplia variedad de aditivos similares a los encontrados en los lubricantes comerciales se utiliza para los MRF. Estos aditivos se utilizan para: mantener las partículas suspendidas en el fluido portador evitando su sedimentación, darle estabilidad al fluido, prevenir la aglomeración, aumentar la lubricidad, prevenir la oxidación, modificar la viscosidad e inhibir el desgaste [20].

Existen dos tipos de estabilidad relacionadas con MRF: la estabilidad aglomerativa que evita que las partículas se peguen entre sí, y la estabilidad sedimentaria que asegura que las partículas no se sedimenten con el tiempo. La sedimentación se controla mediante el uso de agentes tixotrópicos y tensioactivos. En ausencia de campo magnético, las redes tixotrópicas imparten al MRF, una resistencia a la fluencia pequeña, que inhibe su flujo a velocidades de cizallamiento muy bajas. Sin embargo, estas redes son muy débiles, de modo que cuando el fluido se corta a velocidades más altas, la red se derrumba y permite que el fluido fluya con una deseable viscosidad dinámica baja [21, 22].

Los dispositivos con MRF como los amortiguadores para aplicaciones dinámicas, son dispositivos de mezcla eficientes, debido a que el movimiento normal de estos dispositivos suele ser suficiente para mezclar de nuevo cualquier MRF estratificado a una condición homogénea. En un MRF diseñado con aditivos adecuados, el remezclado del fluido ocurre en una o dos carreras del amortiguador.

2.4.3 Propiedades de los MRF

Existen varios tipos de MRF "estándar" comercialmente disponibles, los mismos que se adaptan a los requisitos específicos de cada aplicación en particular. El tipo de líquido portador y su viscosidad, las características de las partículas magnéticamente polarizables y su fracción de volumen, el paquete de aditivos y su cantidad, el campo magnético aplicado y su dirección; influyen en las propiedades de los MRF. Sin embargo, la relación entre estos parámetros es complejo, por lo que es necesario seleccionarlos de acuerdo a las condiciones específicas de cada aplicación, con el objetivo de optimizar el diseño de cada dispositivo.

2.4.3.1 Viscosidad

Para aplicaciones mecánicas dinámicas la propiedad más crítica en estado-apagado de los MRF, es la viscosidad plástica (η_p). Esta viscosidad genera velocidades de cizallamiento dependientes de las fuerzas y torques que siempre están presentes en los dispositivos MRF, independientemente de si se aplica o no un campo magnético [21]. Esta viscosidad también es responsable de la mayor parte de la dependencia de la temperatura observada en la salida de fuerza de un dispositivo.

La viscosidad plástica se define como la pendiente de la curva lineal ajustada del esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación. La magnitud de la viscosidad plástica está controlada por la viscosidad del líquido portador y por la fracción de volumen de las partículas polarizables [23]. En estado apagado la viscosidad plástica a temperatura ambiente varía comúnmente de 50 a 200 $mPa \cdot s$, aunque pueden obtenerse valores mucho mayores con líquidos portadores de mayor viscosidad.

Por otro lado, los MRF se caracterizan por tener una viscosidad aparente (η_{ap}) que disminuye a medida que aumenta la velocidad de cizallamiento [24]. En estado-apagado y velocidades de deformación menores a $250 s^{-1}$, los MRF exhiben niveles de viscosidad aparente similar a las pinturas líquidas (0,1 a 1) $Pa \cdot s$. Cuando se aplica un campo magnético su viscosidad aparente puede aumentar entre 10^5 a $10^6 Pa \cdot s$ en pocos milisegundos [3]. Este efecto ocurre debido a que las cadenas de partículas que se forman en el fluido, actúan para aumentar su viscosidad aparente y su resistencia al flujo. En ausencia del campo magnético, las partículas vuelven a un estado no organizado y la viscosidad aparente se reduce nuevamente.

2.4.3.2 Resistencia a la Fluencia por Cizallamiento

La propiedad más importante de los MRF es su resistencia a la fluencia por cizallamiento, la misma que depende del campo magnético aplicado. La resistencia a la fluencia típica de los MRF está en el intervalo de 25 a 100 kPa, dependiendo principalmente de la fracción de volumen de partículas polarizables dispersas en el fluido [25]. La resistencia a la fluencia se suma al esfuerzo viscoso generado por el

fluido para cualquier velocidad de cizallamiento ($\dot{\gamma}$), con el fin de obtener su resistencia total al flujo ($\tau_{T(H)}$) [12].

Para campos magnéticos con intensidad por debajo de 100 kA/m, la resistencia a la fluencia que desarrollan los MRF es linealmente proporcional a la intensidad del campo magnético. Para campos magnéticos mayores a 100 kA/m, el incremento de la resistencia a la fluencia se reduce progresivamente y finalmente se satura por completo a una intensidad de campo entre 400 a 500 kA/m [21].

La figura 2.4 muestra las curvas de resistencia a la fluencia en función de la intensidad de campo magnético, obtenidas mediante mediciones realizadas en un viscosímetro rotacional para varios tipos de MRF a base de aceite, con fracciones de volumen de partículas dispersas que van desde 22% a 40%. Se observa que la resistencia a la fluencia aumenta con la intensidad de campo magnético y con la fracción de volumen de partículas.

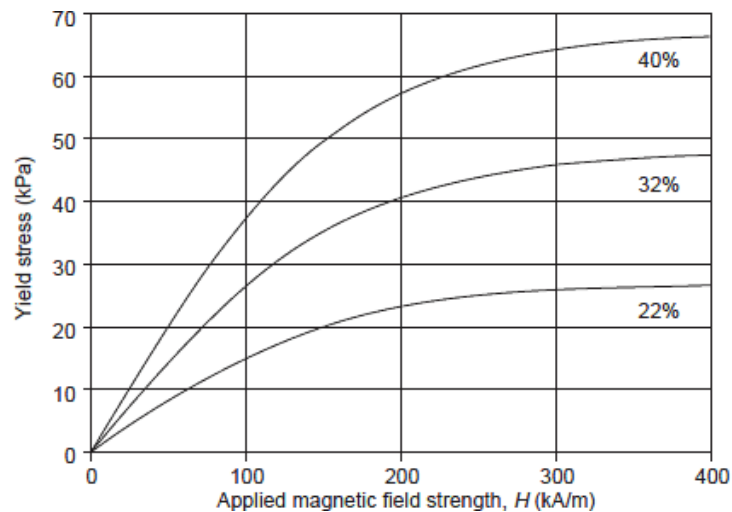


Figura 2.4. Resistencia a la fluencia típica de varios MRF a base de aceite [21].

2.4.3.3 Resistencia Viscosa

La resistencia viscosa se origina por el rozamiento interno entre el fluido y la superficie de las partículas polarizables. Este esfuerzo es función de las propiedades dinámicas del fluido y es proporcional al gradiente de velocidades. Debido a la resistencia viscosa, sobre la superficie de las partículas de los MRF en movimiento se genera una fuerza (F_{η}) por la fricción dentro del fluido, que actúa en sentido

opuesto a la dirección de movimiento y juega un papel importante en el flujo de fluidos análogo al rozamiento en el movimiento de un sólido sobre otro [26].

Por lo tanto, la fuerza viscosa es la medida de la resistencia al flujo de un fluido y es proporcional a la tasa con la cual cambia la velocidad del fluido, la constante de proporcionalidad es la viscosidad. La fuerza viscosa sobre una superficie es el esfuerzo viscoso integrado sobre la superficie. Mientras que la fuerza viscosa por unidad de volumen sobre una partícula es la divergencia del tensor de esfuerzo viscoso en este punto.

En los dispositivos con MRF la fuerza viscosa en estado-apagado puede llegar a ser bastante grande a velocidades de cizallamiento de 10^4 s^{-1} a 10^5 s^{-1} , que se encuentran frecuentemente en los amortiguadores, frenos y embragues [21].

2.4.3.4 Permeabilidad Magnética

La capacidad que tienen los MRF para interactuar ante la presencia de un campo magnético externo depende de la permeabilidad magnética del fluido y su magnitud está dada por la pendiente de la curva de densidad de flujo magnético B en función de la intensidad del campo magnético H (curva de inducción magnética). En la figura 2.5, se muestra las curvas típicas de B en función de H para varios MRF comerciales a base de aceite.

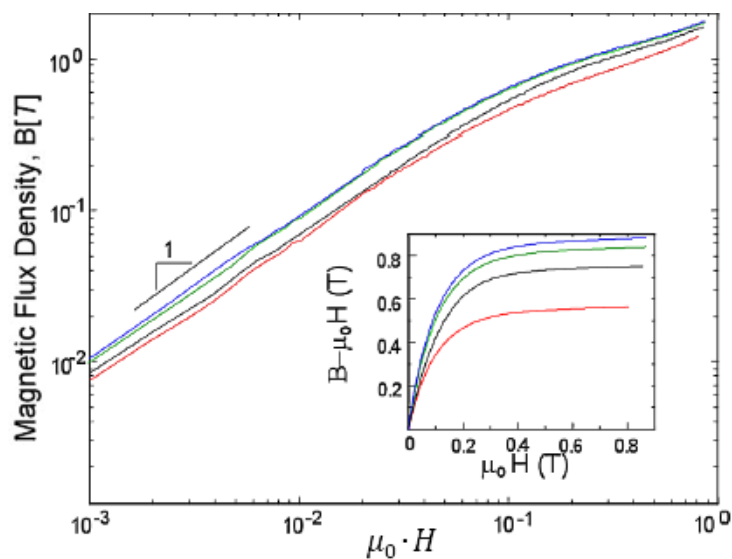


Figura 2.5. Típica curva $B - H$ para varios MRF comerciales [27].

Como se observa en la figura 2.5, los MRF presentan una permeabilidad magnética lineal hasta un campo aplicado de aproximadamente $0,02/\mu_0$ (A/m), donde μ_0 es la permeabilidad del vacío. En esta región la permeabilidad de los MRF es relativamente constante. A continuación, la permeabilidad deja de ser lineal y varían entre 5 a 9 veces la del vacío. Es decir, los MRF comienzan a exhibir saturación magnética gradual más allá del régimen lineal. La saturación completa ocurre típicamente en campos más allá de $0,4/\mu_0$ (A/m) [27].

Los MRF a intensidad de campo muy bajo tienen permeabilidad magnética relativa inicial en el intervalo de 4 a 8. A medida que la resistencia a la fluencia del MRF comienza a saturarse en campos magnéticos más altos, también la pendiente de las curvas B en función de H se reduce y se aproxima a una pendiente de 1 en campos en el intervalo de 400 kA/m a 500 kA/m . La máxima intensidad de campo magnético que es útil en un sentido práctico es aproximadamente 250 kA/m [21].

2.4.3.5 Propiedades del Fluido MRF-140CG

En la tabla 2.2 se describen las principales propiedades de varios MRF comerciales desarrollados por Lord Corporation.

Tabla 2.2. Propiedades de MRF comerciales a base de aceite [21]

Property	MRF-122-2ED	MRF-132AD	MRF-140CG
Carrier liquid	Hydrocarbon	Hydrocarbon	Hydrocarbon
Particle volume fraction, ϕ	0.22	0.32	0.40
Particle weight fraction	0.72	0.81	0.854
Density (g/cm^3)	2.38	3.09	3.64
Yield strength (kPa) at 100 kA/m	13	23	38
Plastic viscosity (mPa s) at 40°C , $\dot{\gamma} > 500\text{ s}^{-1}$	61	92	280
Operating temperature ($^\circ\text{C}$)	-40 to 130	-40 to 130	-40 to 130
Magnetic permeability relative at low field	~4	~6	~8
Response time (s)	<0.001	<0.001	<0.001
Thermal conductivity ^a ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$), at 25°C	0.21–0.81	0.25–1.06	0.28–1.28
Specific heat ($\text{J/g } ^\circ\text{C}$), at 25°C	0.94	0.80	0.71
Coefficient of thermal expansion $0\text{--}50^\circ\text{C}$, $(\Delta V/V)/^\circ\text{C}$	6.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}

En la tabla 2.2 se observa que el fluido MRF-140CG presenta valores más altos de resistencia a la fluencia, permeabilidad magnética y viscosidad plástica que los otros fluidos. Por lo tanto, se considera este fluido magnetoreológico como el más adecuado para utilizarlo en el diseño de dispositivos mecánicos inteligentes.

Las principales propiedades de los fluidos MRF-140CG se muestran en el Anexo 1. Sin embargo, como expresa Lord Corporation, los valores indicados en esta ficha técnica representan valores típicos y no deben ser utilizados para propósitos de especificación.

2.4.4 Modos de Operación de los MRF

Dependiendo del tipo de aplicación, los dispositivos que utilizan el efecto magnetoreológico, funcionan bajo uno de los tres modos básicos de operación de los MRF o cualquier combinación de ellos (figura 2.6): modo de válvula, modo de corte directo y modo de aplastamiento. El modo válvula, el modo de corte directo y la combinación de ambos, se utilizan para desarrollar todo tipo de amortiguadores lineales y rotativos, atenuadores de impacto, servo-válvulas, embragues, frenos y dispositivos de sujeción. El modo de aplastamiento se utiliza sólo para desarrollar amortiguadores lineales con amplitudes limitadas [19, 23].

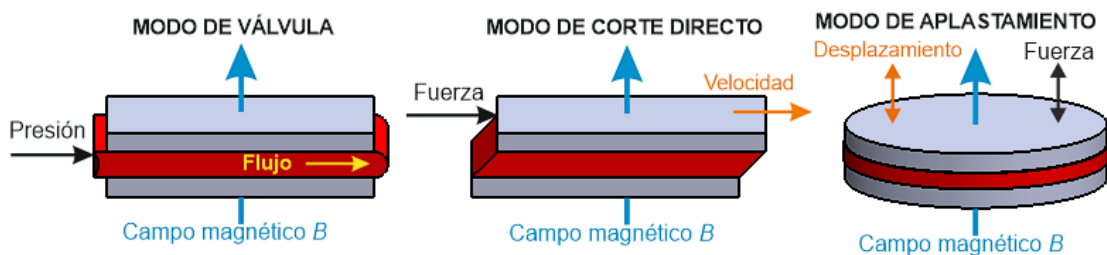


Figura 2.6. Modos de operación de los MRF [19].

2.4.4.1 Modo de Válvula

En el modo de válvula el MRF fluye entre placas paralelas inmóviles mientras el campo magnético se aplica en dirección perpendicular al flujo, como se ilustra en la figura 2.6. La resistencia a la fluencia generada en el fluido debido al campo establece un umbral de presión para cualquier flujo de fluido. La variación del campo magnético permite variar este umbral de presión, creando así un mecanismo

de válvula proporcional controlable, sin necesidad de piezas mecánicas móviles. Sólo se requiere un circuito magnético bien diseñado con electroimanes y canales de flujo con materiales de alta permeabilidad magnética.

El funcionamiento en modo de válvula se utiliza comúnmente en amortiguadores magnetoreológicos como el mostrado en la figura 2.7. En estos dispositivos el pistón se mueve hacia adelante y hacia atrás dentro de una carcasa tubular llena de MRF y este es obligado a fluir a través de orificios dentro o alrededor del pistón. Una bobina electromagnética se enrolla sobre el pistón para generar el campo magnético que actúa sobre el fluido para controlar su resistencia al flujo.

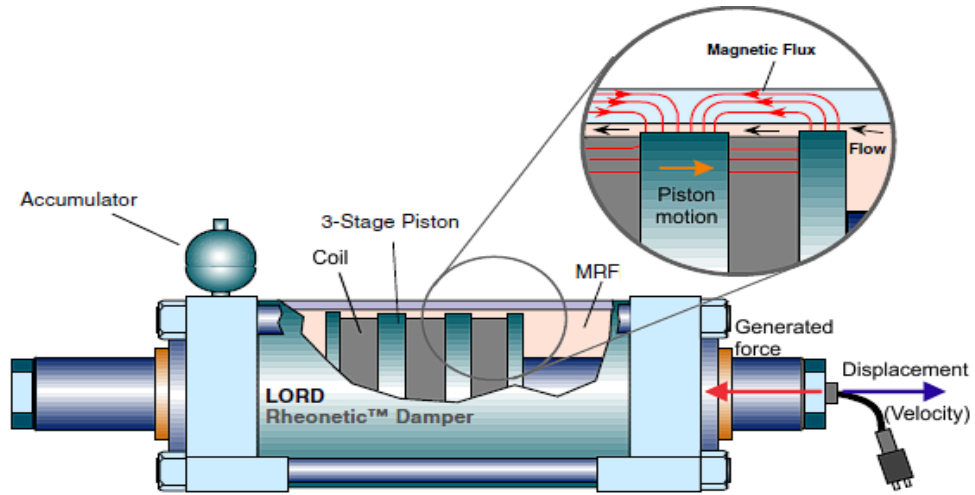


Figura 2.7. Principio de funcionamiento de los MRF en modo de válvula [28].

En base a la figura 2.8, la caída de presión desarrollada en un dispositivo que trabaja en modo de válvula se divide en dos componentes, la presión no controlable ΔP_η debido a la viscosidad del fluido y la presión controlable $\Delta P_{\tau(H)}$ debido a la resistencia a la fluencia inducida por el campo magnético aplicado [23]:

$$\Delta P_\eta = \frac{12\eta_p QL}{h^3 w} \quad (2.1)$$

$$\Delta P_{\tau(H)} = \frac{c\tau_{T(H)}L}{h} \quad (2.2)$$

Donde:

- Q es el flujo volumétrico o caudal.
- L es la longitud axial efectiva del polo magnético.
- w es el ancho del canal de flujo.
- h es la apertura o espesor del canal de flujo.
- η_p es la viscosidad plástica del fluido definida como la pendiente de la curva de esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación.
- $\tau_{T(H)}$ es la resistencia total al flujo desarrollada por el fluido en respuesta a un campo magnético aplicado.
- c es un coeficiente en función del perfil de velocidad cuyo valor varía desde 2,07 hasta 3,07.

$$c = 2,07 + \frac{1}{1 + \frac{0,4 wh^2 \tau_{T(H)}}{12 \eta_p Q}} \quad (2.3)$$

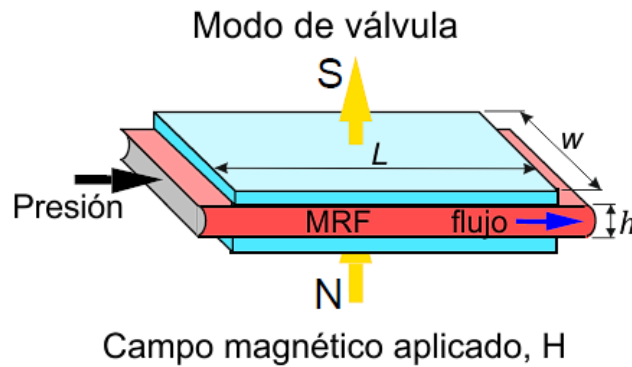


Figura 2.8. Funcionamiento de los MRF en modo de válvula [27].

Entonces, la caída de presión total ΔP en un dispositivo en modo de válvula es:

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_{\tau(H)} \quad (2.4)$$

La fuerza total de amortiguamiento desarrollada por un amortiguador en modo de válvula es igual a la caída de presión total multiplicada por el área del pistón A_p .

$$A_p = \pi R_1^2 \quad (2.5)$$

Donde:

- R_1 es el radio del pistón.

2.4.4.2 Modo de Corte Directo

Como se muestra en la figura 2.9, en un dispositivo en modo de corte directo una capa de MRF está restringida entre dos superficies y sólo una superficie se desliza o gira en relación con la otra cuando se le aplica una fuerza, al mismo tiempo que un campo magnético externo es aplicado en dirección perpendicular a la dirección de movimiento de la superficie móvil.

Los dispositivos en modo de corte directo se encuentran comúnmente en frenos y embragues. Estos dispositivos están configurados de manera que una capa de MRF resiste a la cizalladura cuando un elemento se gira en relación con otro y generan una cantidad controlable de torque de acoplamiento.

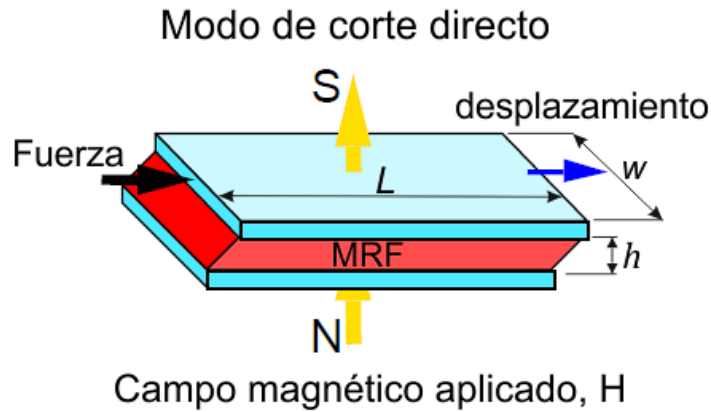


Figura 2.9. Funcionamiento de los MRF en modo de corte directo [27].

La cantidad de fuerza requerida para hacer que el fluido se corte depende de la intensidad del campo magnético aplicado y de la resistencia a la fluencia por cizallamiento desarrollada en los MRF. La fuerza desarrollada por un dispositivo de corte directo se divide en la fuerza no controlable F_η debida a la resistencia viscosa del fluido y la fuerza controlable $F_{\tau(H)}$ debida al esfuerzo cortante inducido por el campo magnético aplicado [23]:

$$F_\eta = \frac{\eta_p v_0 L w}{h} \quad (2.6)$$

$$F_{\tau(H)} = \tau_{T(H)} L w \quad (2.7)$$

Donde:

- v_0 es la velocidad del pistón.

La fuerza total F_T desarrollada por el dispositivo en modo de corte directo, se obtiene por la siguiente ecuación:

$$F_T = F_\eta + F_{\tau(H)} \quad (2.8)$$

2.4.4.3 Modo de Aplastamiento

Este modo de operación de los MRF no ha sido ampliamente investigado y como se muestra en la figura 2.6, funciona cuando se aplica una fuerza a las placas en la misma dirección del campo magnético para reducir o expandir la distancia entre las placas paralelas produciendo un flujo de compresión.

En el modo de aplastamiento, el MRF se somete a cargas dinámicas (alternas entre tensión y compresión) o estáticas (tensión o compresión individuales). A medida que se aplica un campo magnético externo, las cadenas de partículas formadas entre las paredes se vuelven rígidas con rápidos cambios de viscosidad. Los desplazamientos acoplados al modo de aplastamiento son relativamente pequeños (pocos milímetros) pero requieren grandes fuerzas [23].

2.4.5 Fundamentos de la Mecánica de Fluidos

2.4.5.1 Introducción

La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (estática de fluidos) o en movimiento (dinámica de fluidos), y la interacción de éstos con los sólidos o con otros fluidos que los rodean. El estudio del movimiento de los fluidos que básicamente son incompresibles (líquidos y gases a baja velocidad) se llama hidrodinámica [29].

Durante el análisis de los fluidos algunas de sus propiedades tienen un papel preponderante, mientras que otras influyen muy poco o nada. Por ejemplo, en la estática de fluidos, el peso específico es la propiedad más importante, mientras que

en el flujo de fluidos la densidad y la viscosidad son las que predominan. En la cinemática de fluidos, cuando existe una compresibilidad significativa del fluido se debe considerar los principios de la termodinámica y cuando las secciones de paso son pequeñas, la tensión superficial es la propiedad más importante [30].

2.4.5.2 Fluido

Una sustancia en estado líquido o gaseoso se considera un fluido y se diferencia de los sólidos por la forma como actúan ante un esfuerzo cortante aplicado. Los sólidos oponen resistencia al esfuerzo aplicado, mientras que los fluidos se deforman de manera continua bajo la acción del esfuerzo, sin importar lo pequeño que sea. En los sólidos, el esfuerzo es proporcional a la deformación, mientras que en los fluidos es proporcional a la velocidad de deformación [30, 31]. Los sólidos bajo la acción de un esfuerzo cortante constante, a cierto ángulo dejan de deformarse, mientras que los fluidos nunca dejan de deformarse y tienden a alcanzar una razón de deformación.

En la mayoría de casos los sólidos y los fluidos se distinguen con facilidad, sin embargo, en algunos casos esta diferencia no es tan clara. Por ejemplo, el asfalto se comporta como sólido cuando el esfuerzo cortante se ejerce durante periodos cortos, pero se deforma con lentitud y se comporta como fluido cuando dichos esfuerzos se ejercen durante periodos largos. Los MRF bajo la acción de campos magnéticos de intensidad elevada exhiben un comportamiento semejante.

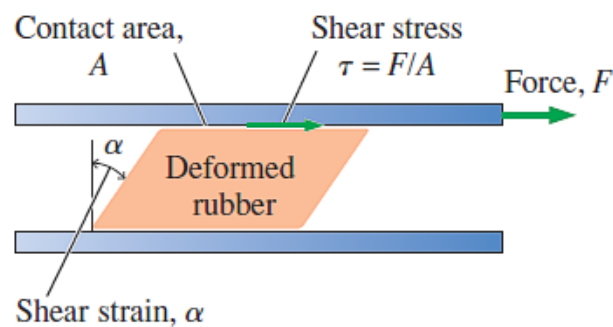


Figura 2.10. Deformación de un bloque colocado entre dos placas paralelas [29].

En la figura 2.10 se observa que a medida que se empuja la placa superior mientras la inferior se mantiene fija, el bloque se deforma un ángulo α y su superficie

superior se desliza una cantidad igual al desplazamiento de la placa móvil, mientras que la superficie inferior se mantiene fija. Cuando se elimina la fuerza, el bloque regresa a su forma original, siempre que el esfuerzo generado no sobrepase el límite elástico del material. Si se repite el mismo experimento con un fluido, la capa de fluido en contacto con la placa superior se desplaza con ésta con la misma velocidad, sin importar lo pequeña que sea la fuerza.

La componente normal de la fuerza que actúa sobre la superficie del fluido, por unidad de área, es el esfuerzo normal σ , mientras que, la componente tangencial de la fuerza por unidad de área, es el esfuerzo cortante τ (figura 2.11). Cuando el fluido se encuentra en reposo, el esfuerzo normal se llama presión.

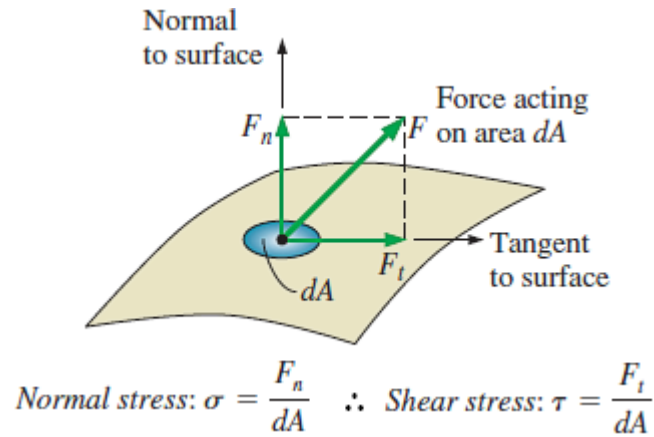


Figura 2.11. Esfuerzo normal y cortante en la superficie de un fluido [29].

2.4.5.3 Viscosidad

A medida que un fluido fluye, dentro de él se desarrolla un esfuerzo cortante cuya magnitud depende de su viscosidad. Entonces, la viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido a fluir y determina su velocidad de deformación cuando se le aplica un esfuerzo cortante [30].

Si se tiene un fluido entre dos placas paralelas separadas una distancia h como se ilustra en la figura 2.12, y se aplica una fuerza F a la placa superior, mientras la inferior se mantiene fija, la capa de fluido en contacto con la placa superior se pega a su superficie y se mueve con la misma velocidad v_0 de la placa, al mismo tiempo que el fluido en contacto con la placa inferior se mantiene con velocidad cero

(debido a la condición de no-deslizamiento). Por lo tanto, el fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante τ [29]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

Donde:

- A es el área de contacto entre la placa y el fluido.

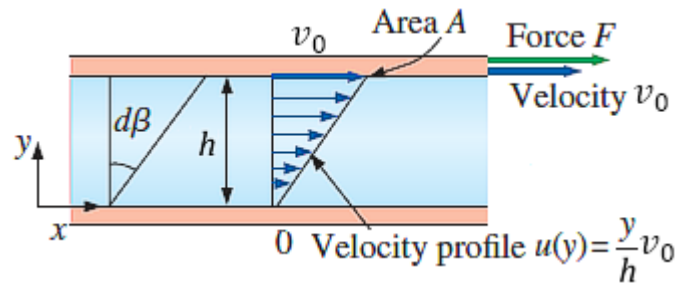


Figura 2.12. Comportamiento del flujo de fluido entre dos placas paralelas [29].

En el flujo tangencial unidimensional de fluidos newtonianos, el esfuerzo cortante se expresa mediante la relación lineal [29]:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.10)$$

Donde:

- η es la viscosidad dinámica o viscosidad absoluta del fluido
- du/dy es la velocidad de deformación (o gradiente de velocidad).

La fuerza cortante F requerida para mover la placa superior de la figura 2.12, a una velocidad v_0 al mismo tiempo que la placa inferior permanece fija, viene dado por:

$$F = \mu A \frac{v_0}{l} \quad (2.11)$$

El estudio de la deformación de los fluidos que fluyen se llama reología y es la ciencia que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia. En la figura 2.13 se representa el comportamiento reológico de varios fluidos.

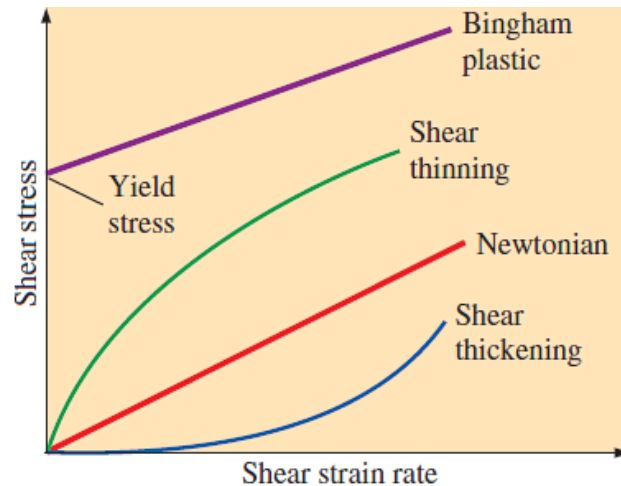


Figura 2.13. Comportamiento reológico de varios fluidos [29].

En la figura 2.13 se observa que en los fluidos no-newtonianos la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es no lineal. La pendiente de la curva en el diagrama esfuerzo cortante versus velocidad de deformación se conoce como viscosidad aparente del fluido.

2.4.5.4 Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos se caracterizan por que el esfuerzo cortante es linealmente proporcional a la velocidad de deformación, debido a que para este tipo de fluidos la viscosidad dinámica es constante y no depende del esfuerzo aplicado. La viscosidad de un fluido newtoniano es independiente del tiempo de aplicación del esfuerzo y de la velocidad de corte, aunque sí puede depender de la temperatura y de la presión a la que se encuentra. Los fluidos newtonianos son análogos a los sólidos elásticos.

En la figura 2.14 se muestran dos gráficas sumamente importantes para los fluidos newtonianos, la curva de fluidez y la curva de viscosidad. En la curva de fluidez, el valor de la viscosidad dinámica es constante y viene dado por la tangente del ángulo que forma la curva del esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación. La curva de viscosidad representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación y para los fluidos newtonianos es constante para cualquier velocidad de deformación [29].

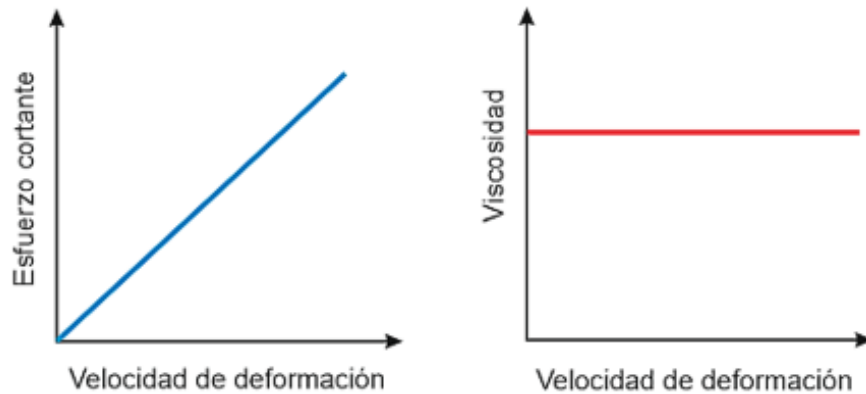


Figura 2.14. Curvas de fluidez y de viscosidad para fluidos newtonianos [30].

2.4.5.5 Fluidos No-Newtonianos

Los fluidos donde el esfuerzo cortante no es linealmente proporcional a la velocidad de deformación se conocen como fluidos no-newtonianos. En estos fluidos su viscosidad depende de la velocidad de corte aplicada. Entre los fluidos no-newtonianos se encuentran los siguientes:

- *Viscoelásticos*, son fluidos que tienen “memoria” debido a que regresan (completa o parcialmente) a su forma original después que se retira el esfuerzo aplicado. En estos fluidos los esfuerzos de corte no sólo dependen de la razón de deformación local, sino también de su historia.
- *Fluidos de adelgazamiento por corte o pseudoplásticos*, estos se vuelven menos viscosos mientras más se corta el fluido, es decir, su resistencia a la deformación disminuye al aumentar el esfuerzo cortante [31]. Un ejemplo es la pintura, la cual es muy viscosa cuando se unta en la brocha, pero conforme se aplica a la pared, la capa de pintura entre la brocha y la pared se somete a una gran razón de corte y se vuelve mucho menos viscosa.
- *Fluidos de engrosamiento por corte o dilatantes*, estos se vuelven más viscosos mientras más se corte el fluido, es decir, su resistencia a la deformación aumenta al aumentar el esfuerzo cortante [31]. Un ejemplo es la arena movediza, de la cual es fácil salir moviéndose lentamente porque su baja viscosidad; pero si se entra en pánico y se mueve rápidamente, la resistencia viscosa aumenta en gran medida.

- *Fluidos plásticos o plásticos de Bingham*, en estos fluidos el efecto de adelgazamiento por corte es extremo y se requiere exceder un esfuerzo llamado resistencia al flujo antes de que el fluido comience a fluir. Después de esto, la curva de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte es lineal [29]. Un ejemplo es el dentífrico, el cual si se sostiene hacia abajo no fluye, aun cuando existe un esfuerzo debido a la gravedad, pero si se aumenta el esfuerzo apretando el tubo, el dentífrico fluye como un fluido muy viscoso.
- *Fluidos tixotrópicos*, en estos la viscosidad aparente es función tanto del esfuerzo cortante como de la velocidad de deformación. Estos fluidos requieren una reducción gradual del esfuerzo cortante para mantener constante la velocidad de deformación [31]. Si el esfuerzo cesa, el fluido se recupera y adquiere lentamente su consistencia original en un proceso reversible.

2.4.6 Campo Magnético

Un campo magnético ejerce una fuerza sobre cualquier partícula cargada que se mueve dentro de la zona de influencia del campo. Se puede originar por una corriente eléctrica que fluye en un conductor, por un campo eléctrico que cambia con el tiempo o por un imán permanente. El campo magnético es un campo vectorial que para cualquier punto está especificado por su magnitud y su dirección.

La magnitud del campo magnético puede especificarse mediante dos términos diferentes pero muy relacionados entre sí [32]:

- *Densidad de flujo magnético o inductancia B* , describe la cantidad de flujo magnético por unidad de área que se genera sobre cierta zona, es decir, describe el campo en función de sus efectos (fuerzas sobre las cargas). Se mide en Wb/m^2 o *Teslas (T)*
- *Intensidad de campo magnético H* , describe cuan intenso es el campo magnético en la zona donde se genera, es decir, describe el campo en función de sus fuentes (las corrientes eléctricas). Se mide en A/m

En vacío o en el espacio libre B y H se relacionan mediante la ecuación 2.12 [33]:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (2.12)$$

Cuando el campo magnético se genera en otros medios diferente del espacio libre o vacío, B y H se relacionan mediante la siguiente ecuación [33]:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.13)$$

Donde:

- μ_0 es la permeabilidad del espacio libre $= 4 \pi 10^{-7} \text{ T m/A}$
- μ es la permeabilidad del material dentro del campo magnético.

Como se aprecia en la figura 2.15, la dirección del campo magnético en un punto, es en la que apunta el polo norte de una brújula ahí localizada y se representa mediante líneas de campo tangentes al vector B en dicho punto. Las líneas de campo salen del polo norte (N) y entran al polo sur (S). En las zonas donde las líneas de campo adyacentes están cerca entre sí, la magnitud del campo es elevada, mientras que en las zonas donde las líneas están separadas, la magnitud del campo es pequeña. Las líneas de campo no tienen puntos extremos y forman espiras cerradas.

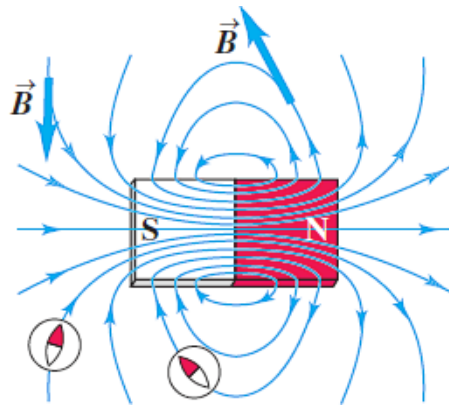


Figura 2.15. Campo magnético en un imán permanente [34].

2.4.6.1 Campo Magnético en un Alambre Recto

Cuando por un alambre recto circula una corriente eléctrica se genera un campo magnético que forma circunferencias alrededor del alambre y cuya dirección se determina mediante la regla de la mano derecha (figura 2.16), donde el dedo pulgar

derecho apunta a lo largo del alambre en dirección positiva de la corriente y los otros dedos se enrollan alrededor del alambre en la dirección de $\vec{B}$ [35].

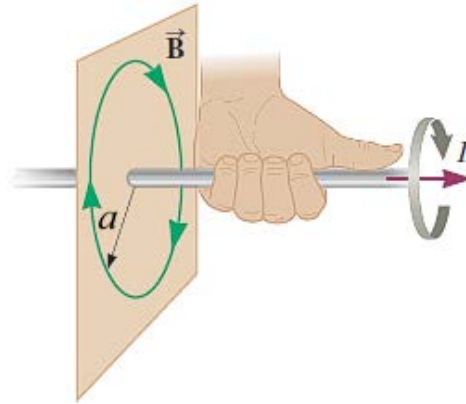


Figura 2.16. Campo magnético en un alambre largo recto [36].

La intensidad del campo magnético en un punto cercano al alambre es directamente proporcional a la corriente que circula por el alambre e inversamente proporcional a la distancia desde el alambre hasta el punto de interés.

2.4.6.2 Campo Magnético en un Solenoide

La intensidad del campo magnético que genera un alambre recto se puede multiplicar considerablemente cuando el alambre se enrolla en forma de una bobina con muchas espiras llamado solenoide, debido a que cada espira contribuye por igual al campo, logrando de esta manera que el campo magnético total sea N veces más intenso que el campo generado por una sola espira [34].

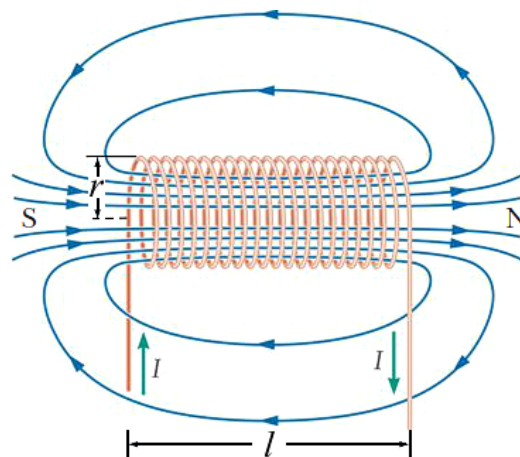


Figura 2.17. Líneas de campo magnético para un solenoide [37].

La figura 2.17 muestra un solenoide de longitud l y número total de vueltas N . Si la longitud del solenoide es mucho mayor que su radio r , las líneas de campo que salen del extremo norte del solenoide se dispersan sobre una amplia región antes de regresar para entrar por el extremo sur, formando siempre espiras cerradas.

En el interior del solenoide las líneas de campo son casi paralelas, lo que indica un campo uniforme, de magnitud constante y mucho más intenso que en el exterior, donde las líneas de campo están dispersas, indicando un campo débil no uniforme y con dirección opuesta al campo dentro del solenoide. El campo magnético en un solenoide aumenta con la corriente y es proporcional al número de vueltas por unidad de longitud. En vacío su magnitud viene dada por [33]:

$$B_0 = \mu_0 n I \quad (2.14)$$

Donde:

- B_0 es el campo magnético debido a la corriente en el solenoide.
- n es el número de vueltas por unidad de longitud del solenoide, $n = N/l$.
- I es la corriente eléctrica que circula por el alambre.

La dirección del campo magnético en el eje del solenoide está dada por la regla de la mano derecha. Si se cierran los dedos de la mano derecha alrededor de las espiras en dirección de la corriente, el pulgar derecho apunta en la dirección del campo [34].

A los solenoides también se les conoce como electroimán y tiene la ventaja que actúa como un imán sólo cuando portan una corriente. Los electroimanes se fabrican de varias formas incluyendo geometrías lineales, toroidales y de herradura.

2.4.6.3 Materiales Magnéticos

La medida en la que un material conserva su magnetismo depende de si es magnéticamente blando o duro. Los materiales magnéticos blandos se magnetizan fácilmente, pero de igual manera tienden a perder su magnetismo con facilidad. Entre estos materiales se encuentra el hierro, níquel, aleaciones de níquel-hierro y las ferritas.

Los materiales magnéticos duros generan campos magnéticos sin necesidad de electricidad por lo que son utilizados en imanes permanentes. Entre estos materiales está el alnico que es el nombre genérico para varias aleaciones de hierro, cobalto y níquel. También se encuentran las tierras raras, como el samario y neodimio [36].

Por su reacción bajo un campo magnético, los materiales se clasifican en [37]:

- *Materiales ferromagnéticos*, son aquellos que presentan fuertes efectos magnéticos, es decir son atraídos fuertemente por un campo magnético externo y pueden retener algo de su magnetización incluso después de remover el campo magnético aplicado. Entre estos materiales están el hierro, aceros, cobalto, níquel, tierras raras y varias aleaciones que los contienen.
- *Materiales paramagnéticos*, son atraídos por un campo magnético pero su respuesta es muy débil en comparación con los ferromagnéticos. Además, el efecto desaparece tan pronto se retira el campo magnético. Los materiales ferromagnéticos se comportan como materiales paramagnéticos cuando se calientan por encima de la temperatura de Curie. Entre estos materiales están el aluminio, titanio, platino y algunas aleaciones de cobre.
- *Materiales diamagnéticos*, estos materiales son repelidos por un campo magnético externo que actúa sobre él, generando una magnetización muy débil. La dirección del campo adicional generado es siempre opuesta a la dirección del campo magnético externo. Materiales como el cobre, la plata, el oro y la alúmina son diamagnéticos a temperatura ambiente.
- *Materiales antiferromagnéticos y ferrimagnéticos*, a estos materiales se les puede dar formas de magnetización previamente proyectadas para la fabricación de componentes electrónicos específicos. Materiales con estas propiedades son el cromo, el manganeso y algunos materiales cerámicos.

Como se aprecia en la figura 2.18, cuando dentro de un solenoide se coloca un núcleo de material ferromagnético en lugar de vacío, la magnitud del campo magnético se multiplica enormemente, dependiendo de la pureza del material, debido a que el material se magnetiza y actúa como un imán [38].

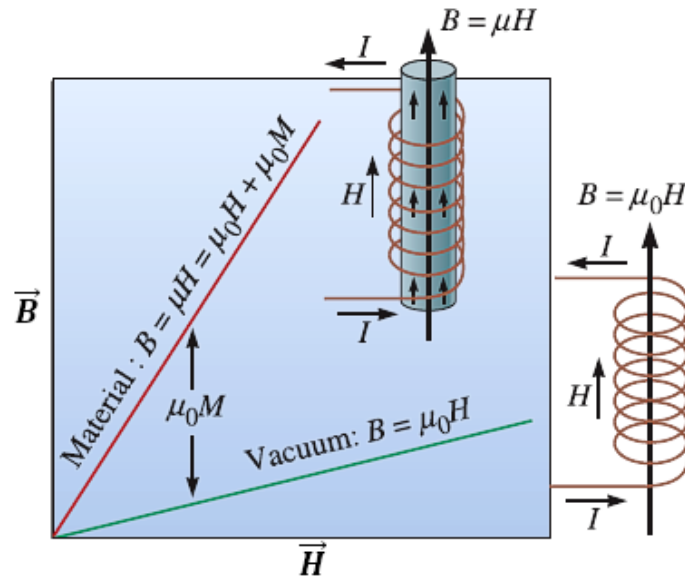


Figura 2.18. Diferencia entre solenoide en vacío y con núcleo [38].

El campo magnético resultante B es igual a la suma del campo debido a la corriente en el alambre B_0 , más el campo debido a la magnetización del núcleo [39]:

$$B = B_0 + \mu_0 \cdot M \quad (2.15)$$

Donde:

- M es la magnetización del material del núcleo.

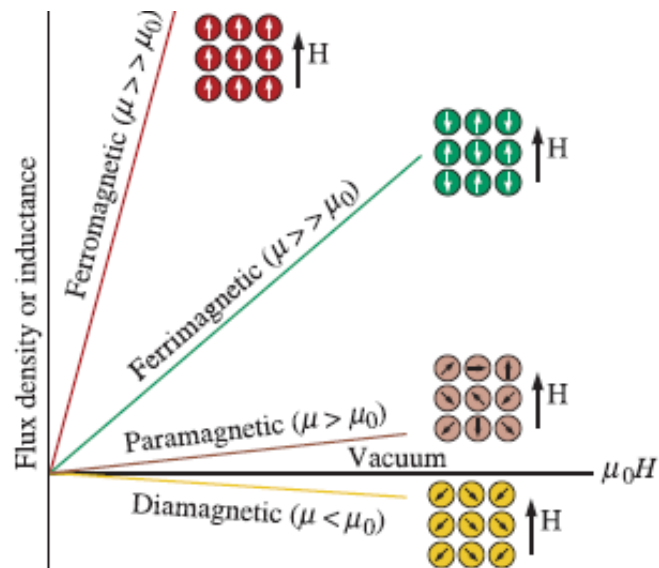


Figura 2.19. Efecto de la permeabilidad del material del núcleo sobre $\vec{B}$ [38].

El campo magnético dentro del material es mayor, en un factor μ_r , de lo que sería si en lugar del material existe vacío (figura 2.19). Dicho factor se conoce como permeabilidad relativa del material μ_r y su valor es diferente para cada material.

$$\mu_r = \chi_m + 1 \quad (2.16)$$

La cantidad en que la permeabilidad relativa difiere de la unidad se llama susceptibilidad magnética χ_m y viene dado por:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (2.17)$$

La susceptibilidad magnética de los materiales ferromagnéticos es muy elevada y se aproximan a 10^6 , para los materiales paramagnéticos son pequeños valores positivos entre 10^{-4} y 10^{-5} ; y para los materiales diamagnéticos son pequeños valores negativos alrededor de 10^{-6} [38].

2.4.7 Resistencia al Flujo

2.4.7.1 Introducción

En un fluido en movimiento la presencia de superficies sólidas influye en su flujo. Cuando se analiza el flujo de un fluido (figura 2.20) se demuestra que la capa de fluido en contacto con el sólido tiene una velocidad cero, es decir, el fluido se mueve por capas con velocidades sucesivamente menores, hasta la capa en contacto con el sólido, la misma que se adhiere a la superficie y pierde su deslizamiento. Este efecto se conoce como condición de no-deslizamiento.

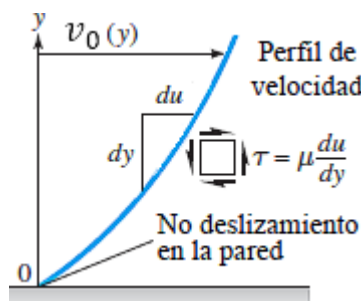


Figura 2.20. Condición de no-deslizamiento en un fluido en movimiento [32].

La capa en contacto con el sólido desacelera la capa adyacente de fluido, debido a las fuerzas viscosas que se generan entre cada capa de fluido, y esta desacelera a la capa siguiente y así sucesivamente, dando lugar al desarrollo de un perfil de velocidad que tiene valor cero en los puntos de contacto entre el fluido y el sólido. La capa de fluido adyacente a la superficie, en la cual los efectos viscosos y los gradientes de velocidades son significativos se llama capa límite [30].

El esfuerzo cortante que se produce en el fluido es proporcional a la pendiente del perfil de velocidad y es máximo en el sólido [32]. Otra consecuencia de la condición de no-deslizamiento es la resistencia al movimiento de una superficie, la cual es la fuerza que un fluido ejerce sobre una superficie en la dirección del flujo.

2.4.7.2 Modelos para los MRF

Los modelos de MRF desempeñan un papel importante en el desarrollo de dispositivos que utilizan este tipo de materiales. Por lo tanto, encontrar un modelo que pueda predecir de forma precisa el comportamiento de los MRF son una parte importante para el diseño e implementación de tales dispositivos. El estudio de estos modelos también es necesario para interpretar los resultados experimentales obtenidos de la caracterización del fluido.

En ausencia de un campo magnético los MRF muestran un comportamiento newtoniano. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético el fluido desarrolla una resistencia a la fluencia que es proporcional a la intensidad del campo aplicado. Esta resistencia a la fluencia inducida por el campo magnético añade linealmente tensión de cizalladura a la viscosidad sin campo magnético del MRF, de tal forma que el fluido adquiere el comportamiento de un fluido no-newtoniano.

Modelo Empírico de Dr. Dave

Este modelo propone dos ecuaciones empíricas para describir las propiedades de la mayoría de los MRF. Mediante la ecuación 2.18, se calcula la magnitud de la resistencia total a la fluencia $\tau_{T(H)}$ en Pa , inducida por el campo magnético externo aplicado H [40]:

$$\tau_{T(H)} = C 271.700 \phi^{1,5239} \tanh(6,33 \cdot 10^6 H) \quad (2.18)$$

Mediante la ecuación 2.19, se determina la relación entre la densidad de flujo magnético B en *Teslas* (T) y la intensidad de campo magnético H en amperios por metro (A/m) aplicado al MRF.

$$B = 1,91 \phi^{1,133} [1 - \exp(-10,97 \mu_0 H)] + \mu_0 H \quad (2.19)$$

Donde:

- C es una constante igual a 1.0, 1.16 o 0.95 dependiendo de si el fluido portador es aceite de hidrocarburo, agua o aceite de silicona respectivamente.
- ϕ es la fracción de volumen de partículas de hierro.

Estas ecuaciones proporcionan una descripción conveniente y práctica de las propiedades de prácticamente cualquier MRF.

Modelo Plástico de Bingham

Otro modelo utilizado comúnmente para describir el comportamiento dependiente del campo magnético de los MRF, es el modelo plástico de Bingham. Según este modelo la viscosidad plástica del fluido permanece aproximadamente constante y el esfuerzo de cizallamiento que se tiene que sobrepasar para iniciar el flujo es su resistencia total a la fluencia. Es decir, se requiere aplicar un esfuerzo mayor que su resistencia total al flujo para que el fluido comience a fluir. La resistencia total al flujo $\tau_{T(H)}$ viene dado por [25, 41, 42]:

$$\tau_{T(H)} = \tau_{y(H)} + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.20)$$

Donde:

- $\tau_{y(H)}$ es el esfuerzo cortante del fluido controlado por el campo magnético y está definido por el punto de intercepción de la recta de regresión lineal.
- η_p es la viscosidad plástica obtenida de la pendiente de la recta de regresión lineal del esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación.
- $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte.

El comportamiento de los MRF se resume mediante la gráfica τ_T en función de $\dot{\gamma}$, mostrada en la figura 2.21.

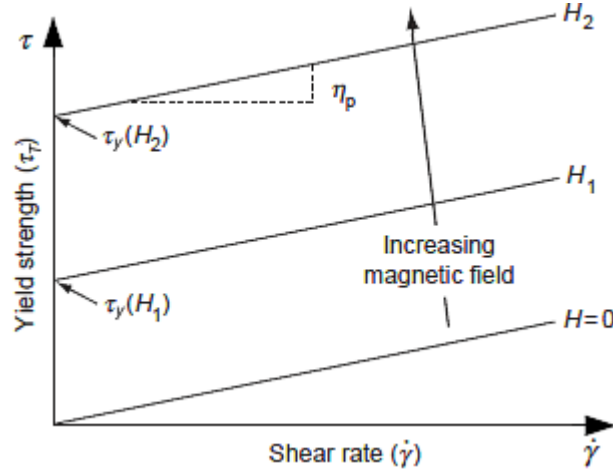


Figura 2.21. Comportamiento de MRF en un modelo idealizado Bingham [21].

Modelo Bi-viscoso

Para el análisis de los dispositivos que utilizan MRF y funcionan en el modo de aplastamiento, la ecuación que gobierna la resistencia total a la fluencia puede generalizarse mediante el modelo bi-viscoso [41, 42]:

$$\tau_{T(H)} = \begin{cases} \tau_{y(H)} + \eta_p \dot{\gamma} & |\tau| > \tau_1 \\ \eta_r \dot{\gamma} & |\tau| < \tau_1 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\tau_{y(H)} = \tau_1 \left(1 - \frac{\eta_p}{\eta_r} \right) \quad (2.22)$$

Donde:

- η_r y η_p son las viscosidades relacionadas con las propiedades del fluido en la zona elástica y en la zona viscosa respectivamente y se obtienen a partir de la pendiente de la recta de regresión lineal del esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación obtenida para cada zona, como se ilustra en la figura 2.22.
- τ_1 es el esfuerzo al corte del fluido antes de la fluencia.

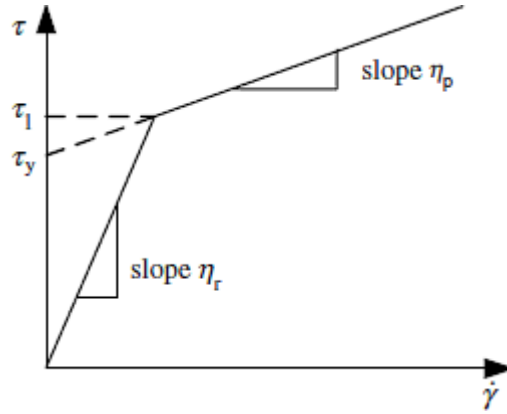


Figura 2.22. Comportamiento de los MRF en un modelo bi-viscoso [41].

Modelo de Herschel–Bulkley

Para el caso en que el fluido magnetoreológico experimenta espesamiento o adelgazamiento por corte después del punto de fluencia, como se muestra en la figura 2.23, especialmente cuando se somete a altas velocidades de corte, el modelo plástico de Bingham puede resultar en una sobreestimación [43]. En este caso, el modelo de Herschel-Bulkley resulta más adecuado y se expresa como [25, 42]:

$$\tau_{T(H)} = \tau_{y(H)} + K\dot{\gamma}^n \quad (2.23)$$

Donde:

- K es el factor de consistencia.
- n es el índice de comportamiento del flujo y se define por el exponente de la curva de tendencia potencial.

Para $n > 1$, la ecuación 2.23 representa un fluido de adelgazamiento por corte, mientras que los fluidos de engrosamiento por corte se describen con $n < 1$. Para $n = 1$ el modelo de Herschel-Bulkley se reduce al modelo plástico de Bingham [43].

Si $\tau_T > \tau_{y(H)}$ el MRF se comporta como un fluido, de lo contrario se comporta como un sólido [25].

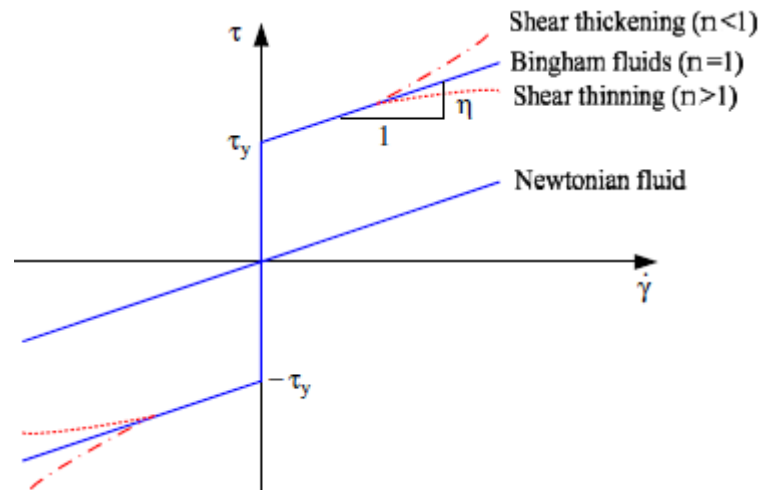


Figura 2.23. Comportamiento de MRF en un modelo de Herschel-Bulkley [41].

2.5 Categorías Fundamentales

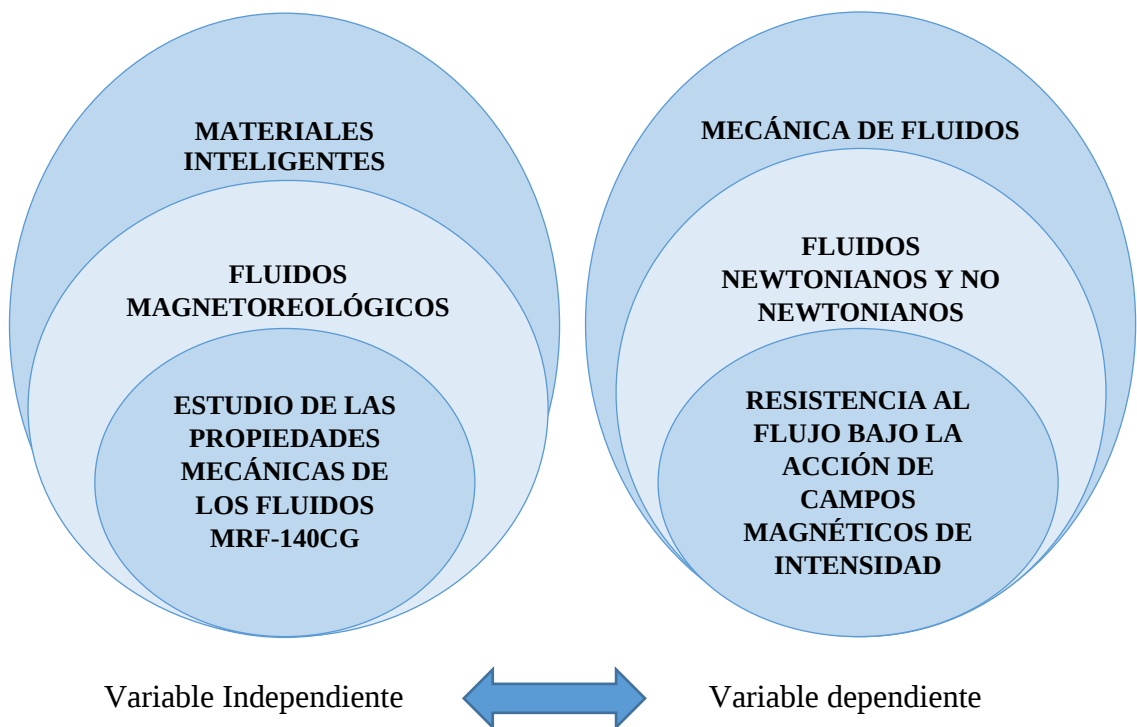


Figura 2.24. Red de categorías fundamentales

2.6 Hipótesis

Mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG se determinará que su resistencia al flujo aumenta cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos de mayor intensidad.

2.7 Señalamiento de Variables

2.7.1 Variable Independiente

Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG

2.7.2 Variable Dependiente

Resistencia al flujo bajo la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable

2.7.3 Término de Relación

Incidencia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo un enfoque cuantitativo y cualitativo. El enfoque cuantitativo se aplicó en la recopilación de información, análisis e interpretación de resultados debido a que trabajó con valores numéricos, mientras que, el enfoque cualitativo fue aplicado en lo que respecta al análisis del comportamiento de los fluidos magnetoreológicos por la necesidad de dar un valor significativo y comprender de una mejor manera los resultados.

3.2 Modalidad Básica de la Investigación

Este estudio fue desarrollado bajo las modalidades de investigación: documental, bibliográfica y de campo, con un alcance descriptivo y correlacional, debido a que para determinar la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos fue necesario la medición de distintas variables *in situ*, la utilización de hojas de especificaciones; así como también, la recopilación de información de diversas fuentes bibliográficas, con el fin de evaluar sus propiedades bajo la acción de diferentes campos magnéticos, para finalmente proponer el diseño de un dispositivo mecánico que se adapte a los requerimientos de la aplicación.

3.2.1 Documental

Para recopilar, organizar y evaluar la información existente sobre estudios, definiciones y teorías, referentes a determinar las propiedades de los fluidos magnetoreológicos, se aplicó una investigación de carácter documental, con el propósito de obtener un conocimiento completo de toda la información existente susceptible de ser utilizada en la presente investigación y así sustentar y fundamentar teóricamente el problema de investigación.

3.2.2 Bibliográfica

Mediante la investigación bibliográfica se recolectó la información necesaria acerca de las características y modos de operación de los fluidos magnetoreológicos y los métodos para determinar sus propiedades y su resistencia al flujo, a través de diversas fuentes bibliográficas como: textos, artículos científicos, tesis de posgrado y páginas de internet, relacionadas con el objeto de estudio.

3.2.3 De Campo

También se aplicó la investigación de campo debido a que se mantuvo un contacto directo con el objeto en estudio al momento de realizar las mediciones y observaciones en las instalaciones de los laboratorio donde se desarrollaron las diferentes pruebas y ensayos de cada una de las muestras de fluido magnetoreológico, para establecer causas y efectos, de tal manera que se pudo determinar de forma precisa la incidencia del campo magnético en la resistencia al flujo de los fluidos magnetoreológicos y así se logró una investigación sustentada.

3.3 Nivel o Tipo de Investigación

3.3.1 Descriptivo

Fue realizada una investigación de nivel descriptivo porque se procedió a buscar y recolectar toda la información relacionada con las propiedades de los fluidos magnetoreológicos; se clasificó y analizó esta información; y finalmente se identificó y describió la relación que existe entre estas variables y la resistencia al flujo de estos materiales, demostrando así su causa - efecto

3.3.2 Experimental

También se desarrolló una investigación experimental debido a que de forma experimental se estableció la relación que existe entre la variable independiente y la variable dependiente, es decir, se manipuló la variable independiente y se evaluó las consecuencias sobre la variable dependiente. En el caso específico del presente

estudio se manipularon diferentes variables como: intensidad y dirección del campo magnético; temperatura de operación, velocidad de corte, etc., y luego se determinaron los resultados que causaron en la resistencia al flujo de los MRF.

3.3.3 Asociación de variables

Para desarrollar de forma adecuada la investigación fue necesario asociar las variables y de esta manera se pudo determinar en qué medida los campos magnéticos de intensidad variable inciden en el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población es un conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones o pertenece a una misma clase, con la diferencia que se refiere a un conjunto limitado por el ámbito del estudio a realizar [44].

Por lo tanto, la población relacionada con la investigación constituye los diferentes tipos de los fluidos magnetoreológicos disponibles en el mercado.

3.4.2 Muestra

La muestra es un subgrupo de la población de interés, que tiene que delimitarse de antemano con precisión, sobre la cual se recolectarán datos y deberá ser representativo de la población [44].

En base a lo que establece la norma DIN-53018 y las especificaciones del equipo utilizado para los ensayos, para el desarrollo de la investigación se utilizaron veinte muestras de fluido MRF-140CG, las mismas que fueron sometidas a ensayos de laboratorio con cinco intensidades de campos magnéticos diferentes, cuatro niveles de temperatura y cincuenta velocidades de cizallamiento.

$$n = 20$$

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.5.1 Variable Independiente: Estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG

Tabla 3.1. Operacionalización de la variable independiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADOR	ÍTEMES	TÉCNICAS INSTRUMENTOS
Las propiedades mecánicas de los materiales son las características inherentes, que permiten diferenciar un material de otro y se refieren a la capacidad de los mismos para resistir acciones de cargas o fuerzas que se ejercen sobre ellos.	Propiedades físicas	Densidad Fracción de volumen de partículas Temperatura	¿Qué propiedades físicas se alteran al variar el campo magnético?	Ensayos de laboratorios Registro de ensayos de laboratorio Hoja de toma de datos
	Propiedades reológicas	Tensión de fluencia Esfuerzo cortante Fluencia plástica	¿Cuánto varían las propiedades reológicas al modificar el campo magnético?	Ensayos de laboratorios Registro de ensayos de laboratorio Hoja de toma de datos

3.5.2 Variable Dependiente: Resistencia al flujo bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable

Tabla 3.2. Operacionalización de la variable dependiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADOR	ÍTEMES	TÉCNICAS INSTRUMENTOS
La resistencia al flujo o resistencia al movimiento de un fluido es la resistencia que presentan dos capas adyacentes moviéndose dentro del fluido, por lo que parte de la energía cinética del fluido se convierte en energía interna [31].	Campos magnéticos	Densidad de flujo magnético Intensidad del campo magnético Dirección del campo magnético	¿Qué tipos de campos magnéticos inciden en la resistencia al flujo de los MRF?	Ensayos de laboratorios Registro de ensayos de laboratorio Hoja de toma de datos
	Fluido Newtoniano - estado líquido del MRF Fluido no Newtoniano - estado semisólido del MRF	Velocidad de cizallamiento Viscosidad Rapidez de deformación Resistencia a la fluencia Fuerza de resistencia viscosa	¿Cuánto varían las propiedades del fluido al modificar el campo magnético?	Cálculos y ecuaciones Hojas electrónicas

3.6 Recolección de la Información

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación a continuación se detallan los métodos, procedimientos e instrumentos utilizados para evaluar las diferentes variables de la investigación:

3.6.1 Información para Determinar las Propiedades del Fluido MRF-140CG

La recopilación de datos para determinar las propiedades mecánicas de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG que varían bajo la acción de campos magnéticos de diferente intensidad, se desarrolló mediante las actividades que se describen a continuación:

Revisión bibliográfica

En esta etapa de la investigación, la recolección de la información se realizó a través de diversas fuentes bibliográficas como: artículos científicos, tesis de posgrado, patentes, textos, fichas técnicas y páginas de internet, relacionadas con el objeto de estudio.

Mediante la revisión de estos documentos y el uso de diferentes herramientas como resúmenes y fichas nemotécnicas, se extrajo la información relevante para establecer cuáles son las principales propiedades que influyen en el comportamiento de los fluidos magnetoreológicos MRF-140CG cuando se encuentran bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable.

- Densidad
- Viscosidad aparente
- Viscosidad plástica
- Esfuerzo cortante
- Límite de resistencia a la fluencia
- Resistencia viscosa
- Temperatura
- Velocidad de cizallamiento

Ensayos de laboratorio

Para determinar las propiedades del fluido MRF-140CG, se realizaron diferentes ensayos a las muestras de fluido, en el Laboratorio del Departamento de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Mondragón Unibertsitatea - España.

De acuerdo con lo que establece la norma DIN-53018 y las especificaciones del equipo de laboratorio utilizado para la caracterización de los MRF, las pruebas del fluido se realizaron bajo los siguientes parámetros:

- Temperatura: 20°C, 30°C, 40°C y 50°C
- Campo magnético: 0 mT, 200 mT, 400 mT, 600 mT y 800 mT
- Velocidad de cizallamiento: 0 a 350 rad/s

Para controlar la temperatura de las muestras, durante las pruebas de flujo, se utilizó el sistema de baño termostático Julabo F-25, mostrado en la figura 3.1, el mismo que permite la aplicación y control de temperatura en sistemas externos con una estabilidad menor a $\pm 0.1^\circ\text{C}$



Figura 3.1. Sistema para baño termostático Julabo F-25.

Las propiedades del fluido MRF-140CG se determinaron mediante el reómetro rotacional Anton Paar Physica MCR-501, mostrado en la figura 3.2, cuyas mediciones se controlan y analizan según la norma DIN-53018 implementada en el software RheoPlus del reómetro. El reómetro permite aplicar con precisión torques, fuerzas y velocidades de corte dentro de un amplio rango, pero con el fin de evitar el espacimamiento de las muestras, los ensayos se realizaron hasta una velocidad máxima de cizallamiento de 350 s^{-1} .

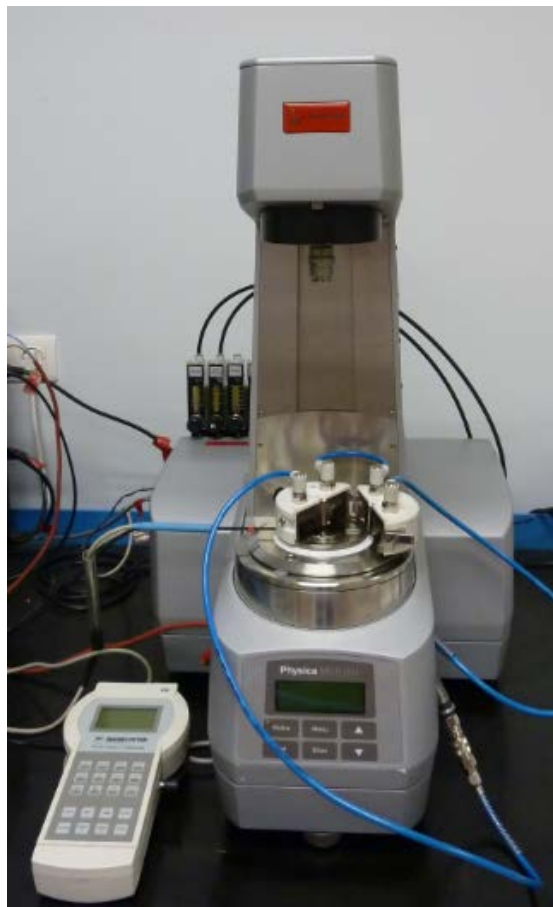


Figura 3.2. Reómetro rotacional Anton Paar Physica MCR-501 equipado con célula magnetoreológica.

Al reómetro se encuentra acoplado el dispositivo magnetoreológico MRD-70/1Text de Anton Paar, mostrado en la figura 3.3, que es un accesorio especial utilizado para la aplicación y control de campos magnéticos que permite el análisis e la investigación de la influencia de los campos magnéticos sobre los MRF y los ferrofluidos.

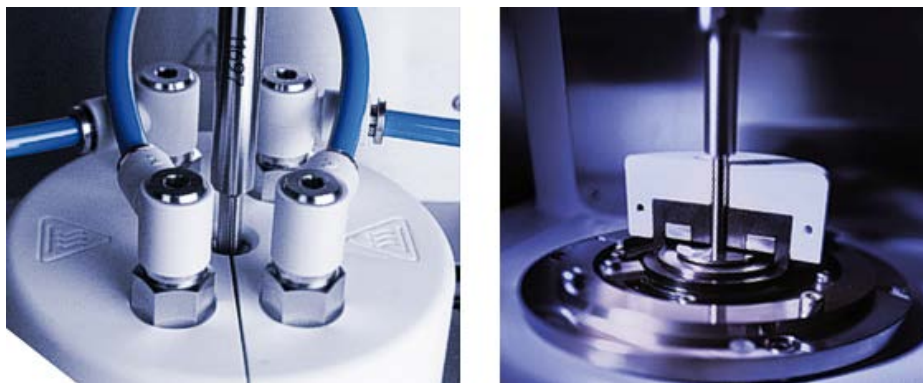


Figura 3.3. Célula magnetoreológica MRD-70/1Text

El dispositivo MRD-70/1Text puede generar en el entrehierro una densidad de flujo magnético máximo de 1 Tesla (1000 mT), pero debido a que la intensidad del flujo magnético disminuye hasta la cámara de prueba, los ensayos se realizaron con campos magnéticos desde 0 T hasta un máximo de 800 mT, con incrementos de 200 mT en cada prueba. La densidad de flujo magnético se controla a través del software del reómetro y se puede ajustar de acuerdo a las necesidades.

El reómetro MCR-501 permite el uso de diferentes geometrías de medición, pero la célula magnetoreológica MRD-70/1Text, tiene un único sistema de medición con placas paralelas de 20 mm de diámetro (PP20/MRD/TI/P2) de metal no magnetizable, para evitar que fuerzas magnéticas radiales actúen sobre el eje de medición y afecten los resultados del ensayo.

Teniendo en cuenta que los MRF no tiene un comportamiento Newtoniano y que el estado tensional no es constante en toda la muestra, la conversión de los parámetros físicos del reómetro (ángulo de giro, velocidad de giro y par) a los parámetros reológicos (deformación, velocidad de deformación y tensión) se realizaron utilizando la conversión de Rabinowitsch [44].

La información obtenida de las observaciones y mediciones desarrolladas en el laboratorio y los datos que el reómetro entregó como resultado de los ensayos realizados a las muestras de fluido MRF-140CG, fue registrada y archivada por medio de fotografías, libretas de apuntes, archivos digitales en hojas de cálculo e informes de laboratorio de los fenómenos observados, para su posterior procesamiento y análisis.

3.6.2 Información para Seleccionar el Modelo Dinámico

Diferentes autores han propuesto varios modelos teóricos para predecir el comportamiento dinámico de los MRF y cada uno de estos modelos puede ser más preciso que el otro, dependiendo del modo de operación y del tipo de dispositivo en el que se utilizarán los MRF.

Por este motivo, para realizar el análisis de flujo teórico de los MRF es importante seleccionar el modelo que mejor se adapta a nuestra aplicación específica.

Revisión bibliográfica

Para seleccionar el modelo que predice con mayor precisión el comportamiento dinámico de los fluidos MRF-140CG, la recolección de la información se realizó a partir de la revisión de diversas fuentes bibliográficas como: artículos científicos, tesis de posgrado, textos y páginas de internet. Estas fuentes bibliográficas fueron analizadas y luego mediante resúmenes y fichas nemotécnicas se extrajo la información relacionada con los modelos teóricos de los MRF para su posterior validación experimental.

Ensayos de laboratorio

Con el fin de validar la precisión del modelo dinámico seleccionado se evaluó el comportamiento del dispositivo MRF diseñado, para lo cual se realizaron 10 pruebas de laboratorio del amortiguador magnetoreológico, de acuerdo con las normas ISO 2954, en el banco de pruebas Dyno-Shock 11, mostrado en la figura 3.4, en el Área de Ensayos e Inspecciones del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero del H. Gobierno Provincial de Tungurahua.

La metodología utilizada para realizar los ensayos en el amortiguador magnetoreológico, permitió evaluar su comportamiento dinámico y su desempeño bajo condiciones pre-establecidas dentro de un ambiente controlado, en base a los resultados numéricos y las gráficas de fuerzas de compresión y extensión en función del desplazamiento y la velocidad, obtenidos para las diferentes intensidades de campo magnético a las que fue sometido.



Figura 3.4. Banco de pruebas para amortiguadores Dyno-Shock 11.

Se realizaron dos tipos de ensayos en el banco de pruebas Dyno-Shock 11, de acuerdo con los parámetros descritos en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3. Prueba a velocidad fija

PARÁMETRO	VALORES
Desplazamiento	40 mm
Frecuencia	1 Hz
Velocidad	125 mm/s
Temperatura	25°C
Velocidad de calentamiento	200 mm/s
Campo magnético	

Tabla 3.4. Prueba a velocidad variable

PARÁMETRO	VALORES
Desplazamiento	40 mm
Frecuencia variable	(1,59; 3,18; 4,77 y 6,37) Hz
Velocidad variable	(200; 400; 600 y 800) mm/s
Temperatura	25°C
Velocidad de calentamiento	200 mm/s
Campo magnético	

3.6.3 Información para Evaluar la Resistencia al Flujo del MRF-140CG

La información necesaria para determinar la resistencia al flujo que presentan los fluidos MRF-140CG cuando sobre ellos actúan campos magnéticos de diferente intensidad, se recopiló y procesó los datos de los ensayos de laboratorio mediante hojas de Excel donde se realizaron gráficos y cálculos de la resistencia al flujo a partir de las ecuaciones de la sección 2.4.

3.7 Procesamiento y Análisis de la Información

3.7.1 Plan de Procesamiento

La información recopilada a través de las diversas fuentes bibliográficas será seleccionada y los más relevante relacionadas con el objeto de estudio se archivará en fichas nemotécnica para el sustento científico de la investigación.

La información obtenida por medio de la observación, la toma de datos de las pruebas de laboratorio y las mediciones realizadas con los diferentes instrumentos durante cada ensayo, serán procesadas en tablas y hojas electrónicas, mediante las cuales se realizarán cálculos para su posterior análisis e interpretación.

También se generarán gráficos y se desarrollarán simulaciones a través de software relacionado con tratamiento de información con el objetivo de establecer patrones de comportamiento y operación del objeto en estudio, de manera que se pueda generar conclusiones y sustentar los resultados obtenidos en el presente estudio.

3.7.2 Plan de Análisis e Interpretación de Resultados

El análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación se realizará mediante el procedimiento que se describe a continuación:

- Tabulación de los datos de acuerdo a la necesidad y a la relación que tengan con las variables de la hipótesis.

- Representación de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio a través de tablas, gráficos y simulaciones por computador.
- Análisis estadístico descriptivo y análisis inferencial para interpretar los resultados y obtener las proyecciones necesarias con el fin de establecer la factibilidad técnica de diseñar un dispositivo mecánico aplicando fluidos magnetoreológicos.
- Análisis de la hipótesis en relación con los resultados obtenidos para verificarla o rechazarla.
- Establecimiento de conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados de las Propiedades del Fluido MRF-140CG

En base al Marco Teórico descrito en el capítulo II y mediante la aplicación de la Metodología establecida en el capítulo anterior, se obtienen los resultados de los diferentes parámetros que influyen en el fenómeno en estudio para luego analizar e interpretar dichos resultados con el propósito de valorar de forma precisa todas las variables que intervienen en la investigación.

En el Anexo 2, se muestran todos los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio en la Escuela Politécnica Superior de Mondragon, mediante el reómetro Anton Paar Physica MCR-501 y el dispositivo magnetoreológico MRD-70/1Text.

4.1.1 Resultados para la Viscosidad Aparente

Las mediciones de viscosidad aparente sin campo magnético, mostradas en el Anexo 3, se grafican mediante una hoja de cálculo y se presenta en la figura 4.1:

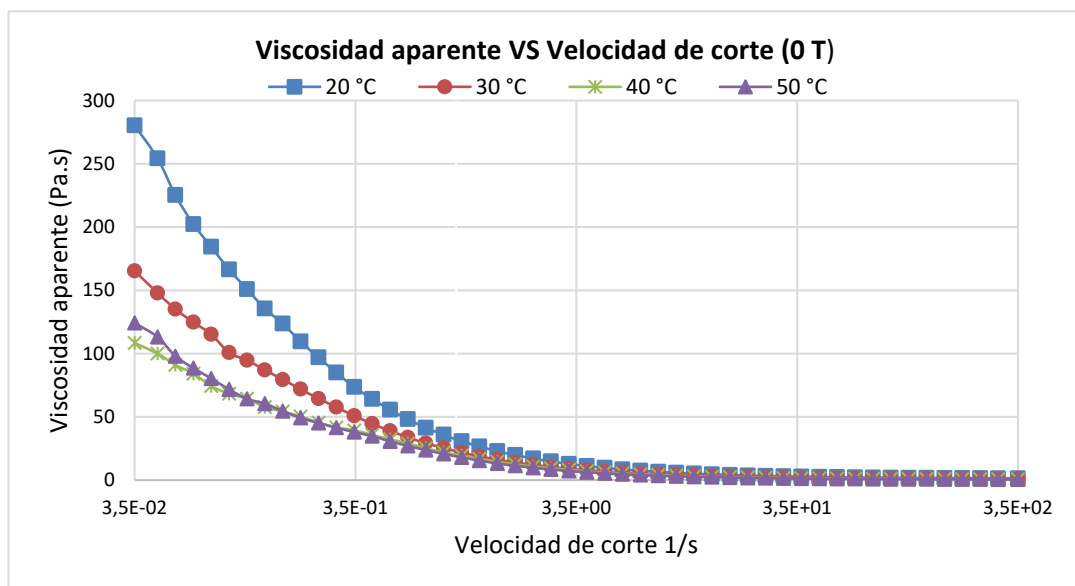


Figura 4.1. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 0 T.

Con el fin de describir las características de los datos de los ensayos, estos se procesan mediante técnicas de estadística descriptiva y se obtienen sus medidas de tendencia central que se muestran a continuación:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	51,491	32,684	23,407	23,939
Desviación estándar	74,341	44,979	29,941	32,588
Rango	279,034	164,495	107,713	123,675
Mínimo	1,286	0,836	0,651	0,499
Máximo	280,320	165,332	108,364	124,173

Para comparar y analizar los resultados obtenidos, los mismos se presentan en el gráfico de barras mostrado en la figura 4.2.

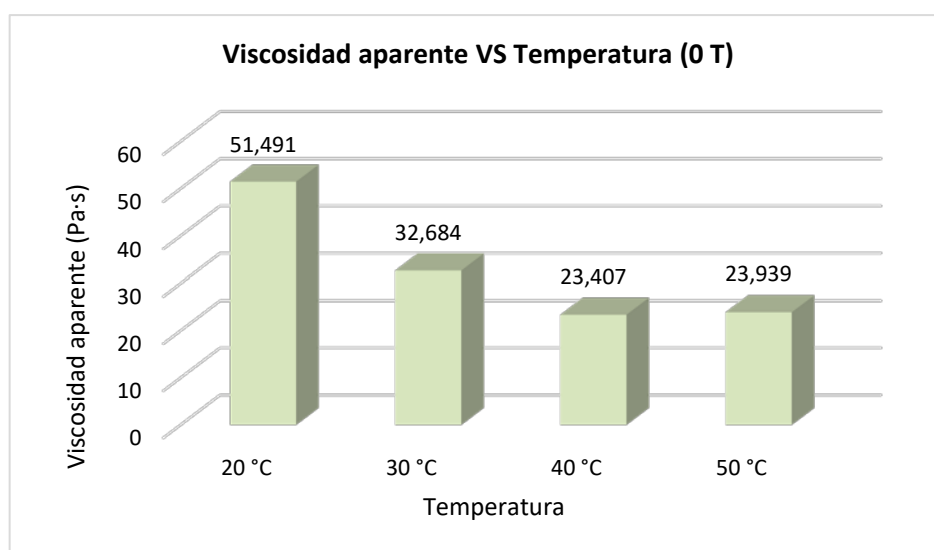


Figura 4.2. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 0 T.

Mediante el análisis de las figuras 4.1 y 4.2 se determina que, en ausencia de campo magnético la viscosidad aparente del fluido MRF-140CG, disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte hasta alcanzar una velocidad de 10 s^{-1} aproximadamente, superada esta velocidad la viscosidad aparente se mantiene casi constante.

De manera semejante la viscosidad aparente disminuye con el aumento de temperatura. Sin embargo, esta reducción en la viscosidad se vuelve menos evidente cuando la temperatura sobrepasa los 40°C.

Viscosidad aparente a 200 mT.

Mediante el mismo procedimiento anterior se procesan y analizan los datos de viscosidad aparente cuando se aplica un campo magnético de 200 mT.

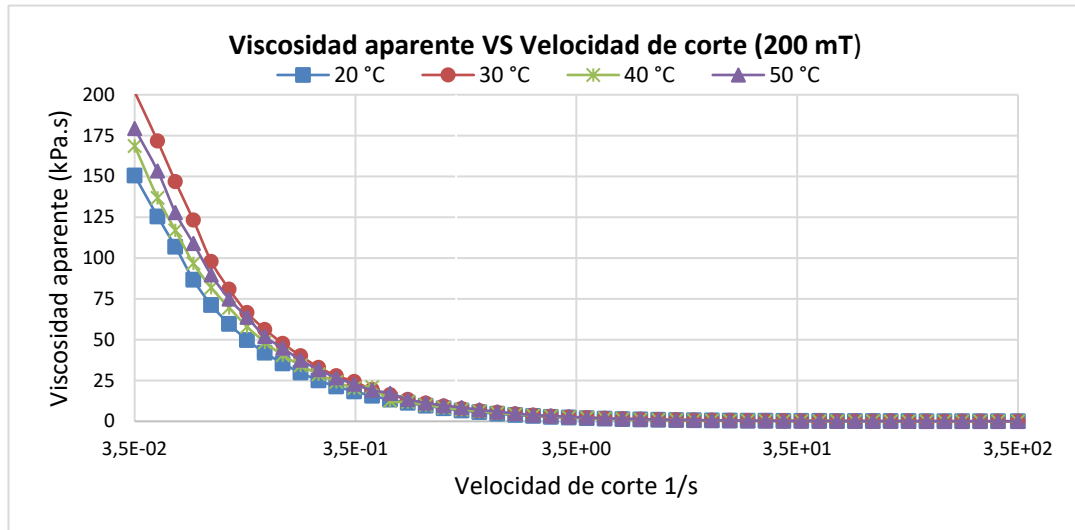


Figura 4.3. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 200 mT.

Las medidas de tendencia central para la viscosidad aparente a 200 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	18,418	24,694	20,668	22,671
Desviación estándar	34,303	46,892	38,292	41,788
Rango	150,504	201,740	168,634	179,287
Valor mínimo	0,039	0,037	0,032	0,035
Valor máximo	150,543	201,777	168,666	179,322

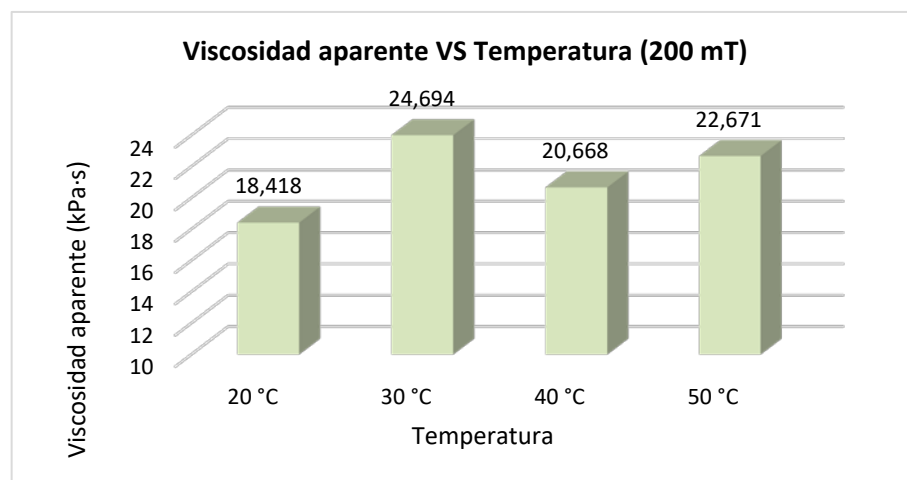


Figura 4.4. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 200 mT.

En las figuras 4.3 y 4.4 se aprecia que para un campo magnético de 200 mT la viscosidad aparente del fluido aumenta significativamente por efecto del campo hasta un valor máximo de 201,777 kPa.s a 30°C. Sin embargo, este valor disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte y se estabiliza cuando alcanza un valor de 10 s^{-1} aproximadamente.

También se observa que la temperatura no produce mayor efecto en la viscosidad aparente y por este motivo las curvas que se generan para las cuatro temperaturas de prueba, son muy semejantes entre sí

Viscosidad aparente a 400 mT.

Cuando se aplica un campo magnético de 400 mT la viscosidad aparente es:

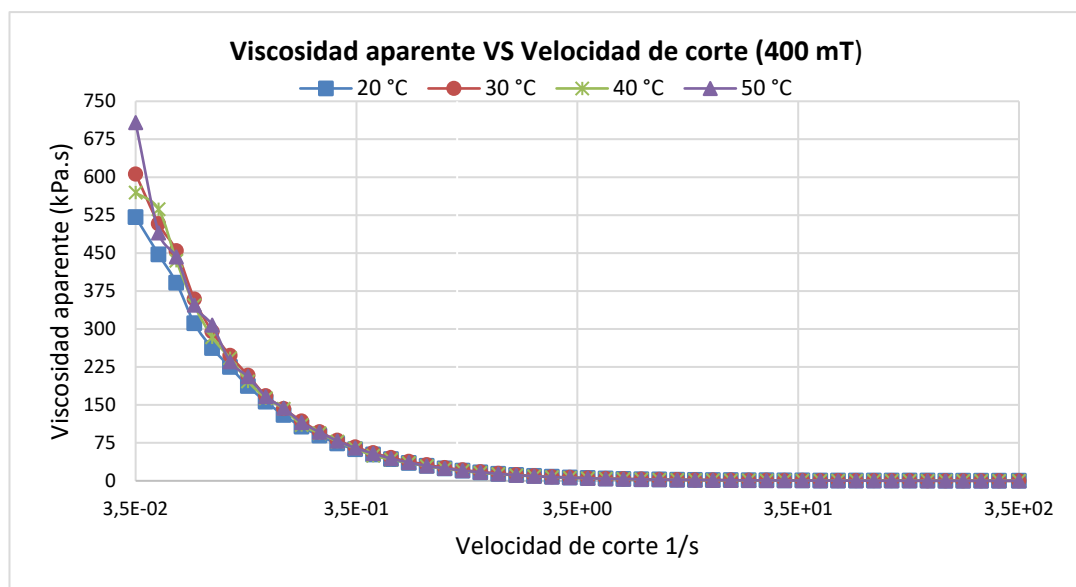


Figura 4.5. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 400 mT.

Las medidas de tendencia central de la viscosidad aparente a 400 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	65,250	73,386	71,042	74,109
Desviación estándar	122,997	141,100	138,045	147,489
Rango	520,884	606,061	569,656	707,905
Valor mínimo	0,083	0,075	0,068	0,070
Valor máximo	520,967	606,137	569,724	707,974

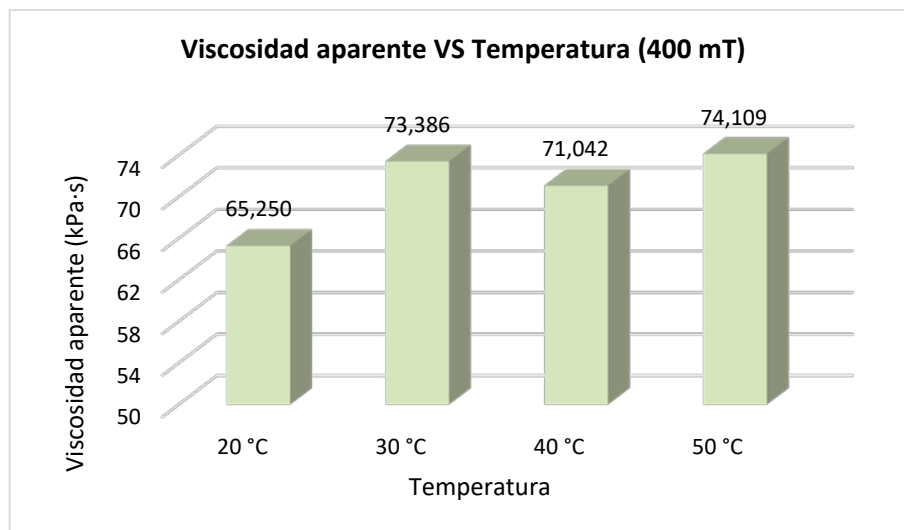


Figura 4.6. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 400 mT.

Del análisis de las figuras 4.5 y 4.6 se determina que a medida que se incrementa la intensidad del campo magnético también aumenta la viscosidad aparente del fluido alcanzando un valor máximo de 707,974 kPa.s a 50°C. Las curvas de viscosidad aparente en función de la velocidad de corte tienen un comportamiento semejante a lo ocurrido a 200 mT.

Viscosidad aparente a 600 mT.

Para un campo magnético de 600 mT se tiene:

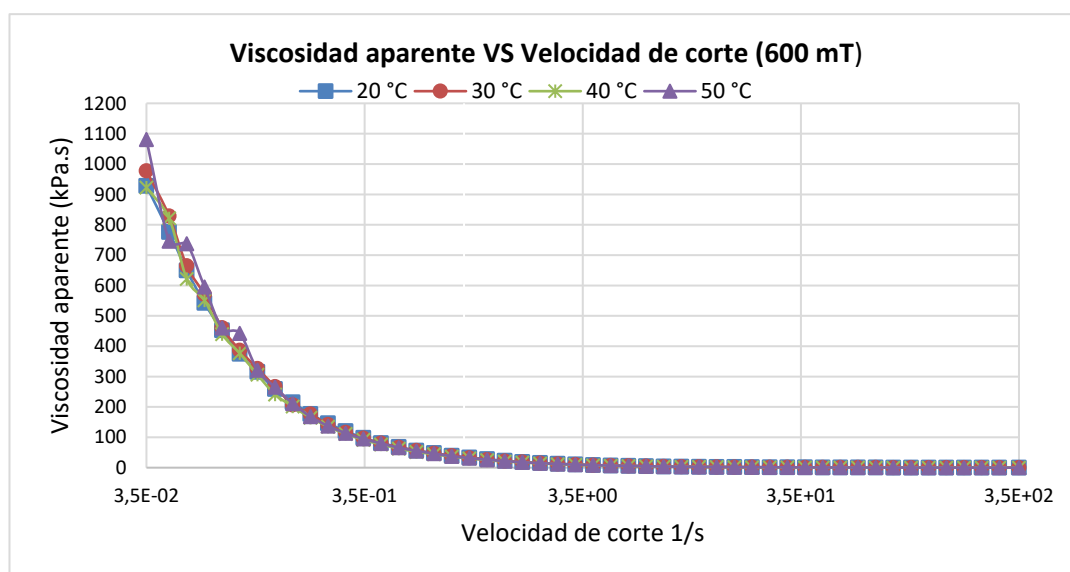


Figura 4.7. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 600 mT.

Las medidas de tendencia central de la viscosidad aparente a 600 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	110,766	113,939	108,611	116,859
Desviación estándar	212,982	223,112	213,838	232,872
Rango	927,774	977,215	922,843	1080,891
Valor mínimo	0,118	0,108	0,098	0,107
Valor máximo	927,892	977,323	922,941	1080,998

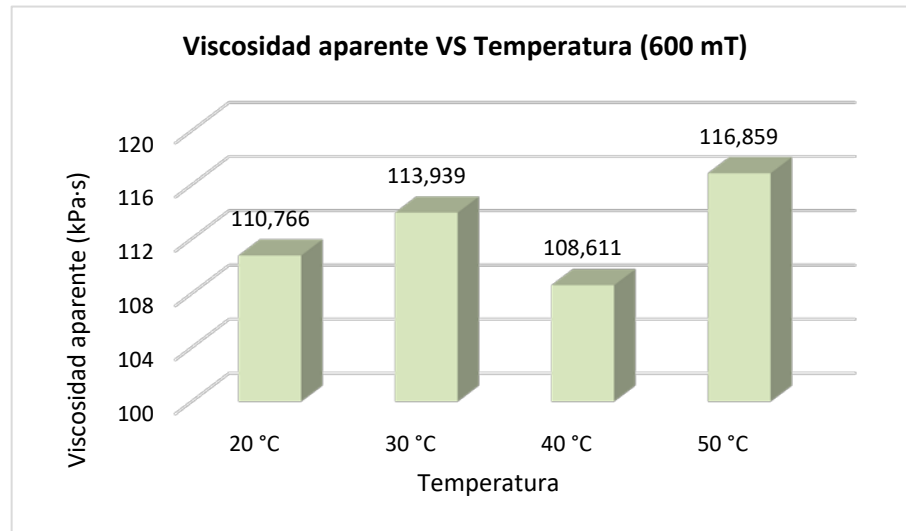


Figura 4.8. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 600 mT.

Del análisis de las figuras 4.7 y 4.8 se determina que la viscosidad aparente del fluido continúa aumentando debido a la acción del campo magnético hasta alcanzar un valor máximo de 1080,998 kPa.s a 50°C. Al igual que en los casos anteriores el valor de la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de corte y se estabiliza con velocidades superiores a 10 s^{-1} .

También se determina que, para campos magnéticos de mayor intensidad, la viscosidad aparente del fluido no es afectada por la temperatura y esto se confirma debido a que las curvas de la figura 4.7 y los valores de la figura 4.8 son semejantes.

Viscosidad aparente a 800 mT.

Finalmente, cuando se aplica la máxima intensidad de campo que permite el dispositivo magnetoreológico MRD-70/1Text inducir en el interior de la muestra de fluido, de 800 mT, se obtiene:

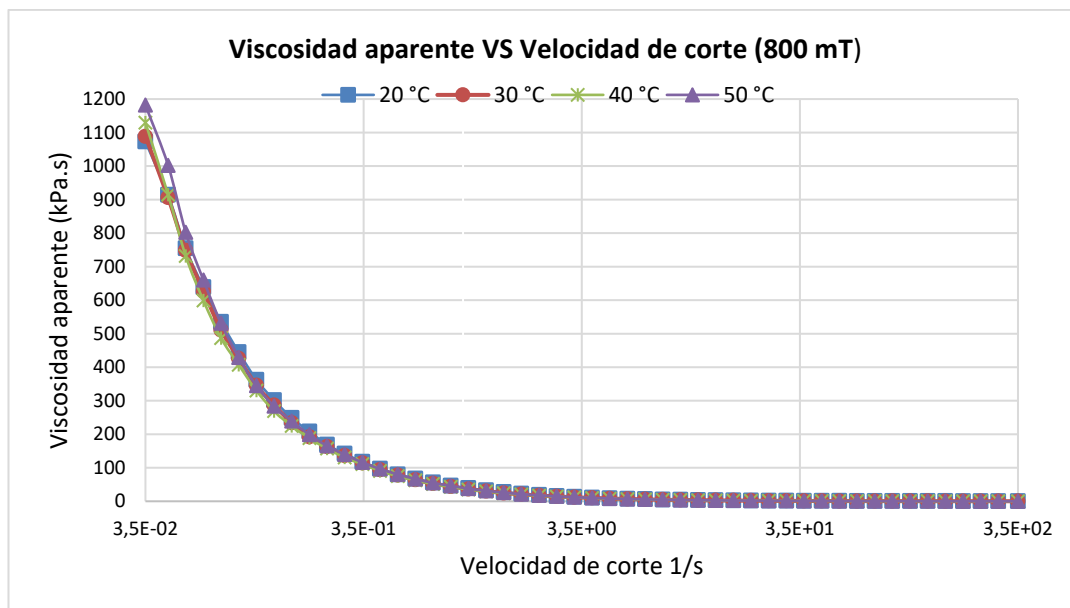


Figura 4.9. Viscosidad aparente en función de la velocidad de corte a 800 mT.

A 800 mT las medidas de tendencia central de la viscosidad aparente son:

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Media aritmética	129,644	126,469	124,068	133,119
Desviación estándar	248,515	246,602	246,864	265,190
Rango	1072,892	1088,424	1129,362	1181,808
Valor mínimo	0,137	0,126	0,113	0,121
Valor máximo	1073,029	1088,549	1129,475	1181,929

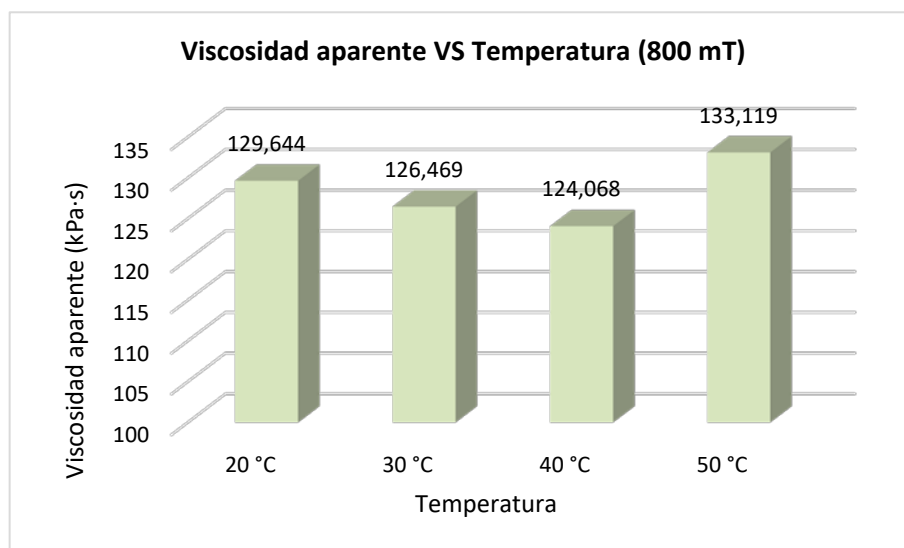


Figura 4.10. Viscosidad aparente en función de la temperatura a 800 mT.

En las figuras 4.9 y 4.10 se aprecia que para un campo de 800 mT, la viscosidad aparente aumenta hasta un valor máximo de 1181,929 kPa.s, sin embargo, este incremento es menor que en los casos anteriores. Esto demuestra que el cambio de las propiedades del fluido se reduce progresivamente hasta cuando se alcance la magnetización de saturación del fluido.

Viscosidad aparente promedio.

Del análisis de los resultados anteriores se concluye que la temperatura no tiene un efecto importante sobre la viscosidad aparente del fluido MRF-140CG.

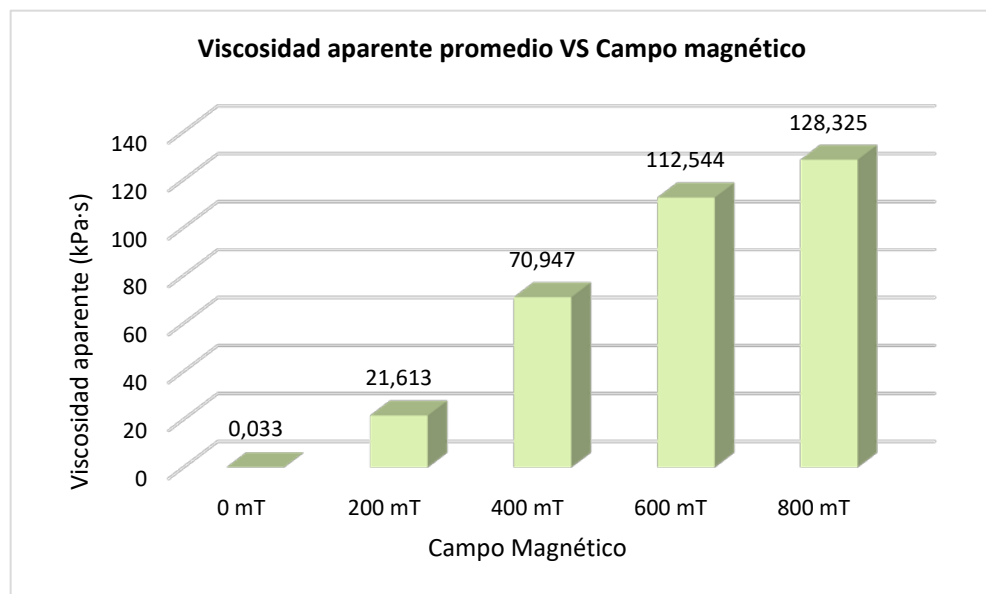


Figura 4.11. Viscosidad aparente promedio en función del campo magnético.

Mediante una hoja electrónica se calcula y grafica en la figura 4.11 los valores medios de la viscosidad aparente, para cada intensidad de campo magnético a una temperatura promedio de 30°C. De los resultados obtenidos se determina que, comparado con el estado-apagado, la viscosidad aumenta un porcentaje de 65631,74% cuando se somete a un campo magnético de 200 mT, luego el incremento es de 228,26% para 400 mT y para un campo de 600 mT el incremento es de 58,63%, finalmente a 800 mT el porcentaje de incremento en la viscosidad disminuye al 14,02%, es decir, el fluido comienza a saturarse hasta alcanzar la saturación completa a un campo magnético de 1,7 T aproximadamente (Anexo 1), a partir del cual la viscosidad aparente se mantiene constante.

4.1.2 Resultados para la Viscosidad Plástica y el Esfuerzo Cortante

Los datos de las mediciones del esfuerzo cortante en ausencia de campo magnético se grafican en una hoja de cálculo, como se muestra en la figura 4.12, y luego se encuentra la pendiente de las curvas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para cada temperatura de trabajo, con el fin de obtener la viscosidad plástica η_p del fluido en estado-apagado.

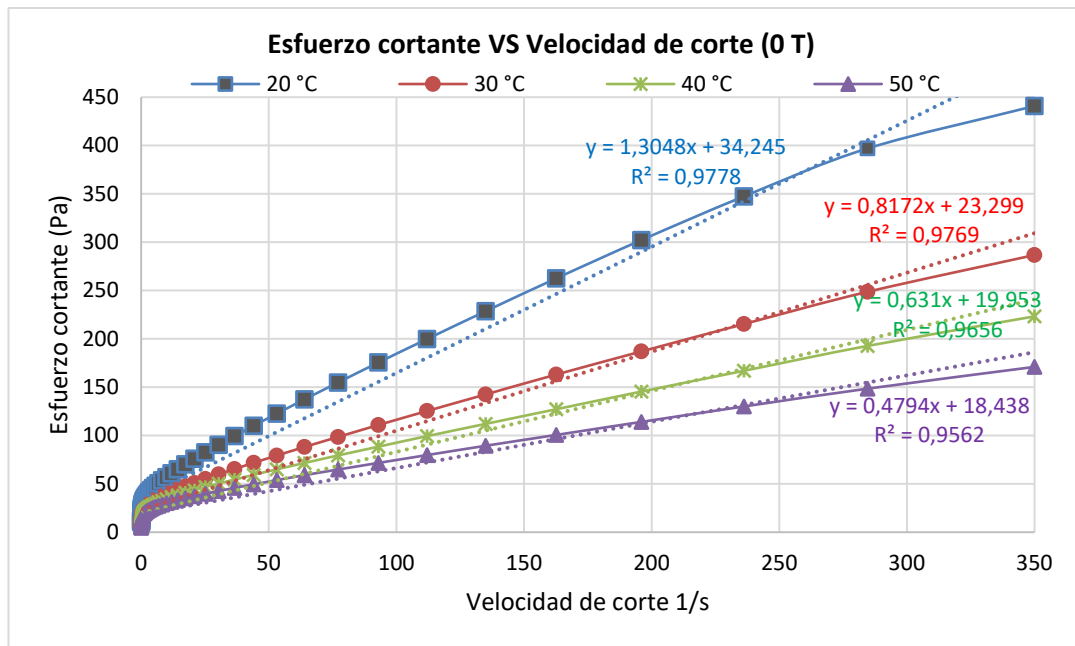


Figura 4.12. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 0 T.

Del análisis de los resultados obtenidos se determina que la viscosidad plástica, en ausencia de campo magnético, disminuye a medida que el fluido se calienta y tiene un valor promedio de 0,8081 Pa.s.

Aplicando técnicas de estadística descriptiva a los datos del Anexo 4, se obtienen las medidas de tendencia central del esfuerzo cortante (en Pa) en estado-apagado del fluido MRF-140CG y los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.13:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	87,026	56,358	45,480	37,829
Desviación estándar	103,391	64,789	50,320	38,410
Rango	430,549	280,634	219,260	166,430
Valor mínimo	10,340	6,098	4,000	4,581
Valor máximo	440,888	286,733	223,260	171,010

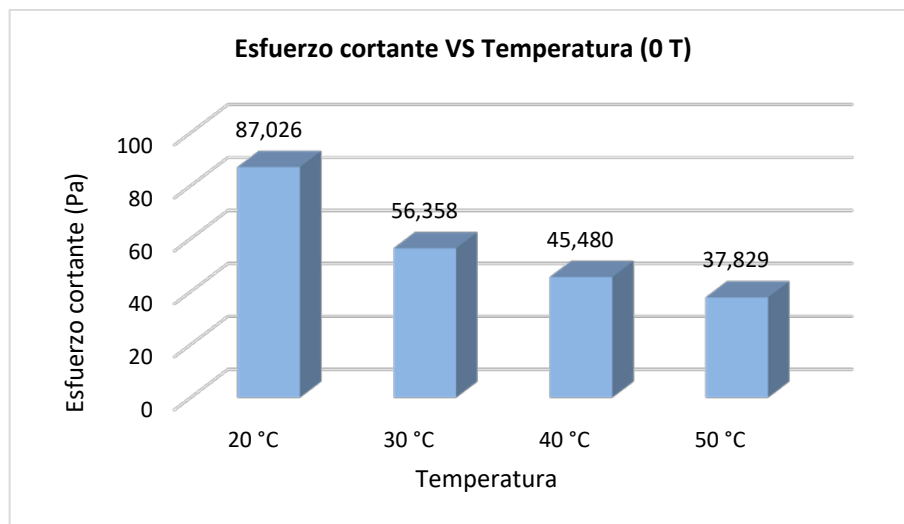


Figura 4.13. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 0 T.

En base al análisis de las figuras 4.12 y 4.13 se determina que en ausencia de campo magnético el esfuerzo cortante del fluido MRF-140CG aumenta a medida que aumenta la velocidad de corte hasta alcanzar un valor máximo de 440,88 Pa a 350 s^{-1} . Por el contrario, el esfuerzo cortante disminuye con el aumento de temperatura.

Esfuerzo cortante a 200 mT.

De forma análoga se procesan y analizan los datos obtenidos del esfuerzo cortante cuando se aplica un campo magnético de 200 mT.

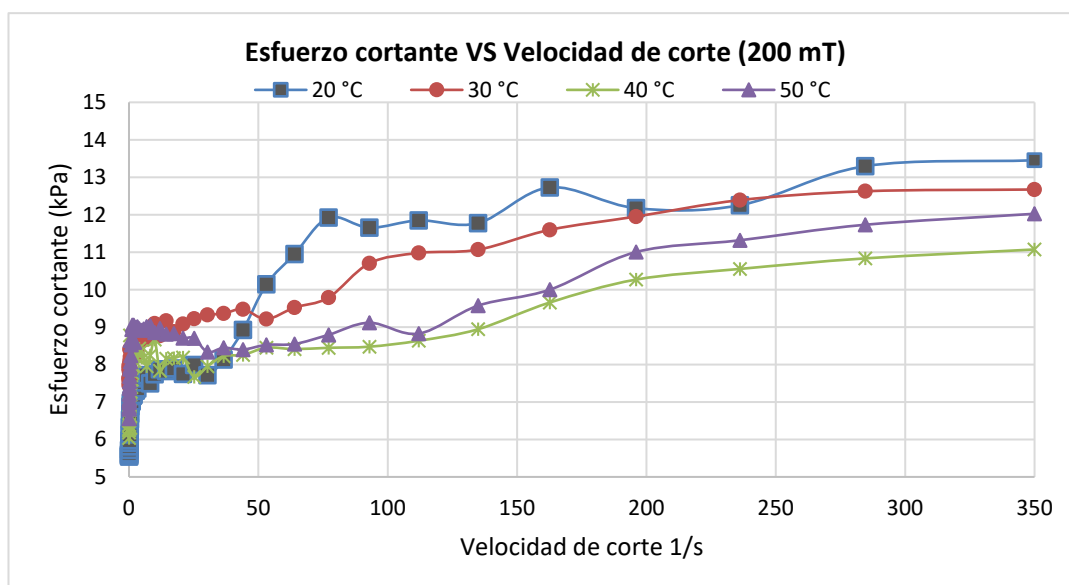


Figura 4.14. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 200 mT.

Las medidas de tendencia central para el esfuerzo cortante (en kPa) a 200 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	8,035	8,976	7,919	8,598
Desviación estándar	2,326	1,379	1,185	1,183
Rango	7,908	5,227	5,033	5,466
Valor mínimo	5,545	7,445	6,039	6,558
Valor máximo	13,453	12,672	11,072	12,024

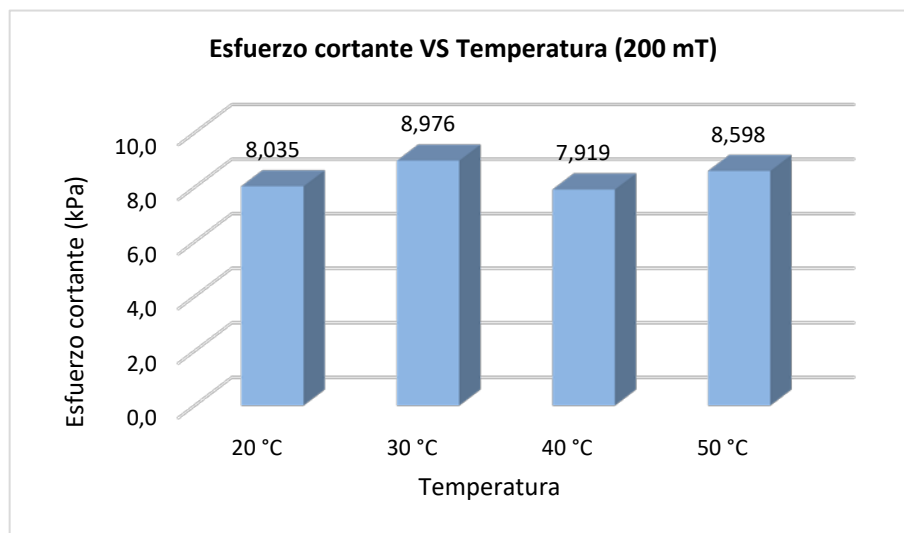


Figura 4.15. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 200 mT.

En las figuras 4.14 y 4.15 se observa bajo la acción de un campo magnético el esfuerzo cortante del fluido MRF-140CG aumenta significativamente cuando se aplica un campo de 200 mT, hasta alcanzar un valor máximo de 13,453 kPa a una temperatura de 20°C y una velocidad de corte de 350 s^{-1} .

También se observa que los valores promedio del esfuerzo cortante para las diferentes temperaturas varían desde 7,919 kPa hasta 8,598 kPa, es decir presenta un rango de variación pequeño, por lo que se concluye que la temperatura no produce efecto importante en el esfuerzo cortante cuando el fluido se encuentra bajo la acción de un campo magnético.

Viscosidad aparente a 400 mT.

Cuando se aplica un campo magnético de 400 mT el esfuerzo cortante es:

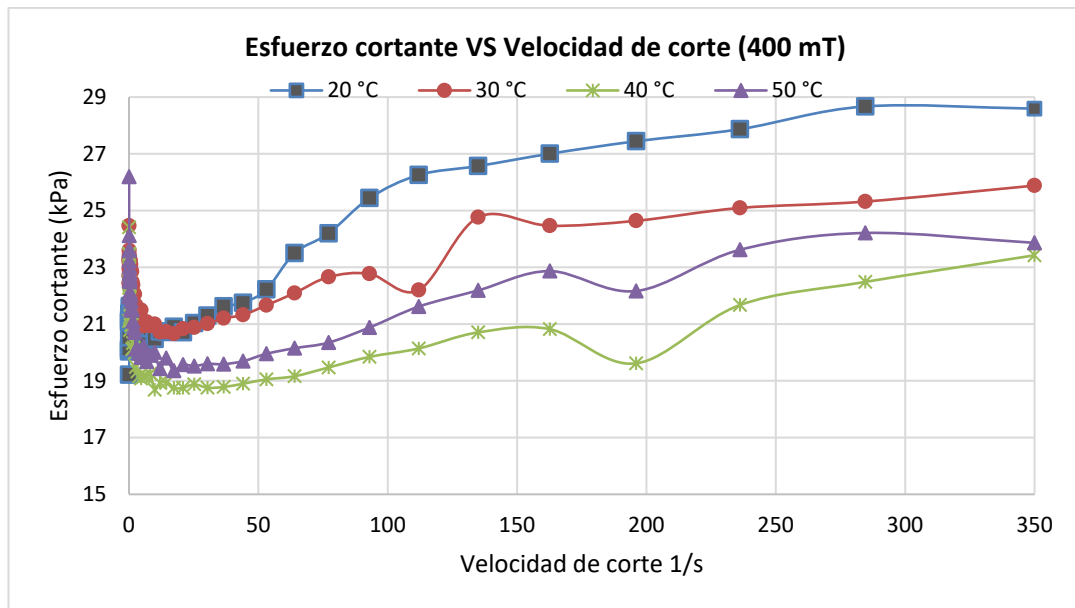


Figura 4.16. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 400 mT.

Las medidas de tendencia central del esfuerzo cortante a 400 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	22,123	22,550	20,618	21,500
Desviación estándar	2,408	1,328	1,588	1,620
Rango	9,455	5,219	5,730	6,840
Valor mínimo	19,214	20,661	18,682	19,355
Valor máximo	28,670	25,880	24,412	26,195

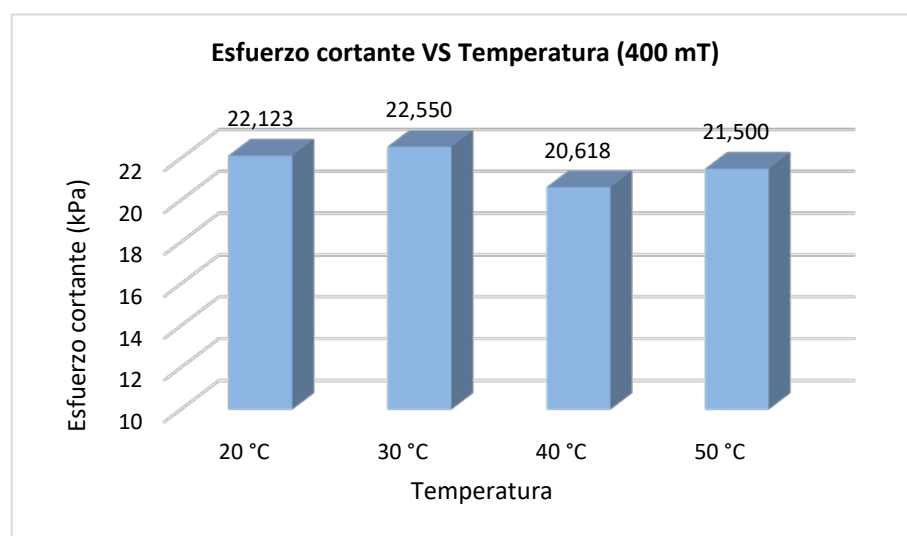


Figura 4.17. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 400 mT.

Al analizar las figuras 4.16 y 4.17 se determina que a medida que se incrementa la intensidad del campo magnético también se incrementa el esfuerzo cortante del fluido alcanzando un valor máximo de 28,67 kPa para los 400 mT. En cuanto a la velocidad de corte, se observa que la misma no tiene un efecto importante en el esfuerzo cortante a diferencia de lo que ocurría con la viscosidad aparente donde su efecto sí era muy significativo.

También se observa que cuando el fluido se encuentra bajo la acción de un campo magnético de 400 mT, la temperatura no produce un efecto importante en el esfuerzo cortante, en forma semejante al caso de 200 mT.

Viscosidad aparente a 600 mT.

Para un campo magnético de 600 mT se tiene:

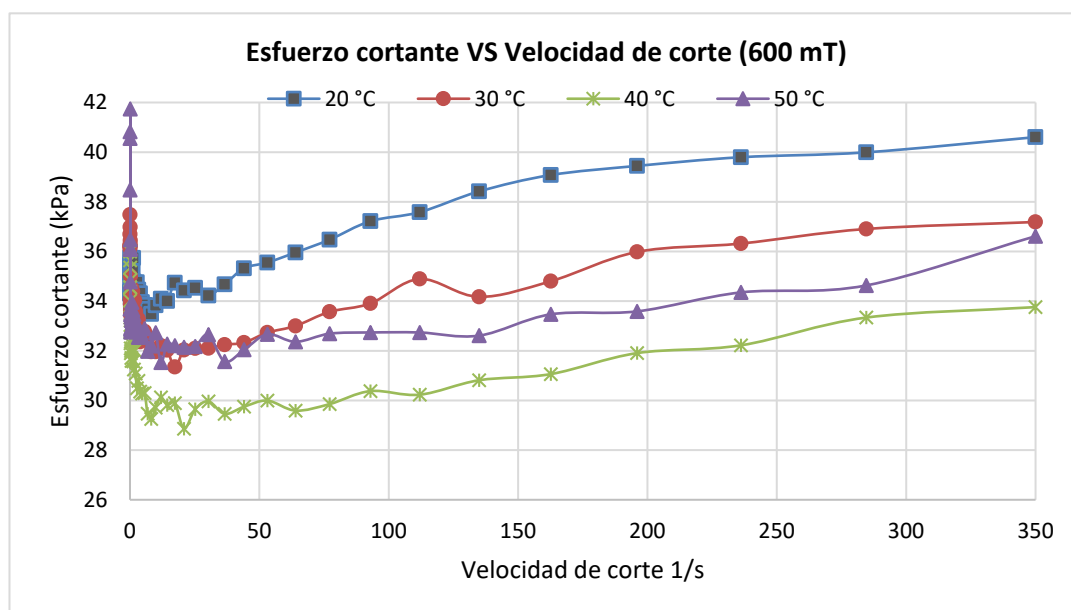


Figura 4.18. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 600 mT.

Las medidas de tendencia central de la viscosidad aparente a 600 mT son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	35,397	34,056	31,598	33,805
Desviación estándar	1,773	1,677	1,841	2,298
Rango	7,122	6,131	7,133	10,214
Valor mínimo	33,483	31,347	28,863	31,528
Valor máximo	40,605	37,479	35,995	41,742

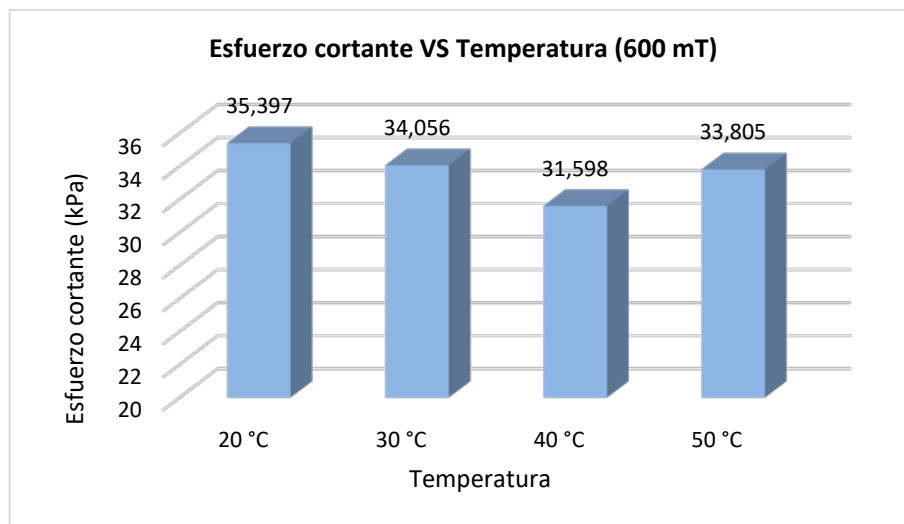


Figura 4.19. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 600 *mT*.

Mediante las figuras 4.18 y 4.19 se determina que el esfuerzo cortante del fluido continúa aumentando debido a la acción de un campo magnético más intenso y alcanza un valor máximo de 41,742 kPa a 50°C. Igual que para los casos anteriores se determina que la temperatura y la velocidad de corte, no tienen un efecto importante en el esfuerzo cortante del fluido.

Viscosidad aparente a 800 mT.

Finalmente, para un campo magnético de 800 mT se tiene:

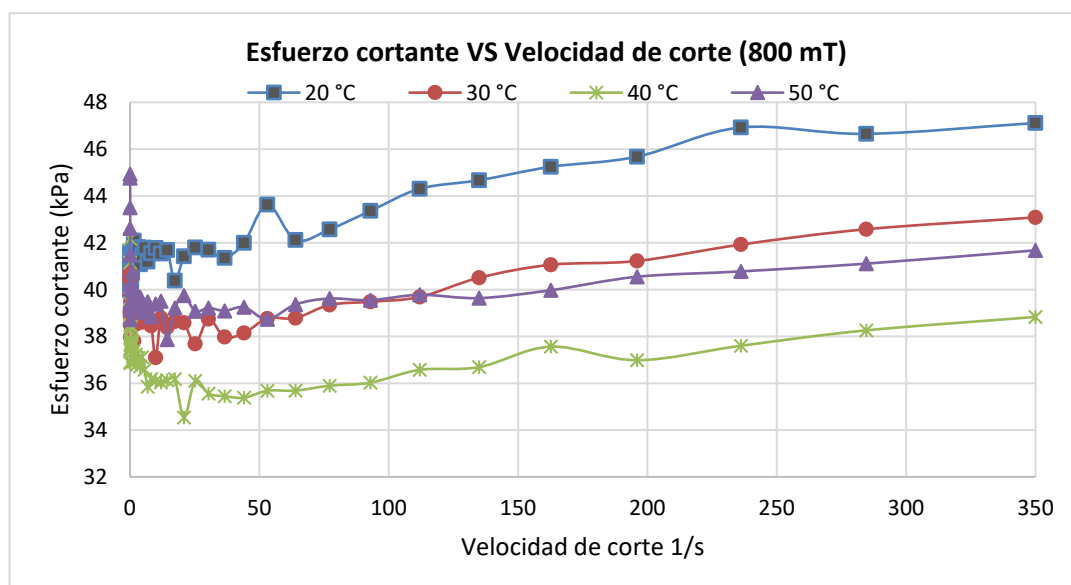


Figura 4.20. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte a 800 *mT*.

A 800 mT las medidas de tendencia central del esfuerzo cortante son:

	20°C	30°C	40°C	50°C
Media aritmética	42,014	39,233	37,186	40,060
Desviación estándar	1,731	1,206	1,398	1,376
Rango	7,135	5,988	7,636	7,067
Valor mínimo	39,981	37,098	34,540	37,866
Valor máximo	47,116	43,087	42,176	44,933

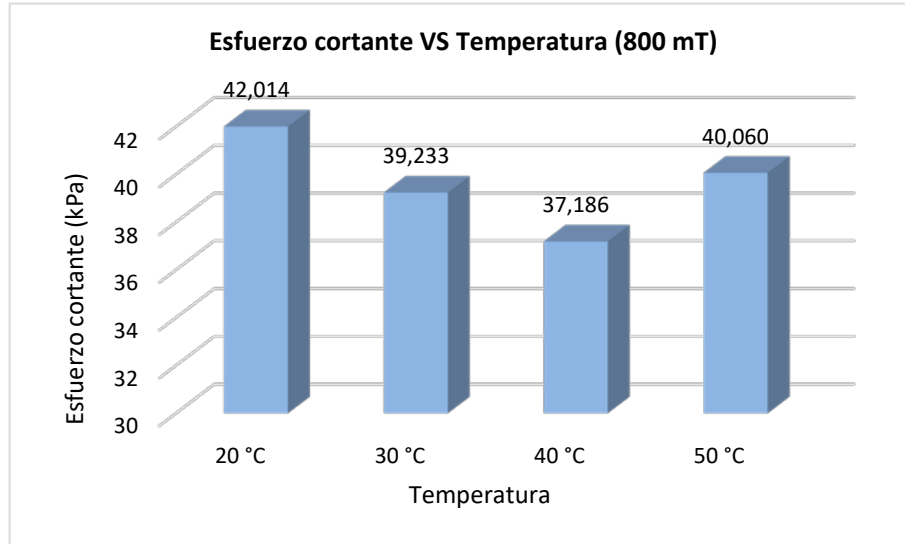


Figura 4.21. Esfuerzo cortante en función de la temperatura a 800 mT.

En base al análisis de las figuras 4.20 y 4.21 se determina que cuando se aplica un campo magnético de 800 mT, el esfuerzo cortante del fluido continúa aumentando hasta un valor máximo de 47,116 kPa a 20°C, sin embargo, el rango de este incremento es menor que para los casos anteriores, lo que demuestra que el porcentaje de incremento del esfuerzo se reduce progresivamente hasta cuando el fluido se someta al campo magnético de saturación.

Esfuerzo cortante promedio.

A partir de los datos analizados se obtiene la media aritmética del esfuerzo cortante a la temperatura promedio de 35°C, para cada intensidad de campo magnético a la que fue sometido el fluido MRF-140CG. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.22, donde se aprecia que el esfuerzo cortante promedio del fluido aumenta a medida que se somete a la acción de un campo magnético de mayor intensidad.

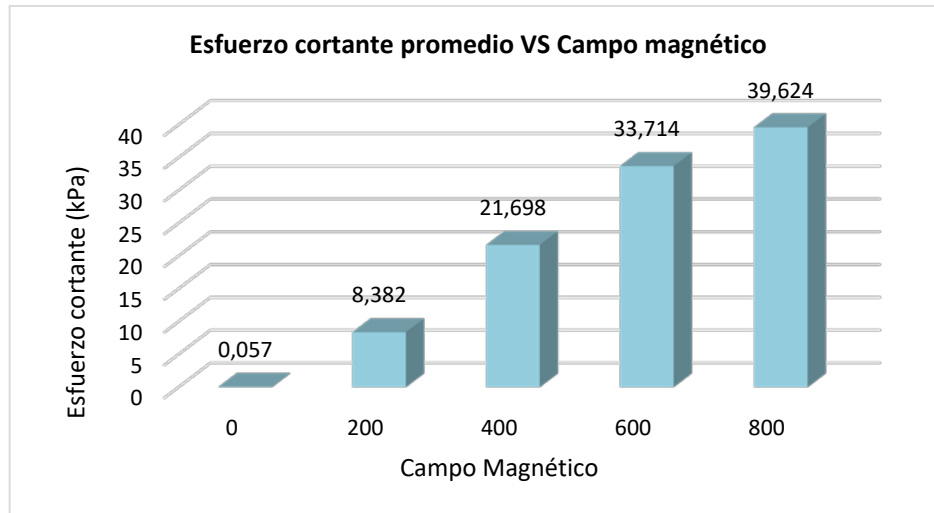


Figura 4.22. Esfuerzo cortante promedio en función del campo magnético.

Comparado con el estado-apagado, cuando sobre el fluido actúa un campo de 200 mT, su esfuerzo cortante aumenta el 14690,49%. Para 400 mT el incremento es de 158,86%, mientras que para 600 mT el incremento es de 55,38%, finalmente a 800 mT el porcentaje de incremento disminuye a 17,53%, demostrando otra vez que el fluido tiende a saturarse.

4.2 Resultados del Modelo Dinámico

Para determinar cuál de los modelos descritos en la sección 2.4.7.2, predice de forma precisa el comportamiento de los fluidos MRF-140CG bajo la acción de campos magnéticos de intensidad variable, primero se calcula la media aritmética de los datos de las pruebas de laboratorio (Anexo 5) para una temperatura media de 30°C y luego se compara con los resultados obtenidos mediante las ecuaciones establecidas para cada uno de los modelos analizados.

4.2.1 Resultados para el Modelo Empírico

Para analizar el comportamiento del fluido mediante el modelo empírico, se utilizan las ecuaciones 2.18 y 2.19, considerando los siguientes parámetros:

- $C = 1,0$ (debido a que el líquido portador del fluido es aceite de hidrocarburo)
- $\phi = 0,40$ (de acuerdo con los datos de la Tabla 2.2)

Tabla 4.1. Resultados para el modelo empírico de Dr. Dave.

Velocidad de corte (1/s)	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (kPa)			
	ECUACIONES EMPÍRICAS DR. DAVE			
	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT
0,035	9,0967	20,6397	35,1397	51,3616
0,044	9,0970	20,6400	35,1399	51,3618
0,054	9,0972	20,6403	35,1401	51,3619
0,065	9,0975	20,6406	35,1403	51,3622
0,078	9,0978	20,6410	35,1406	51,3625
0,094	9,0982	20,6414	35,1409	51,3628
0,113	9,0987	20,6420	35,1413	51,3632
0,136	9,0993	20,6427	35,1418	51,3637
0,164	9,1001	20,6435	35,1424	51,3642
0,198	9,1009	20,6444	35,1431	51,3649
0,238	9,1020	20,6456	35,1439	51,3658
0,287	9,1033	20,6470	35,1449	51,3668
0,346	9,1048	20,6487	35,1462	51,3680
0,417	9,1066	20,6508	35,1476	51,3695
0,502	9,1088	20,6532	35,1494	51,3713
0,605	9,1115	20,6562	35,1516	51,3734
0,729	9,1147	20,6598	35,1542	51,3760
0,878	9,1186	20,6641	35,1573	51,3791
1,058	9,1233	20,6693	35,1610	51,3829
1,275	9,1289	20,6756	35,1656	51,3874
1,537	9,1357	20,6831	35,1710	51,3928
1,852	9,1439	20,6922	35,1776	51,3994
2,231	9,1538	20,7032	35,1855	51,4073
2,689	9,1657	20,7164	35,1951	51,4168
3,240	9,1800	20,7323	35,2066	51,4283
3,904	9,1972	20,7515	35,2205	51,4422
4,705	9,2180	20,7746	35,2372	51,4588
5,669	9,2431	20,8025	35,2573	51,4789
6,831	9,2733	20,8361	35,2816	51,5031
8,231	9,3096	20,8765	35,3108	51,5323
9,919	9,3535	20,9253	35,3460	51,5675
11,952	9,4063	20,9840	35,3885	51,6098
14,402	9,4699	21,0547	35,4396	51,6609
17,355	9,5466	21,1400	35,5013	51,7224
20,913	9,6391	21,2428	35,5756	51,7965
25,199	9,7504	21,3666	35,6651	51,8858
30,364	9,8846	21,5158	35,7729	51,9934
36,590	10,0463	21,6957	35,9029	52,1231
44,090	10,2412	21,9123	36,0595	52,2793
53,129	10,4760	22,1734	36,2482	52,4676
64,020	10,7589	22,4880	36,4756	52,6945
77,143	11,0998	22,8671	36,7496	52,9679
92,958	11,5107	23,3239	37,0798	53,2973
112,015	12,0057	23,8744	37,4777	53,6943
134,973	12,6021	24,5376	37,9571	54,1726
162,644	13,3210	25,3369	38,5348	54,7491
195,989	14,1872	26,3001	39,2310	55,4437
236,170	15,2310	27,4607	40,0700	56,2808
284,585	16,4888	28,8593	41,0809	57,2893
350,000	18,1881	30,7489	42,4467	58,6521
PROMEDIO	10,1467	21,8072	35,9836	52,2035

Al comparar los resultados de la Tabla 4.1 con los datos del Anexo 5, se determina que con el modelo empírico se obtienen valores más altos de resistencia a la fluencia que los obtenidos en los ensayos de laboratorio para todas las velocidades de corte.

La resistencia a la fluencia promedio, inducida por un campo magnético de 200 mT tiene un porcentaje de error de 17,38% comparado con los resultados de los ensayos. Para 400 mT el error es de 0,50%, es decir que para este campo magnético los resultados se asemejan mucho al comportamiento real de fluido. A 600 mT el error es de 6,30% y a 800 mT el porcentaje de error sube a 24,09%, indicando que para campos de mayor intensidad el porcentaje de error tiende a aumentar.

4.2.2 Resultados para el Modelo Plástico de Bingham

Para analizar el comportamiento del fluido MRF-140CG mediante el modelo plástico de Bingham, es necesario encontrar la ecuación de la recta de regresión lineal ($y = \beta_1 x + \beta_0$) de los datos de los ensayos, para determinar los parámetros requeridos en la ecuación 2.20:

- η_p viene dada por la pendiente de la recta de regresión lineal $= \beta_1$.
- $\tau_{y(H)}$ viene dada por el punto de intercepción de la recta de regresión $= \beta_0$

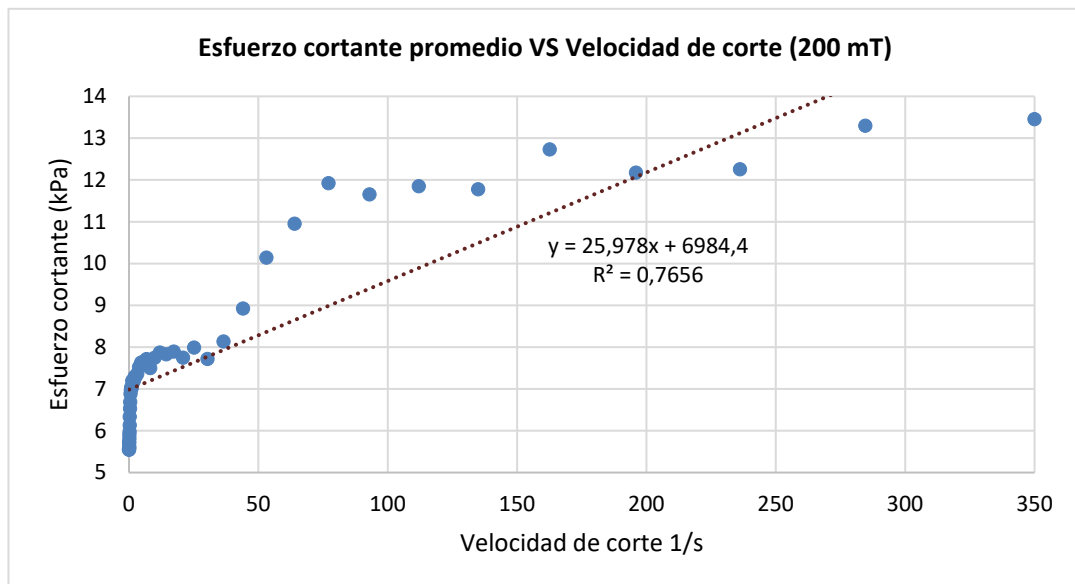


Figura 4.23. Recta y ecuación de regresión lineal para 200 mT.

De la figura 4.23 se determina que $\eta_p = 25,978$ y $\tau_{y(H)} = 6984,4$ con $R = 0,875$

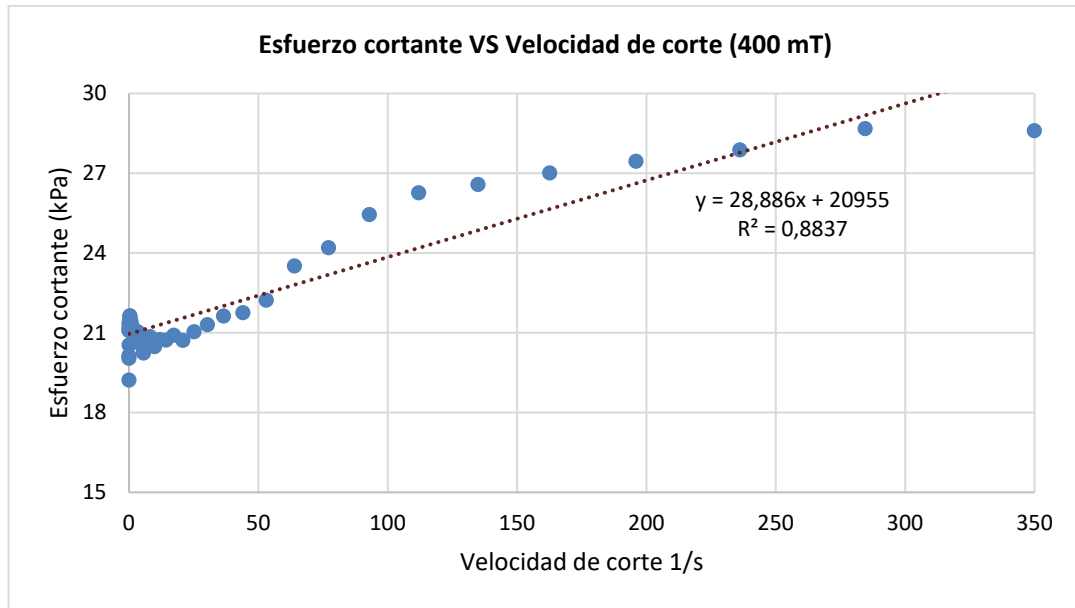


Figura 4.24. Recta y ecuación de regresión lineal para 400 mT.

A partir de la figura 4.24 se obtienen $\eta_p = 28,886$ y $\tau_{y(H)} = 20955$ con un coeficiente de correlación lineal $R = 0,940$

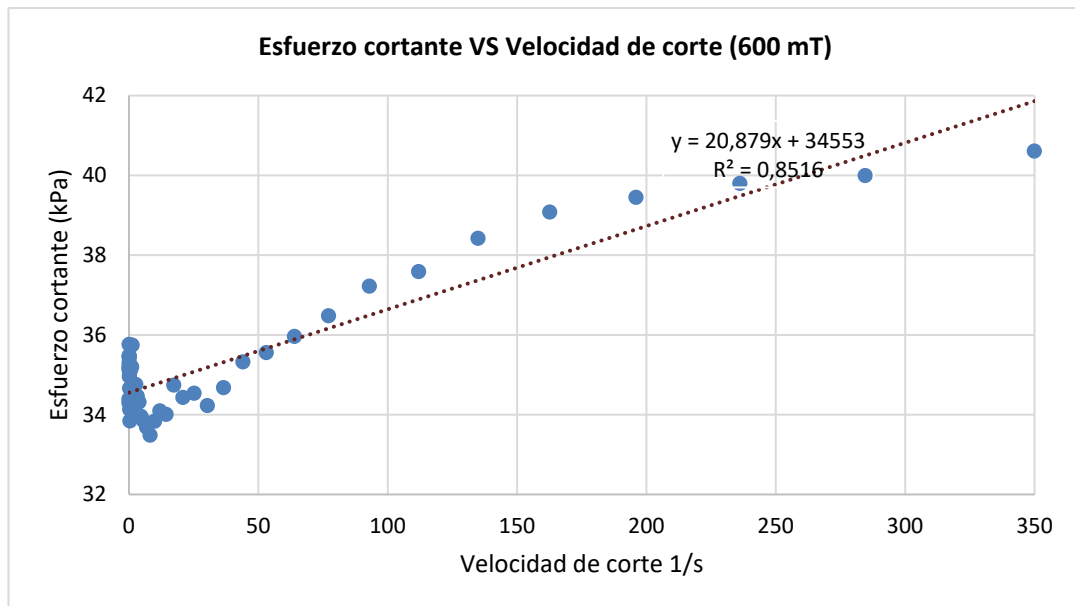


Figura 4.25. Recta y ecuación de regresión lineal para 600 mT.

Para 600 mT, de la figura 4.25 se obtienen $\eta_p = 20,879$ y $\tau_{y(H)} = 34553$ con un coeficiente de correlación $R = 0,923$

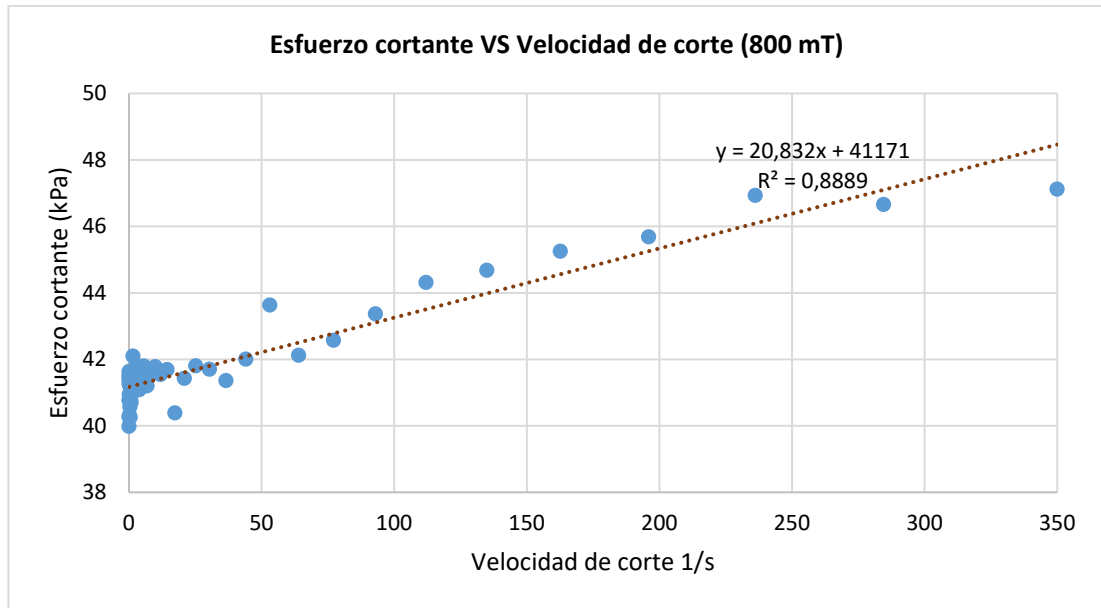


Figura 4.26. Recta y ecuación de regresión lineal para 800 mT.

De la figura 4.26 se obtienen que para 800 mT, $\eta_p = 20,832$ y $\tau_{y(H)} = 41171$ con un coeficiente de correlación $R = 0,943$

En las ecuaciones de regresión obtenidas se observa que para los cuatro campos magnéticos el coeficiente de correlación lineal R tiene un valor cercano a 1.0, por lo que se concluye que hay una correlación lineal significativa entre las variables analizadas.

Los resultados obtenidos mediante la ecuación 2.20 para las diferentes velocidades de corte se presentan en la Tabla 4.2 y al compararlos con los datos del Anexo 5, se observa que mediante el modelo plástico de Bingham se obtienen valores de resistencia a la fluencia más cercanos a los obtenidos en los ensayos de laboratorio, en comparación con el modelo empírico.

Comparado con los resultados de los ensayos de laboratorio, la resistencia a la fluencia promedio inducida por un campo magnético de 200 mT tiene un porcentaje de error de 4,32%. Para 400 mT el error es de 1,92%, para 600 mT es de 4,76% y para 800 mT el porcentaje de error es de 5,69%. Por lo tanto, en general se puede concluir que el modelo plástico de Bingham predice con mayor precisión que el modelo empírico el comportamiento del fluido MRF-140CG.

Tabla 4.2. Resultados para el modelo plástico de Bingham.

Velocidad de corte (1/s)	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (kPa)			
	MODELO DE PLASTICO BINGHAM			
	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT
0,035	6,9853	20,9559	34,5536	41,1722
0,044	6,9855	20,9562	34,5538	41,1724
0,054	6,9858	20,9565	34,5539	41,1726
0,065	6,9861	20,9568	34,5542	41,1728
0,078	6,9864	20,9572	34,5545	41,1731
0,094	6,9868	20,9576	34,5548	41,1735
0,113	6,9873	20,9582	34,5552	41,1739
0,136	6,9879	20,9589	34,5557	41,1743
0,164	6,9886	20,9597	34,5563	41,1749
0,198	6,9895	20,9606	34,5570	41,1756
0,238	6,9906	20,9618	34,5578	41,1765
0,287	6,9918	20,9632	34,5588	41,1775
0,346	6,9934	20,9649	34,5600	41,1787
0,417	6,9952	20,9670	34,5615	41,1802
0,502	6,9974	20,9694	34,5633	41,1820
0,605	7,0001	20,9724	34,5655	41,1841
0,729	7,0033	20,9760	34,5680	41,1867
0,878	7,0072	20,9803	34,5712	41,1898
1,058	7,0119	20,9855	34,5749	41,1935
1,275	7,0175	20,9918	34,5795	41,1981
1,537	7,0243	20,9993	34,5849	41,2035
1,852	7,0325	21,0084	34,5915	41,2101
2,231	7,0423	21,0194	34,5994	41,2180
2,689	7,0542	21,0326	34,6090	41,2275
3,240	7,0685	21,0485	34,6205	41,2390
3,904	7,0858	21,0677	34,6343	41,2528
4,705	7,1066	21,0908	34,6511	41,2695
5,669	7,1316	21,1187	34,6712	41,2896
6,831	7,1618	21,1522	34,6955	41,3138
8,231	7,1982	21,1927	34,7247	41,3430
9,919	7,2420	21,2414	34,7599	41,3781
11,952	7,2949	21,3002	34,8024	41,4205
14,402	7,3585	21,3709	34,8535	41,4715
17,355	7,4352	21,4562	34,9152	41,5330
20,913	7,5276	21,5590	34,9895	41,6072
25,199	7,6390	21,6828	35,0790	41,6964
30,364	7,7732	21,8320	35,1868	41,8041
36,590	7,9349	22,0119	35,3168	41,9337
44,090	8,1298	22,2285	35,4734	42,0900
53,129	8,3646	22,4896	35,6621	42,2783
64,020	8,6475	22,8042	35,8895	42,5052
77,143	8,9884	23,1833	36,1635	42,7786
92,958	9,3992	23,6401	36,4937	43,1080
112,015	9,8943	24,1906	36,8916	43,5050
134,973	10,4907	24,8537	37,3710	43,9833
162,644	11,2096	25,6531	37,9487	44,5597
195,989	12,0758	26,6163	38,6449	45,2544
236,170	13,1196	27,7769	39,4839	46,0914
284,585	14,3773	29,1755	40,4948	47,1000
350,000	16,0767	31,0650	41,8606	48,4627
PROMEDIO	8,0352	22,1234	35,3974	42,0142

4.2.3 Resultados para el Modelo Bi-Viscoso

Para analizar el comportamiento de los MRF mediante el modelo Bi-viscoso, es necesario analizar por separado la zona elástica y la zona viscosa del fluido, con el fin de obtener la pendiente y el punto de intercepción de la recta de regresión lineal en forma independiente para cada zona del fluido.

Los cálculos requeridos para el modelo Bi-viscoso se realizan a partir de las ecuaciones 2.21 y 2.22, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- η_r viene dada por la pendiente de la recta de regresión en la zona elástica.
- η_p viene dada por la pendiente de la recta de regresión en la zona viscosa
- τ_1 viene dada por la intercepción en el eje y de la recta de regresión en la zona elástica

Del análisis de los diagramas de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte, se determina que el fluido MRF-140CG tiene un comportamiento elástico, hasta $1s^{-1}$ aproximadamente, mientras que para velocidades de corte más altas tiene un comportamiento viscoso.

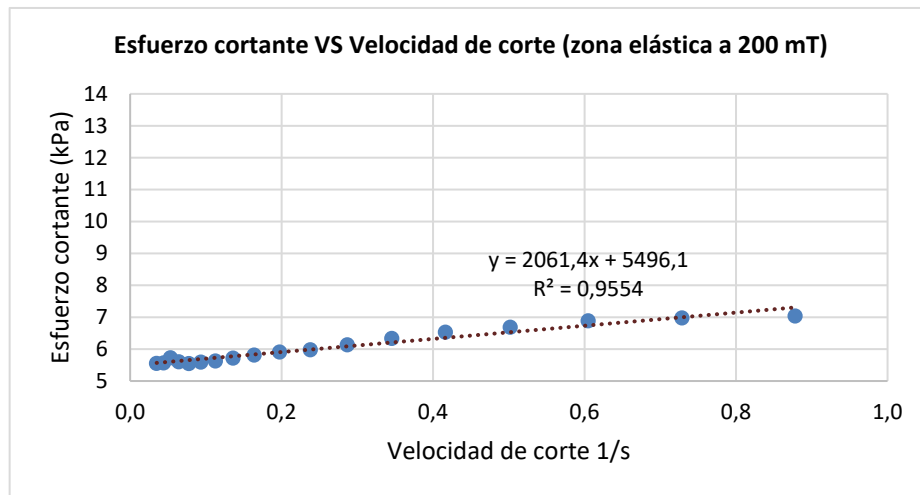


Figura 4.27. Regresión lineal en la zona elástica a 200 mT.

En la figura 4.27 se determina que $\eta_r = 2061,4$ y $\tau_1 = 5496,1$ con un coeficiente de correlación $R = 0,977$.

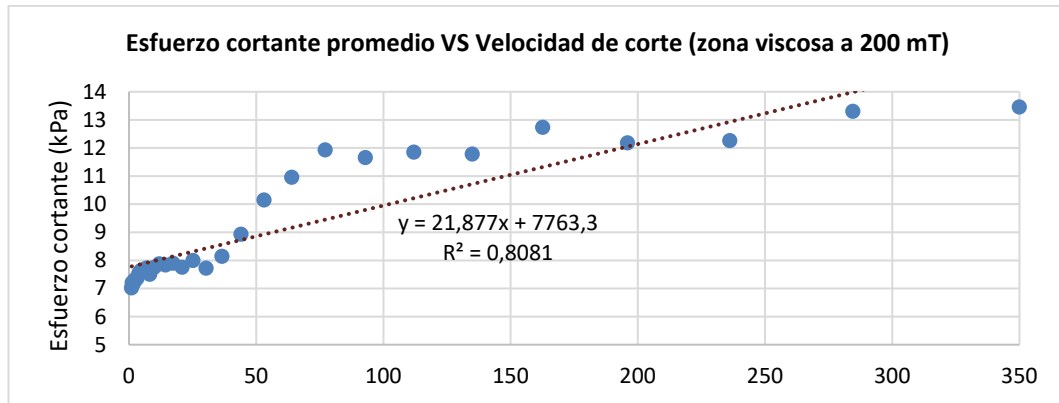


Figura 4.28. Regresión lineal en la zona viscosa a 200 mT.

De la figura 4.28 se tiene $\eta_p = 21,877$ con un coeficiente de correlación $R = 0,899$

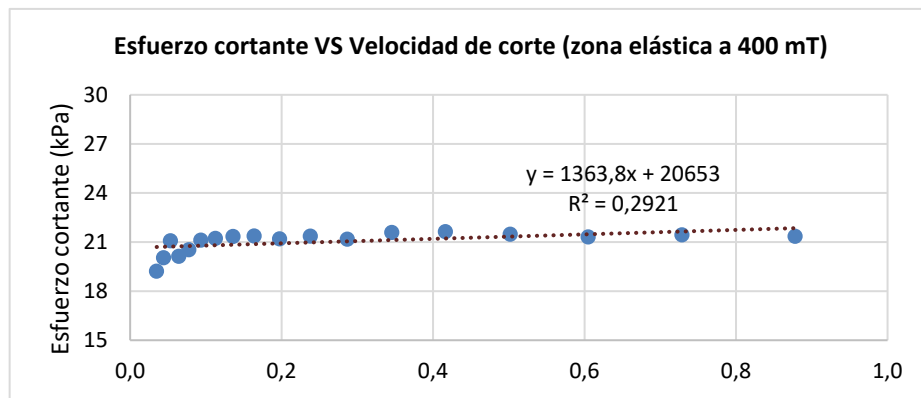


Figura 4.29. Regresión lineal en la zona elástica a 400 mT.

Para 400 mT en la zona elástica se tiene $\eta_r = 1363,8$ y $\tau_1 = 20653$ con $R = 0,541$

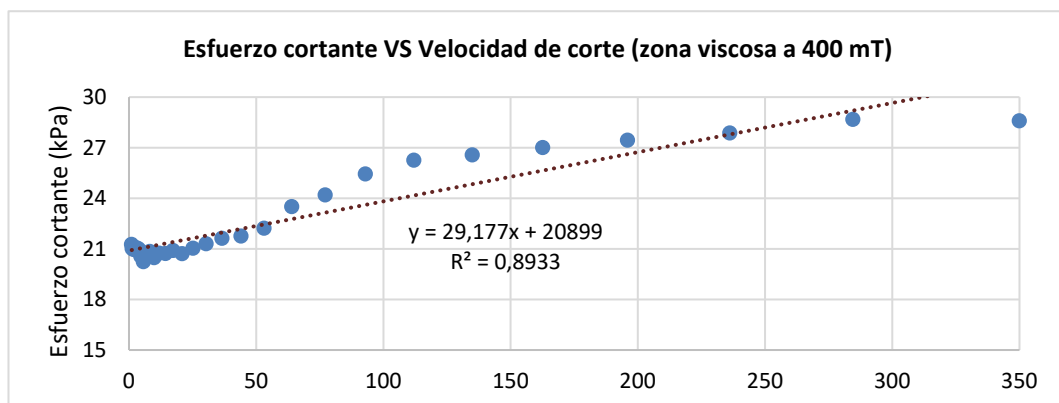


Figura 4.30. Regresión lineal en la zona viscosa a 400 mT.

En la zona viscosa a 400 mT se tiene $\eta_p = 29,177$ con $R = 0,913$

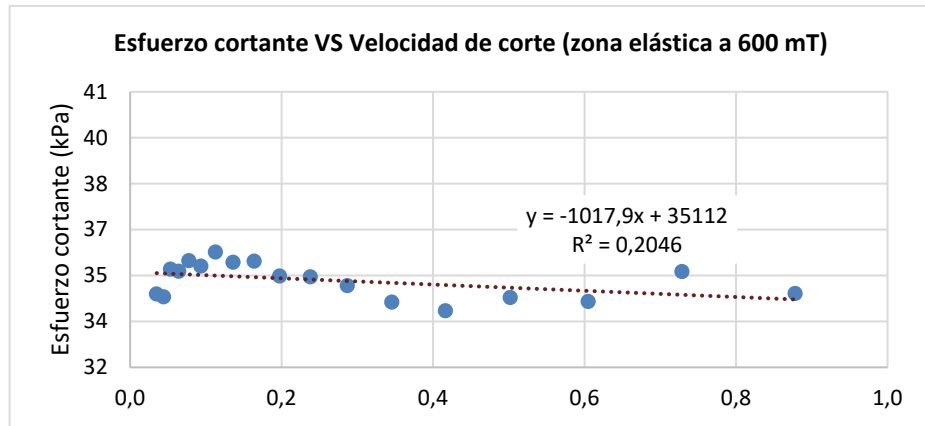


Figura 4.31. Regresión lineal en la zona elástica a 600 mT.

En la zona elástica a 600 mT se tiene $\eta_r = 1017,9$ y $\tau_1 = 35112$ con $R = 0,452$

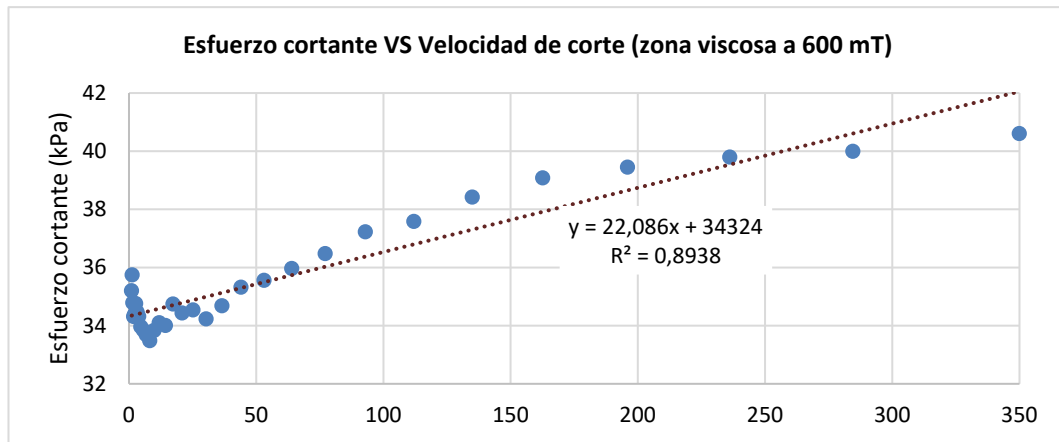


Figura 4.32. Regresión lineal en la zona viscosa a 600 mT.

En la zona viscosa a 600 mT se tiene $\eta_p = 22,086$ con $R = 0,945$

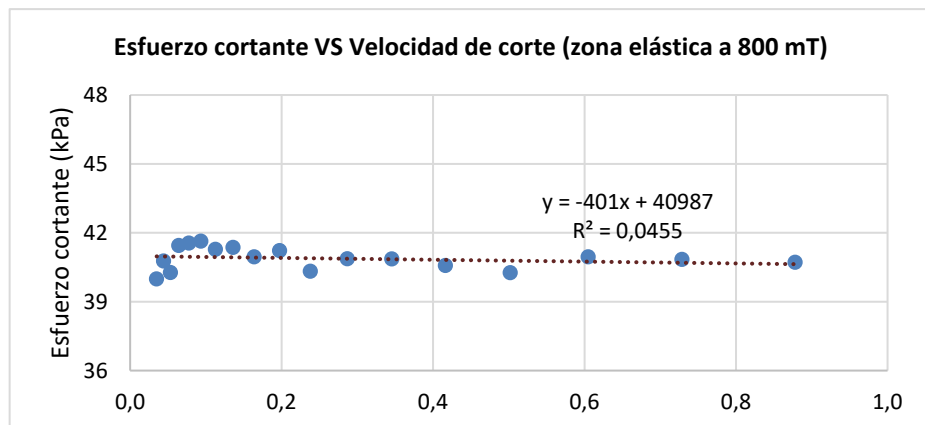


Figura 4.33. Regresión lineal en la zona elástica a 800 mT.

A 800 mT en la zona elástica se obtiene $\eta_r = 401,0$ y $\tau_1 = 40987$ con $R = 0,213$

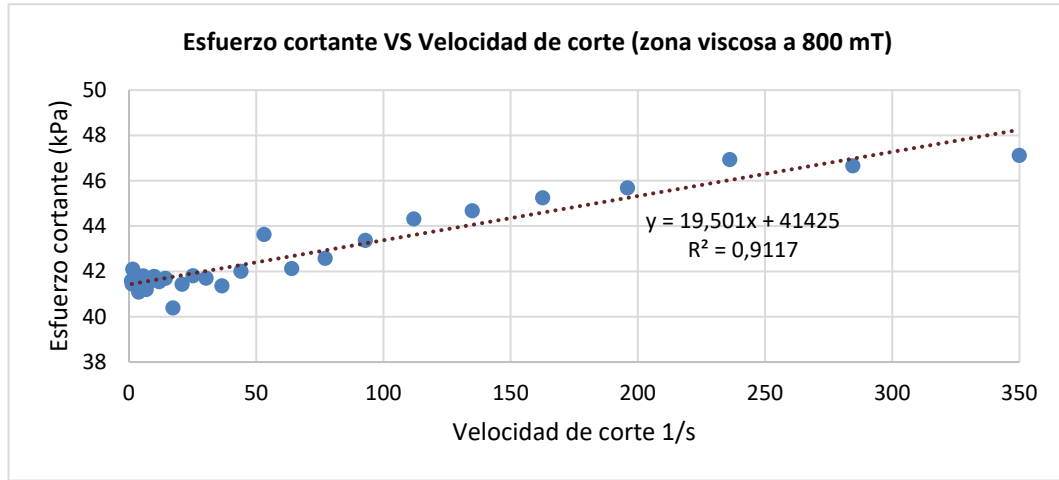


Figura 4.34. Regresión lineal en la zona viscosa a 800 mT.

Finalmente, de la figura 4.34 se obtiene que en la zona viscosa a 800 mT, $\eta_p = 19,501$ con $R = 0,955$

En las ecuaciones de regresión obtenidas para las zonas viscosas se observa que para los cuatro campos magnéticos el coeficiente de correlación tiene un valor cercano a 1.0, lo que indica que existe una relación significativa entre las variables, sin embargo, en las zonas elástica el coeficiente de correlación tiene valores muy bajos, indicando que existe poca relación entre las variables.

Al comparar los resultados presentados en la Tabla 4.3 con los datos del Anexo 5, se determina que el modelo Bi-viscoso entrega valores de resistencia a la fluencia semejantes a los obtenidos en los ensayos de laboratorio a altas velocidades de corte, mientras que, a velocidades de corte bajas, la diferencia es mayor.

Comparado con los resultados de los ensayos de laboratorio, mediante el modelo Bi-viscoso la resistencia a la fluencia promedio inducida por un campo magnético de 200 mT tiene un porcentaje de error de 8,96%. Para 400 mT el error es de 3,28%, para 600 mT es de 5,84% y para 800 mT el porcentaje de error es de 7,36%. Por lo tanto, se determina que el modelo Bi-viscoso no predice con precisión el comportamiento del fluido MRF-140CG cuando se encuentra bajo el efecto de diferentes campos magnéticos.

Tabla 4.3. Resultados para el modelo Bi-viscoso.

Velocidad de corte (1/s)	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (kPa)			
	MODELO BI-VISCOSO			
	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT
0,035	5,5682	20,7007	35,0764	40,9730
0,044	5,5878	20,7136	35,0667	40,9692
0,054	5,6065	20,7260	35,0575	40,9655
0,065	5,6292	20,7410	35,0463	40,9611
0,078	5,6564	20,7590	35,0328	40,9558
0,094	5,6893	20,7808	35,0166	40,9494
0,113	5,7289	20,8070	34,9970	40,9417
0,136	5,7766	20,8386	34,9735	40,9324
0,164	5,8341	20,8766	34,9451	40,9213
0,198	5,9033	20,9224	34,9109	40,9078
0,238	5,9868	20,9776	34,8697	40,8915
0,287	6,0875	21,0442	34,8200	40,8720
0,346	6,2087	21,1245	34,7601	40,8484
0,417	6,3548	21,2211	34,6879	40,8199
0,502	6,5309	21,3376	34,6010	40,7857
0,605	6,7430	21,4780	34,4962	40,7444
0,729	6,9986	21,6470	34,3700	40,6947
0,878	7,3066	21,8508	34,2180	40,6348
1,058	7,2522	21,4142	34,9838	42,6316
1,275	7,2569	21,4205	34,9885	42,6358
1,537	7,2627	21,4281	34,9943	42,6409
1,852	7,2696	21,4373	35,0013	42,6471
2,231	7,2779	21,4484	35,0097	42,6545
2,689	7,2879	21,4617	35,0198	42,6634
3,240	7,2999	21,4778	35,0319	42,6741
3,904	7,3145	21,4972	35,0466	42,6871
4,705	7,3320	21,5206	35,0643	42,7027
5,669	7,3531	21,5487	35,0856	42,7215
6,831	7,3785	21,5826	35,1112	42,7442
8,231	7,4091	21,6235	35,1422	42,7715
9,919	7,4460	21,6727	35,1794	42,8044
11,952	7,4905	21,7320	35,2243	42,8440
14,402	7,5441	21,8035	35,2785	42,8918
17,355	7,6087	21,8896	35,3437	42,9494
20,913	7,6865	21,9935	35,4223	43,0188
25,199	7,7803	22,1185	35,5169	43,1023
30,364	7,8933	22,2692	35,6310	43,2031
36,590	8,0295	22,4509	35,7685	43,3245
44,090	8,1936	22,6697	35,9342	43,4708
53,129	8,3914	22,9334	36,1338	43,6470
64,020	8,6296	23,2512	36,3743	43,8594
77,143	8,9167	23,6341	36,6642	44,1153
92,958	9,2627	24,0955	37,0135	44,4237
112,015	9,6796	24,6515	37,4344	44,7954
134,973	10,1819	25,3213	37,9414	45,2431
162,644	10,7873	26,1287	38,5526	45,7827
195,989	11,5167	27,1016	39,2890	46,4329
236,170	12,3958	28,2739	40,1765	47,2165
284,585	13,4550	29,6865	41,2458	48,1607
350,000	14,8861	31,5951	42,6906	49,4363
PROMEDIO	7,6933	22,4336	35,8048	42,7733

4.2.4 Resultados para el Modelo de Herschel–Bulkley

Para analizar el comportamiento del fluido MRF-140CG mediante el modelo de Herschel–Bulkley, es necesario utilizar la ecuación 2.23 y obtener la curva de tendencia potencial con su respectiva ecuación ($y = \beta_0 x^{\beta_1}$), para determinar los siguientes parámetros:

- K es el factor de consistencia y viene dada por β_0
- n es el índice de comportamiento del fluido y viene dado por el exponente de la ecuación de tendencia β_1

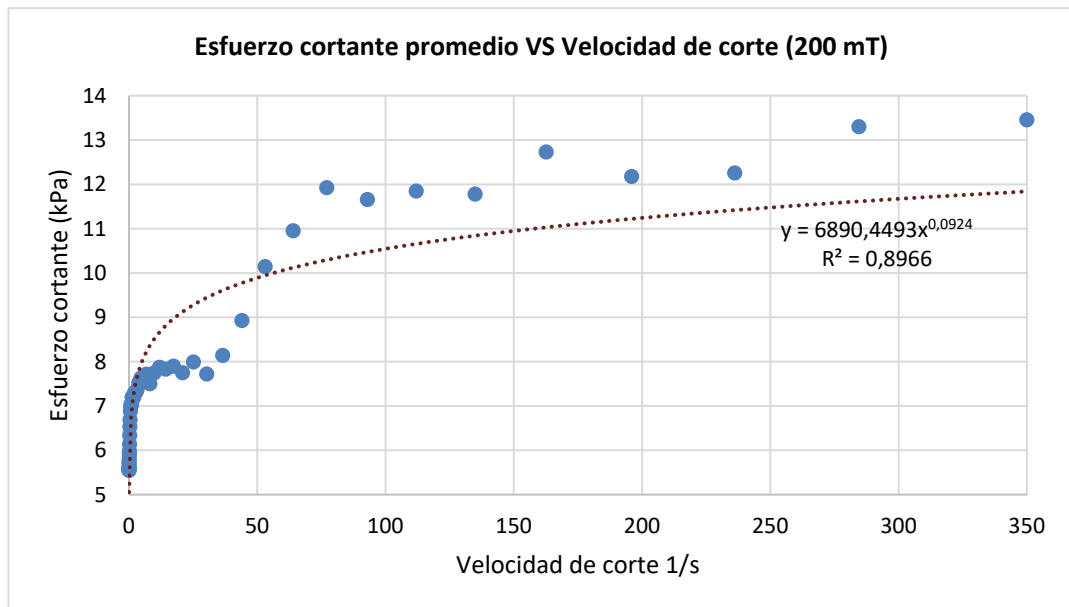


Figura 4.35. Curva de tendencia potencial ajustada para 200 mT.

A partir de la figura 4.35 se determina que $K = 6890,449$ y $n = 0,0924$ con un coeficiente de correlación $R = 0,947$

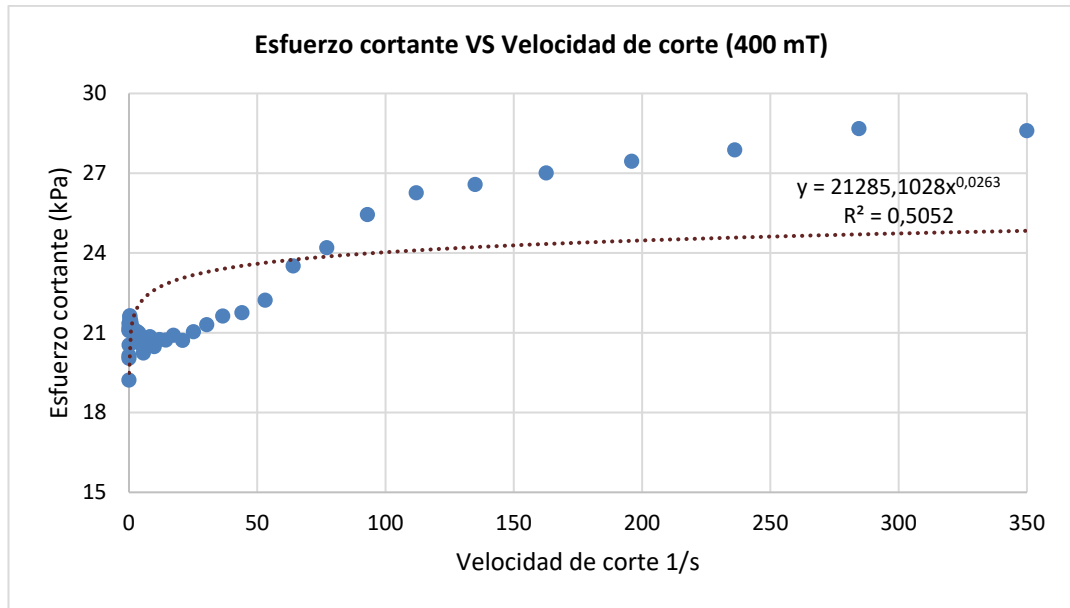


Figura 4.36. Curva de tendencia potencial ajustada para 400 mT.

Con un campo magnético de 400 mT se obtienen $K = 21285,103$ y $n = 0,0263$ con un coeficiente de correlación $R = 0,711$

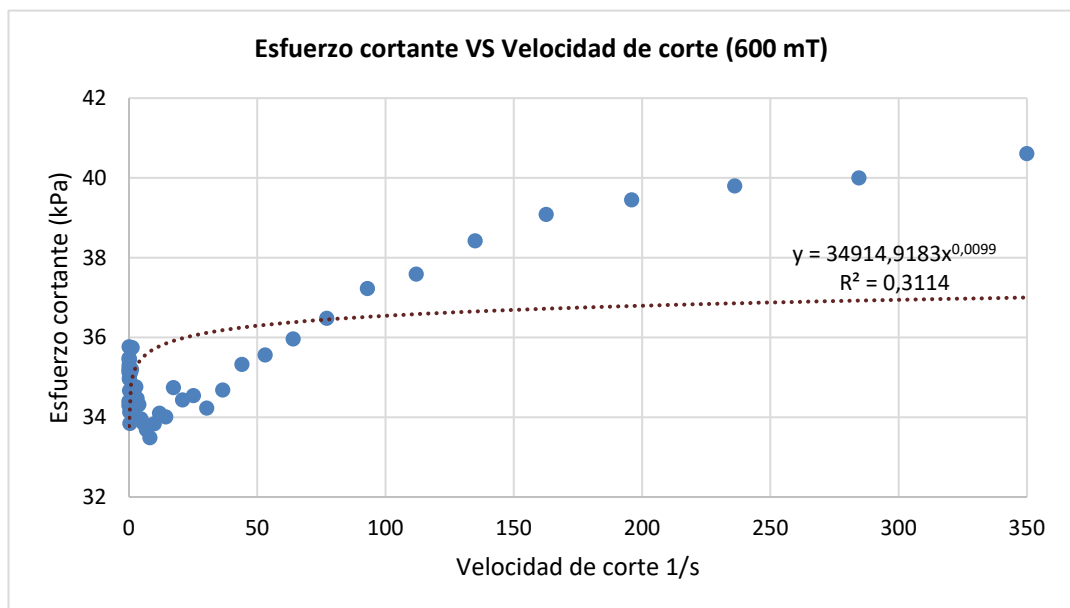


Figura 4.37. Curva de tendencia potencial ajustada para 600 mT.

Para 600 mT se obtienen $K = 34914,918$ y $n = 0,0099$ con un coeficiente de correlación $R = 0,558$

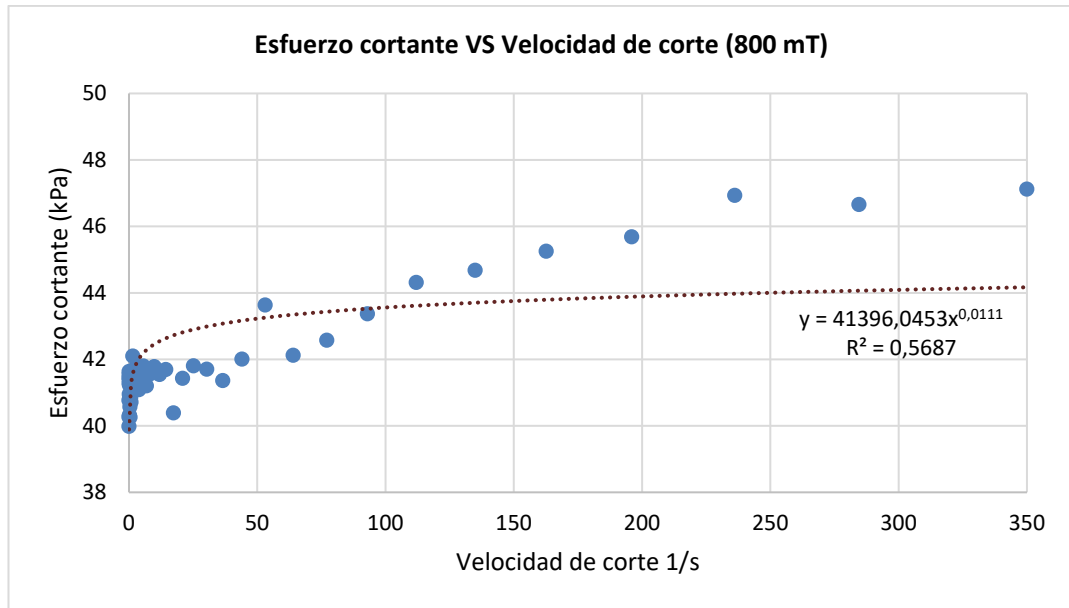


Figura 4.38. Curva de tendencia potencial ajustada para 800 mT.

Por último, para un campo magnético de 800 mT se tiene $K = 41396,045$ y $n = 0,0111$ con un coeficiente de correlación $R = 0,754$

En las figuras 4.35, 4.36, 4.37 y 4.38 se observa que el coeficiente de correlación en el modelo de Herschel–Bulkley, tiene un valor cercano a 1.0, cuando el campo magnético es de 200 mT, pero para otras intensidades de campos su valor disminuye y, por lo tanto, la correlación entre las variables también disminuye.

Al comparar los resultados de la Tabla 4.4 con los datos del Anexo 5, se determina que el modelo de Herschel–Bulkley entrega valores de resistencia a la fluencia semejantes a los obtenidos en los ensayos de laboratorio, a bajas intensidades de campo y altas velocidades de cizallamiento.

Comparado con los resultados de los ensayos de laboratorio, la resistencia a la fluencia promedio que entrega el modelo de Herschel–Bulkley para un campo magnético de 200 mT tiene un porcentaje de error de 4,92%. Para 400 mT el error es de 1,65%, para 600 mT es de 4,67% y para 800 mT el porcentaje de error es de 5,66%. Por lo tanto, se concluye que el modelo de Herschel–Bulkley predice con relativa precisión el comportamiento del fluido MRF-140CG.

Tabla 4.4. Resultados para el modelo de Herschel–Bulkley.

Velocidad de corte (1/s)	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (kPa)			
	MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY			
	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT
0,035	5,0550	19,4888	33,7752	39,8839
0,044	5,1680	19,6118	33,8553	39,9900
0,054	5,2575	19,7080	33,9176	40,0726
0,065	5,3491	19,8051	33,9805	40,1559
0,078	5,4419	19,9023	34,0431	40,2389
0,094	5,5365	20,0001	34,1061	40,3223
0,113	5,6328	20,0985	34,1691	40,4059
0,136	5,7307	20,1974	34,2323	40,4897
0,164	5,8303	20,2966	34,2955	40,5735
0,198	5,9315	20,3963	34,3588	40,6575
0,238	6,0346	20,4966	34,4223	40,7418
0,287	6,1396	20,5975	34,4860	40,8262
0,346	6,2463	20,6987	34,5497	40,9108
0,417	6,3549	20,8005	34,6136	40,9956
0,502	6,4653	20,9028	34,6775	41,0806
0,605	6,5777	21,0056	34,7416	41,1657
0,729	6,6920	21,1088	34,8058	41,2510
0,878	6,8083	21,2126	34,8701	41,3365
1,058	6,9267	21,3169	34,9345	41,4221
1,275	7,0470	21,4217	34,9991	41,5079
1,537	7,1695	21,5270	35,0638	41,5940
1,852	7,2941	21,6328	35,1285	41,6801
2,231	7,4209	21,7392	35,1935	41,7665
2,689	7,5498	21,8460	35,2585	41,8530
3,240	7,6811	21,9535	35,3236	41,9397
3,904	7,8146	22,0614	35,3889	42,0267
4,705	7,9504	22,1699	35,4543	42,1137
5,669	8,0886	22,2789	35,5198	42,2010
6,831	8,2291	22,3884	35,5855	42,2884
8,231	8,3721	22,4984	35,6512	42,3761
9,919	8,5177	22,6091	35,7171	42,4639
11,952	8,6657	22,7202	35,7831	42,5518
14,402	8,8163	22,8319	35,8492	42,6400
17,355	8,9695	22,9442	35,9154	42,7284
20,913	9,1254	23,0570	35,9818	42,8169
25,199	9,2840	23,1703	36,0483	42,9056
30,364	9,4453	23,2842	36,1149	42,9945
36,590	9,6095	23,3987	36,1816	43,0836
44,090	9,7765	23,5138	36,2485	43,1729
53,129	9,9465	23,6294	36,3155	43,2623
64,020	10,1193	23,7455	36,3826	43,3520
77,143	10,2952	23,8623	36,4498	43,4418
92,958	10,4741	23,9796	36,5172	43,5318
112,015	10,6562	24,0975	36,5846	43,6220
134,973	10,8413	24,2159	36,6522	43,7124
162,644	11,0298	24,3350	36,7200	43,8030
195,989	11,2215	24,4546	36,7878	43,8937
236,170	11,4165	24,5749	36,8558	43,9847
284,585	11,6149	24,6957	36,9239	44,0758
350,000	11,8391	24,8305	36,9996	44,1772
PROMEDIO	7,9892	22,0622	35,3686	42,0016

En base a los resultados obtenidos con los cuatro modelos analizados se determina el porcentaje de error promedio para cada uno:

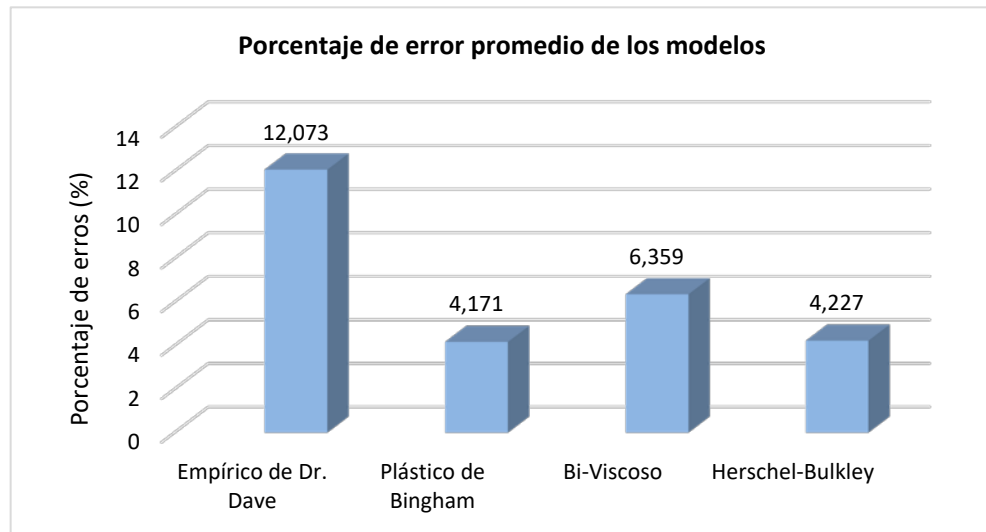


Figura 4.39. Porcentaje de error promedio de los modelos para MRF.

En la figura 4.39 se aprecia que el modelo empírico es el que mayor porcentaje de error presenta, seguido del modelo Bi-viscoso, mientras que el modelo plástico de Bingham y el modelo de Herschel–Bulkley son lo que presentan el menor porcentaje de error promedio, en ese orden. Por lo tanto, se concluye que el modelo plástico de Bingham predice con mayor precisión el comportamiento de los fluidos MRF-140CG cuando se encuentran bajo la acción de campos magnéticos externos.

4.3 Resultados de la Resistencia al Flujo

Debido a que el modelo plástico de Bingham es el que mejor predice el comportamiento de los fluidos MRF-140CG, se utiliza este modelo para encontrar la ecuación de la resistencia al flujo en función de un campo magnético de intensidad específica. Mediante la ecuación 2.20 se calcula la resistencia al flujo para cada una de las temperaturas de prueba (Anexo 6), luego los resultados se grafican en una hoja electrónica (figura 4.40) y finalmente se obtiene la ecuación de regresión que define la relación entre la resistencia al flujo y el campo magnético, con su correspondiente coeficiente de correlación.

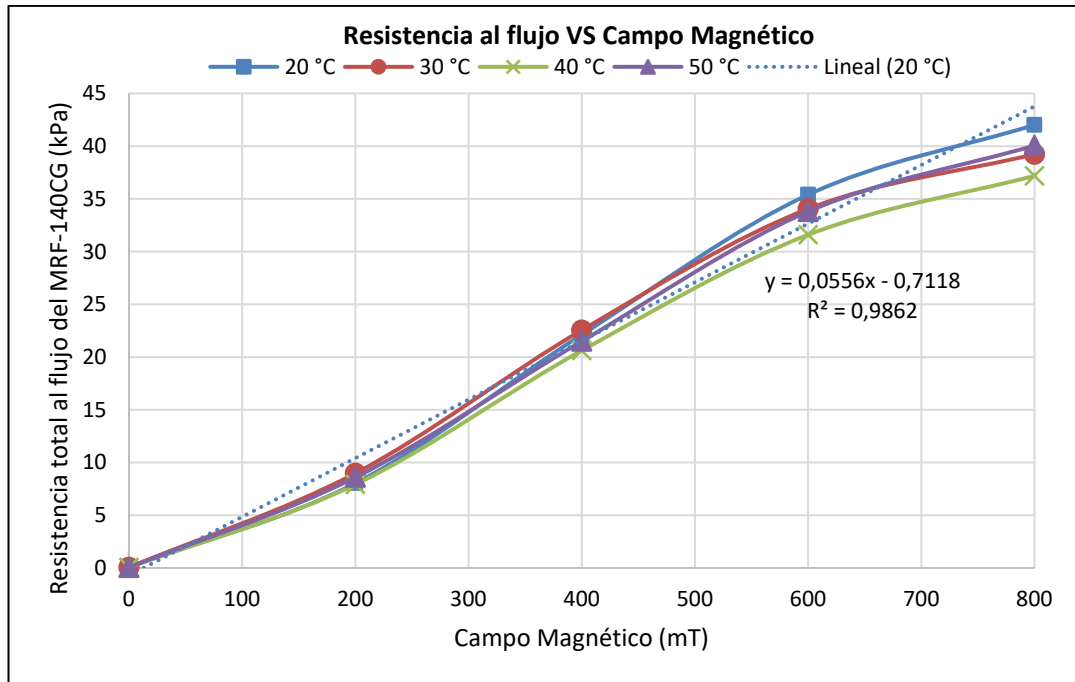


Figura 4.40. Resistencia al flujo del fluido MRF-140CG en función del campo magnético.

En la figura 4.40, se aprecia que la resistencia al flujo aumenta a medida que se incrementa la intensidad del campo magnético, según la ecuación de regresión:

$$y = 0,0556x - 0,7118 \quad (4.1)$$

Donde:

- y representa la resistencia total al flujo ($\tau_{T(H)}$) en kPa.
- x representa la densidad de flujo magnético (B) en mT.

Para una densidad de flujo magnético de 100 mT, la resistencia al flujo que presenta el fluido MRF-140CG es $\tau_{T(H)} = 4,849 \text{ kPa}$.

4.4 Verificación de la Hipótesis

La hipótesis propuesta establece que mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos MRF-140CG se determinará que su resistencia al flujo aumenta cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos de mayor

intensidad, por lo tanto, para verificar la hipótesis se utilizan los resultados obtenidos en la sección anterior mediante las ecuaciones del modelo plástico de Bingham.

Se tiene interés en la resistencia total al flujo de los fluidos MRF-140CG. De manera específica, el interés recae en comprobar si la resistencia al flujo $\tau_{T(H)}$ cuando se aplica un campo magnético, es mayor que la resistencia al flujo τ_0 sin campo magnético. Esto se expresa de manera formal mediante el planteamiento de las dos hipótesis siguientes:

Hipótesis nula

$H_0; \bar{x}_R = \mu$ La resistencia al flujo $\tau_{T(H)}$ bajo la acción de un campo magnético es igual a la resistencia al flujo sin campo magnético τ_0 .

Hipótesis alternativa

$H_1; \bar{x}_R > \mu$ La resistencia al flujo $\tau_{T(H)}$ bajo la acción de un campo magnético es mayor que la resistencia al flujo sin campo magnético τ_0 .

Por lo tanto, se realiza una prueba de hipótesis de una cola a la derecha (mayor que) con base en los siguientes datos:

- $\bar{x}_R = 4,849 \text{ kPa}$ - resistencia al flujo bajo la acción de un campo magnético $\tau_{T(H)}$ (de la ecuación 4.1)
- $\mu = 0,087 \text{ kPa}$ - resistencia al flujo sin campo magnético τ_0 (figura 4.13)
- $n = 20$ número de muestras
- $s = 2,0355$ desviación estándar de la muestra.
- $\alpha = 0,01$ nivel de significancia para un intervalo de confianza de 99%

Debido a que el tamaño de la muestra es pequeño ($n < 30$), se utiliza la distribución t de Student, para verificar la hipótesis.

$$t = \frac{\bar{x}_R - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

$$t = \frac{4,849 - 0,087}{2,0355 / \sqrt{20}}$$

$$t = 10,46$$

- Grados de libertad = $n - 1 = 20 - 1 = 19$

De la tabla del Anexo 7 se obtiene que para 19 grados de libertad y un nivel de significancia de 0,01, el valor crítico es:

$$t_{\alpha} = 2,539$$

Como se muestra en la figura 4.41, al 99% de confianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, se verificó que la resistencia al flujo de los fluidos MRF-140CG aumenta cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos de mayor intensidad.

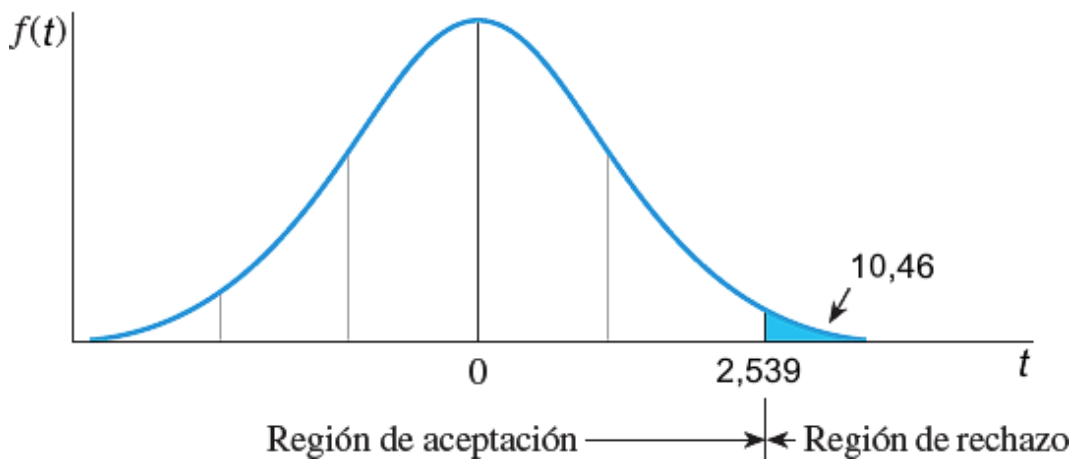


Figura 4.41. Verificación de la hipótesis de la investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades de los fluidos MRF-140CG se obtuvieron algunos resultados importantes. En ausencia de un campo magnético la viscosidad aparente del fluido disminuye a medida que aumenta la temperatura hasta alcanzar los 40°C, a partir de este valor, la temperatura no influye de forma significativa en la viscosidad del fluido. De forma semejante, la viscosidad aparente disminuye cuando aumenta la velocidad de corte, sin embargo, esta disminución es menos evidente cuando el fluido pasa de la zona elástica a la zona viscosa (a 1 s^{-1} aproximadamente).
- Bajo la acción de un campo magnético, la temperatura influye en la viscosidad aparente del fluido MRF-140CG, desde 2,80% a 20°C hasta 3,99% a 50°C, mientras que, la velocidad de corte produce el mismo efecto que en ausencia de campo magnético. Sin embargo, la intensidad del campo magnético tiene un gran efecto en la viscosidad aparente, provocando que la misma se multiplique más de 10^4 veces cuando aumenta la intensidad del campo magnético (desde 0,108 kPa.s hasta 1129.474 kPa.s a 800 mT).
- En ausencia de un campo magnético la viscosidad plástica del fluido tiene un valor mínimo de 0,4794 Pa.s a 50°C y aumenta a medida que disminuye la temperatura, alcanzando un valor de 1,3048 Pa.s a 20°C, la viscosidad plástica promedio es 0,8081 Pa.s. Cuando se aplica un campo magnético, la viscosidad plástica del fluido varía desde 25,978 kPa.s a 200 mT hasta 20,832 kPa.s a 800 mT, con un valor promedio de 24,144 kPa.s, de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el modelo plástico de Bingham, por lo tanto, se comprueba que la viscosidad plástica es independiente de la intensidad del campo magnético aplicado.

- En estado-apagado el esfuerzo cortante del fluido magnetoreológico disminuye a medida que aumenta la temperatura, a la vez su valor se incrementa cuando la velocidad de corte es mayor, alcanzando un valor máximo de 0,441 kPa a 20°C y 350 s⁻¹.
- Cuando sobre el fluido actúa un campo magnético, el efecto que producen tanto la temperatura como la velocidad de corte, en el esfuerzo cortante, se vuelve menos evidente a medida que la intensidad de campo aumento. Por lo tanto, se puede decir que en estado-encendido, el esfuerzo cortante del fluido MRF-140CG depende básicamente de la intensidad del campo magnético, alcanzando un valor máximo de 47,116 kPa a 800 mT.
- Las propiedades del fluido MRF-140CG se modifican en gran medida cuando se encuentra bajo la acción de un campo magnético, pero a medida que la intensidad del campo aumenta, el porcentaje de variación de las propiedades disminuye, debido a que el fluido tiende a saturarse y una vez superada la intensidad de saturación completa (1,7 T aproximadamente), sus propiedades ya no sufren ninguna variación.
- El modelo plástico de Bingham es el que predice con mayor precisión el comportamiento dinámico del fluido MRF-140CG bajo la influencia de un campo magnético, alcanzando un porcentaje de error promedio de sólo 4,171% con un coeficiente de correlación lineal de 0,921, lo cual indica que existe una fuerte relación entre la resistencia a la fluencia del fluido y la intensidad del campo magnético. Por lo tanto, es seguro utilizar dicho modelo para el diseño de cualquier dispositivo que aproveche de forma óptima las propiedades mecánicas del fluido magnetoreológico estudiado.
- Para campos magnéticos por debajo de los 200 mT, la resistencia al flujo que presenta el fluido es linealmente proporcional a la intensidad del campo y alcanza un valor de 8,035 kPa. Sin embargo, para campos magnéticos mayores a 200 mT, el incremento de la resistencia al flujo se reduce progresivamente alcanzando un valor máximo de 42,014 kPa a 800 mT.

5.2 Recomendaciones

- Para garantizar la confiabilidad de los datos de los ensayos de laboratorio es recomendable que antes de cada prueba se agite bien los recipientes que contienen las muestras de MRF, para evitar la sedimentación y prevenir la aglomeración de las partículas polarizables dispersas dentro del fluido, ya que de lo contrario se pueden obtener datos erróneos o datos demasiado dispersos, que afectan a las curvas de tendencia.
- Estudiar con mayor profundidad el comportamiento de los MRF-140CG cuando se encuentran bajo la acción de campos magnéticos con intensidades cercanas a la magnetización de saturación del fluido, para determinar si es conveniente o no (costo/beneficio), diseñar dispositivos que requieren altas intensidades de campo para alcanzar cierta resistencia al flujo. Sin embargo, muchas veces esto se ve limitado debido a la falta de disponibilidad de reómetros rotacionales y células magnetoreológica que generen y controlen campos magnéticos mayores a 1 T.
- Realizar pruebas de funcionamiento de ciertos dispositivos comerciales que utilizan MRF, para conocer de forma precisa los rangos de temperatura con que trabajan dichos dispositivos y con esta información realizar los ensayos de laboratorio que permitan obtener las propiedades completas de los MRF a las temperaturas de interés.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar ensayos de laboratorio para obtener las propiedades de otros tipos de MRF, con diferentes fracciones de volumen de partículas dispersas y con diferente tipo de aditivos, de tal manera que se pueda contar con una base de datos más amplia sobre los MRF y sus propiedades, que nos permita seleccionar el fluido más adecuado para una aplicación específica.

CAPÍTULO VI

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

6.1 Tema

“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE AMORTIGUADOR SEMI-ACTIVO PARA PRÓTESIS TRANSFEMORAL OPTIMIZADO PARA LA UTILIZACIÓN DE FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS MRF-140CG CON EL PROPÓSITO DE OTORGAR UN RANGO ADECUADO DE AMORTIGUAMIENTO DE IMPACTOS DURANTE EL CICLO DE MARCHA DEL AMPUTADO”

6.2 Antecedentes de la Propuesta

Debido a las guerras, enfermedades, lesiones industriales, accidentes de tránsito y desastres naturales, el número de amputados a nivel mundial aumenta en decenas de miles cada año. Según la Organización Mundial de la Salud más de mil millones de personas viven en todo el mundo con algún tipo de discapacidad, aproximadamente el 15% de la población mundial, un porcentaje que va en aumento a medida que la población envejece y se incrementa la prevalencia de enfermedades crónicas.

De acuerdo con las estadísticas del Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS), con fecha de corte de julio de 2016, en el Ecuador existen 414.240 personas con algún tipo de discapacidad, de los cuales 196.312 personas tienen discapacidad física (el 47,39%). La calificación de discapacidad en el Ecuador por pérdida de miembro inferior es de 60% a 70% en amputaciones transfemorales y de 50% a 60 % en amputaciones transtibiales.

Directamente relacionado con el número de personas discapacitadas se encuentra la cantidad y tipo de prótesis ortopédicas utilizadas a nivel mundial. Las prótesis ortopédicas para extremidades son una extensión artificial que reemplaza o provee una parte faltante del cuerpo y tuvieron sus inicios como prototipos de madera en el siglo XVI, luego fueron evolucionando principalmente a partir de la segunda guerra mundial, hasta la actualidad donde se desarrollan prótesis robóticas e inteligentes con varios grados de libertad que poseen distintos avances tecnológicos.

En el Plan Nacional de Buen Vivir descrito por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo se encuentran detallados doce objetivos nacionales para el buen vivir, de los cuales el tercer objetivo menciona: Mejorar la calidad de vida de la población; mientras que, el décimo objetivo menciona: Impulsar la transformación de la matriz productiva. Bajo esta premisa se propone el diseño de un prototipo de amortiguador semi-activo para una prótesis transfemoral, mediante la aplicación de fluidos magnetoreológicos MRF-140CG, de forma que otorgue un rango de amortiguamiento de impactos, de acuerdo con la actividad que realiza el amputado, con el propósito de mejorar la calidad de vida de las personas con este tipo de discapacidad.

6.3 Justificación

La principal manera para que los amputados transtibiales recuperen la función y el aspecto de sus piernas es usar prótesis de extremidades inferiores, que no sólo tiene que satisfacer los requisitos funcionales básicos del caminar, sino también lograr la coordinación con las extremidades restantes. Cuando un paciente camina usando una prótesis y su nivel de amortiguación no tiene el valor adecuado, la persona que lleva el miembro artificial tendrá una marcha muy irregular. Por lo tanto, el desarrollo de un amortiguador inteligente para prótesis transtibial, permitirá que los amputados recuperen su función biomecánica, su confort y su calidad de vida, de tal manera que es importante no sólo por su valor práctico, sino también por su valor social.

Muchas prótesis convencionales son dispositivos de tipo pasivo con propiedades constantes, por lo que son incapaces de reproducir la marcha natural y sus movimientos no son similares a los de las personas normales. Por otro lado, también existen algunas prótesis transtibiales que, aunque tienen muchos elementos de amortiguación que pueden ajustarse para adaptarse a diversas condiciones de marcha, no pueden hacerlo en tiempo real y deben ser configuradas manualmente para pasar de un modo a otro.

Sin embargo, el amortiguador de MRF proporciona los medios necesarios para controlar la prótesis en tiempo real, debido a que bajo la influencia de un campo magnético variable inducido por un solenoide implementado dentro del amortiguador y controlado por sensores externos, la viscosidad efectiva del fluido y su resistencia al flujo se pueden cambiar rápidamente para lograr un intervalo de amortiguación variable en tiempo real a medida que el amputado camina, garantizando de esta forma que, independientemente de las condiciones de funcionamiento cambiantes, la prótesis se adapte óptimamente a la persona y responda rápidamente a cambios abruptos en la dinámica del caminar. Es decir, la resistencia magnetoreológica se activa solo cuando es necesario, dando como resultado un movimiento más natural y un menor nivel de fatiga del amputado.

Algunas ventajas reportadas para los dispositivos MRF son su elevada controlabilidad, construcción sencilla, bajos requerimientos de potencia para el control, respuesta rápida y alto rendimiento dinámico que permite que un dispositivo de poco tamaño tenga un alto rango dinámico. Dado que el nivel de amortiguación depende de las propiedades del MRF, es importante estudiar su comportamiento bajo diferentes campos magnéticos, con el objetivo de optimizar el diseño de este tipo de dispositivos.

El amortiguador propuesto aprovecha el efecto magnetoreológico del fluido MRF-140CG que funciona bajo los modos de válvula y de corte directo, de forma que puede imitar la fuerza de amortiguación controlable de las articulaciones humanas, proporcionando un nivel de amortiguación apropiado para cada etapa de la marcha, adaptándose a su velocidad y permitiendo que los amputados caminen con más seguridad, de forma natural y cómoda. En este dispositivo, las características

inducidas por el campo magnético y las características en estado apagado del MRF son de igual importancia. La resistencia a la fluencia inducida por el campo determina la rigidez del amortiguador y la viscosidad en estado apagado determina cuán flexible es en ausencia de un campo magnético.

Por lo tanto, en base al estudio, análisis y comprensión de las distintas propiedades del fluido MRF-140CG, para predecir su comportamiento cuando se encuentra bajo la acción de un campo magnético controlado, la presente propuesta buscó optimizar la utilización de este material en el diseño de un prototipo de amortiguador semi-activo para prótesis de extremidades inferiores, con sincronización de movimiento en marcha y amortiguamiento activo de impactos, orientado para ayudar a personas que sufren este tipo de amputaciones,.

El prototipo de amortiguador desarrollado tiene como principal característica ser un dispositivo inteligente que se adapta de forma autónoma a la cinemática de marcha del amputado, proporcionándole un nivel de amortiguamiento adecuado de forma que les permite desarrollar sus actividades cotidianas con menor esfuerzo al caminar, evitando con ello problemas de escoliosis y daños en la cadera que se producen cuando se utilizan prótesis rígidas.

Para su fabricación se utilizaron materiales livianos y resistentes que garantizan su integridad estructural bajo condiciones críticas de operación, a la vez que reaccionen de forma inmediata a los diferentes cambios de velocidad, condiciones del terreno y tipo de actividad que realice un paciente, emulando los movimientos de una marcha natural con un nivel adecuado de amortiguación y estabilidad; y con ello adaptarse a su ciclo de marcha, absorbiendo así las fuerzas generadas y reduciendo el impacto de las mismas en la columna vertebral de la persona discapacitada.

Finalmente, el prototipo de amortiguador semi-activo con fluidos MRF-140CG, está enfocado para ser reutilizada tanto en actividades de docencia como en actividades de investigación científica y al mismo tiempo generar patentes que impulsen la vinculación entre la academia y la industria.

6.4 Objetivos

6.4.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de amortiguador semi-activo para prótesis transfemoral optimizado para la utilización de fluidos magnetoreológicos MRF-140CG con el propósito de otorgar un rango adecuado de amortiguamiento de impactos durante el ciclo de marcha del amputado.

6.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la geometría adecuada del canal de flujo que permite obtener un rango dinámico óptimo de amortiguamiento tanto en estado apagado como cuando el fluido MRF-140CG se encuentra bajo la acción de un campo magnético.
- Determinar las dimensiones y características del solenoide requerido para inducir una intensidad de campo magnético de acuerdo a los requerimientos de amortiguamiento como respuesta a las diferentes condiciones de marcha del paciente.
- Diseñar los componentes mecánicos del amortiguador magnetoreológico de manera que garantice su adecuado funcionamiento y su integridad estructural bajo condiciones críticas de operación.

6.5 Análisis de Factibilidad

Fue factible ejecutar la presente propuesta debido a que se contó con los conocimientos, materiales, equipos, maquinarias, tecnología y recurso humano apropiado para el desarrollo de este trabajo.

El diseño y la construcción de cada uno de los componentes del amortiguador magnetoreológico se realizaron utilizando maquinarias y equipos de los diferentes Laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y con la adquisición de varios materiales (aleaciones de aluminio, acero aleado, cobre, actuadores, fluido magnetoreológico, etc.), tanto en el mercado nacional como en el extranjero.

Las pruebas para validar el diseño del amortiguador magnetoreológico y determinar su comportamiento dinámico bajo condiciones de ensayo pre-establecidas se desarrollaron en el Área de Ensayos e Inspecciones del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero del H. Gobierno Provincial de Tungurahua, mediante el banco de pruebas Dyno-Shock 11, aplicando las normas ISO 2954.

6.6 Fundamentación

La fundamentación aplicada para el desarrollo integral de la presente propuesta se basa en los conceptos estudiados en el Marco Teórico presentado en el capítulo II, el Análisis e Interpretación de Resultados obtenidos en el capítulo IV, las Conclusiones descritas en el capítulo V y las diferentes fuentes bibliográficas enumeradas al final del presente documento.

6.6.1 Parámetros Funcionales de los Amortiguadores Magnetoreológicos

A continuación, se describen algunos principios básicos relacionados directamente con el diseño de amortiguadores magnetoreológicos.

- Las principales ventajas de los amortiguadores magnetoreológicos comparados con otros tipos de amortiguadores son: su construcción es sencilla y requiere de pocas partes móviles, necesitan una potencia de control mucho menor, permiten una salida de fuerza grande con ajuste continuo, tienen una respuesta inmediata a la señal de control y se pueden combinar fácilmente con varios tipos de controladores.

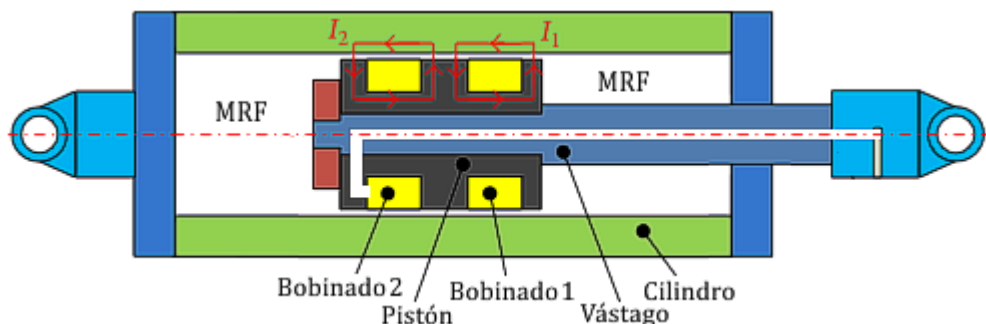


Figura 6.1. Componentes principales de un amortiguador magnetoreológico.

- Como se muestra en la figura 6.1, un amortiguador magnetoreológico consiste principalmente del cilindro o camisa, el pistón que generalmente también cumple la función del núcleo del solenoide, el bobinado del solenoide, el vástago y el fluido magnetoreológico. El pistón divide al cilindro en dos cámaras (superior e inferior) y el MRF fluye de la una a la otra cámara, a través del espacio anular entre la pared interior del cilindro y la circunferencia exterior del pistón.
- Los amortiguadores magnetoreológicos lineales funcionan en el modo de válvula y para su análisis son modelados mediante el método de aproximación de placas paralelas, ya que varios autores han demostrado que el error es mínimo cuando la relación entre el espesor del canal de flujo h y el diámetro del pistón D_1 es mucho menor que uno ($h/D_1 \ll 1$). Por lo tanto, se aplican las ecuaciones de la sección 2.4.4.1, con la correspondiente corrección debido a que, en este caso las superficies de paso del fluido son cilíndricas.

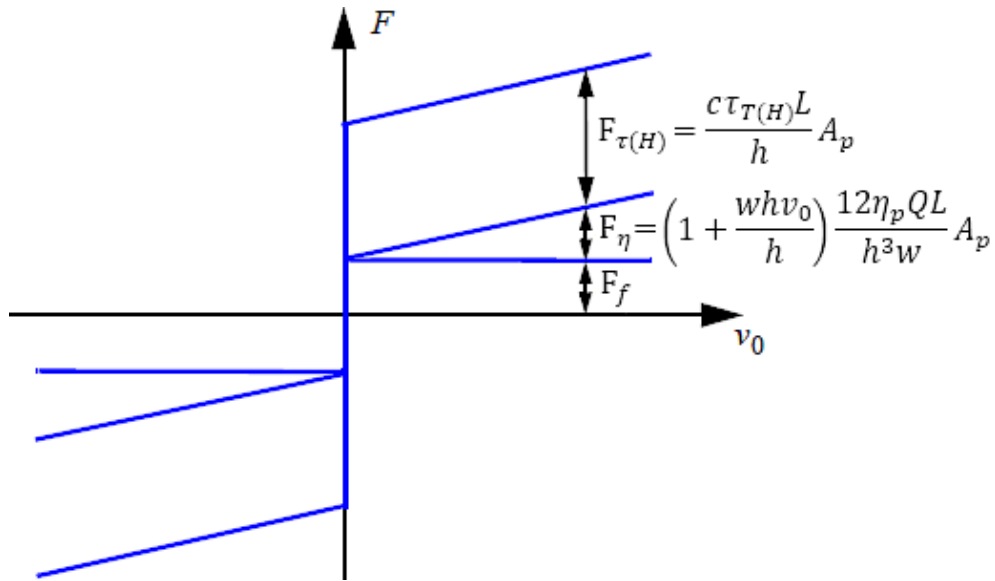


Figura 6.2. Descomposición de fuerza en los amortiguadores magnetoreológicos [43].

- La figura 6.2 muestra que la fuerza total de amortiguamiento F_T generada por un amortiguador magnetoreológico está compuesta por: la fuerza no controlable F_η debida a la resistencia viscosa del fluido (se produce en el estado-apagado), la fuerza controlable $F_{\tau(H)}$ debido al esfuerzo cortante

inducido por el campo magnético (se genera en el estado-encendido) y la fuerza F_f debida a la fricción entre el sólido y el fluido. Sin embargo, debido a que los MRF se componen de aceites lubricantes como líquido portador, la magnitud de la fuerza de fricción es pequeña y se puede despreciar.

- La fuerza controlable $F_{\tau(H)}$ y el rango dinámico λ_d son dos de los parámetros más importantes para evaluar el rendimiento general de los amortiguadores magnetoreológicos [23]. Normalmente se busca alcanzar un alto valor del rango dinámico debido a que esto garantiza un amplio rango de control de la fuerza de amortiguamiento.

$$\lambda_d = 1 + \frac{F_{\tau(H)}}{F_\eta + F_f} \quad (6.1)$$

- Debido a que generalmente es necesario alcanzar una fuerza elevada en el estado-encendido y mantener una fuerza baja en estado-apagado, el método de aproximación de placas paralelas predice que, para aplicaciones con fuerzas de pequeña magnitud, como es el caso de prótesis de extremidades, el rango dinámico óptimo tiene un valor cercano a 12 como se ilustra en la figura 6.3.

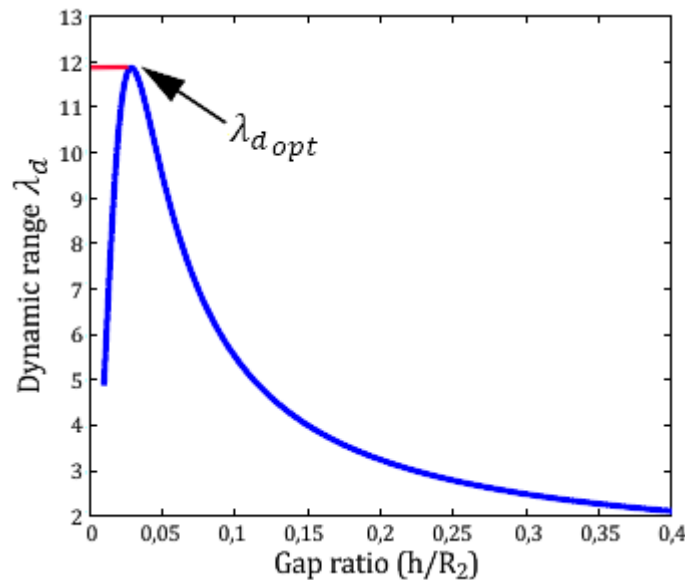


Figura 6.3. Relación entre el espesor del canal de flujo, el rango dinámico y la fuerza controlable [43].

- Un tamaño grande del espesor del canal de flujo h reduce la magnitud de la fuerza no controlable y como consecuencia, también reduce la magnitud de la fuerza máxima controlable que se puede alcanzar. Por otro lado, un tamaño pequeño del espesor del canal de flujo disminuye el rango dinámico [43]. Entonces, el objetivo es encontrar el tamaño del espesor del canal de flujo que garanticen alcanzar tanto la fuerza deseada en estado-apagado como en estado-encendido del amortiguador, con un adecuado rango dinámico.
- Como se muestra en la figura 6.4 (a), un pistón de una sola etapa tiene una única bobina que crea dos regiones activas de corte del MRF, que son las responsables de la fuerza controlable. Con la adición de una segunda bobina, es decir con un pistón de dos etapas, como el de la figura 6.4 (b), se tiene el doble de regiones de corte del fluido, lo que genera una mayor fuerza controlable. Por lo tanto, los pistones de varias etapas permiten compensar tamaños grandes del espesor del canal de flujo, mediante la adición de regiones de activación controlables. Es necesario que de forma alternada las bobinas se enrolen en sentido opuesto para que los campos magnéticos no se cancelen entre sí.

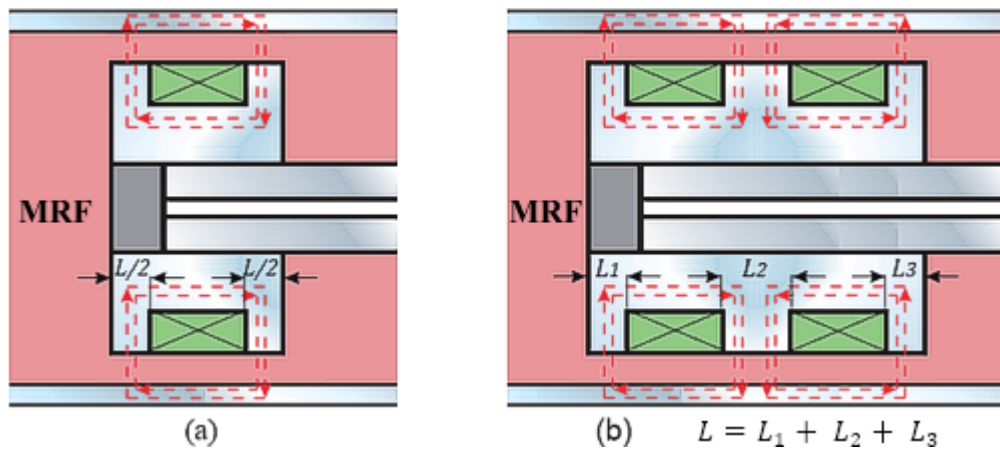


Figura 6.4. Cilindro magnetoreológico: (a) pistón de una etapa; (b) pistón de dos etapas.

- Al aumentar el número de regiones de activación se aumenta también el volumen de fluido activo y varios autores han demostrado que el volumen de fluido activo contribuye directamente al rango dinámico del dispositivo. El volumen total de fluido en un dispositivo bien diseñado y magnéticamente eficiente es de 25 a 50 veces el volumen de fluido activo [40].

6.6.2 Ciclo de Marcha Humana

Un ciclo de la marcha es un período que comienza con el contacto inicial entre el talón y el suelo de una pierna y termina con el contacto subsiguiente entre el talón y el suelo de la misma pierna, como se muestra en la figura 6.5. La distancia entre estos dos puntos de contacto es un paso y se divide en dos fases: la fase de apoyo y la fase de balanceo.

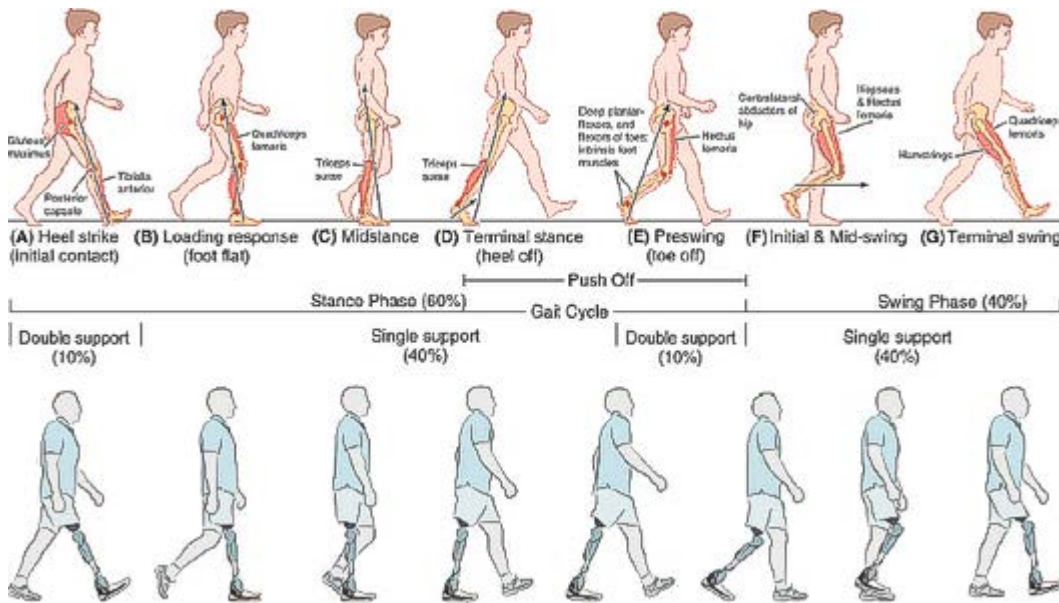


Figura 6.5. Ciclo normal de marcha y ciclo de marcha con prótesis [48].

La fase de apoyo comienza cuando el pie toca el suelo y toma aproximadamente el 60% de la duración total del ciclo. En la fase de apoyo, el apoyo es simple cuando un sólo pie toca el suelo y es doble cuando ambos pies están en contacto con el suelo, esto ocurre al principio y al final del ciclo y toma el 20% del ciclo. La fase de balanceo comienza al final de la fase de soporte, cuando el pie no contacta con el suelo y toma el 40% del ciclo de la marcha [46]. Estas dos fases se van alternando de una pierna a la otra durante la marcha.

Por lo tanto, el periodo durante el cual un sólo pie está en contacto con el suelo corresponde al 40% de la duración total del ciclo de marcha y es cuando se generan las cargas críticas en el amortiguador.

A partir de los estudios realizados sobre las fases repetitivas de la marcha, en el Departamento de Medicina de la Universidad de Roma, de acuerdo con la

Declaración de Helsinki sobre experimentos con seres humanos, se obtiene que el tiempo promedio de duración del paso es $1,14 \pm 0,10$ segundos [47]. Entonces, el tiempo promedio durante el cual el peso de todo cuerpo actúa sobre una pierna, es:

$$t_a = 0,4 \cdot 1,14 \text{ s} = 0,456 \text{ s}$$

6.7 Metodología

Para el desarrollo de la propuesta se aplica la metodología que se describe a continuación:

6.7.1 Parámetros de Diseño

En base a los resultados obtenidos sobre las propiedades del fluido MRF-140CG, el peso y las dimensiones estructurales de cuerpo humano y los requerimientos funcionales del amortiguador, se establecen los principales parámetros para el diseño del amortiguador:

- Viscosidad plástica del MRF-140CG es estado-apagado (η_p) = 0,8081 Pa.s
- Densidad de flujo magnético máxima esperada (B) = 1,0 T
- Peso de un hombre con percentil 95° (W_h) = 940 N = 96,2 kg (Anexo 8)
- Tiempo de la fase de apoyo simple durante el ciclo de marcha (t_a) = 0,456 s
- Longitud máxima de amortiguamiento (y) = 20 mm
- Diámetro exterior máximo permitido del amortiguador (D_c) = 55 mm
- Máxima intensidad de corriente en el solenoide (I) = 1,0 A
- Factor de seguridad mínimo requerido (FS) = 2.5 (Anexo 9)

6.7.2 Dimensionamiento del Amortiguador Magnetoreológico

Con el fin de determinar las dimensiones del amortiguador y del canal de flujo, de manera que se garantice alcanzar un rango adecuado de amortiguamiento de impactos durante todo el ciclo de marcha, se realizó los cálculos para diferentes valores de las variables de diseño hasta encontrar las dimensiones óptimas, que

cumplen con todos los parámetros funcionales establecidos para los amortiguadores magnetoreológicos.

La tabla obtenida de una hoja electrónica con los cálculos realizados para diferentes valores de las variables de diseño se presenta en el Anexo 10. A continuación se describe el procedimiento realizado, sólo para el caso en que se obtuvieron los resultados óptimos, es decir para un espesor del canal de flujo $h = 0,7 \text{ mm}$

Para un espesor de pared de 2,5 mm, el diámetro interior del cilindro del amortiguador viene dado por:

$$D_2 = D_c - 2 \cdot 2,5 \quad (6.1)$$

$$D_2 = 55 - 2 \cdot 2,5$$

$$D_2 = 50 \text{ mm}$$

Entonces, el radio mayor del ducto anular para el paso del fluido, es:

$$R_2 = 25,0 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$$

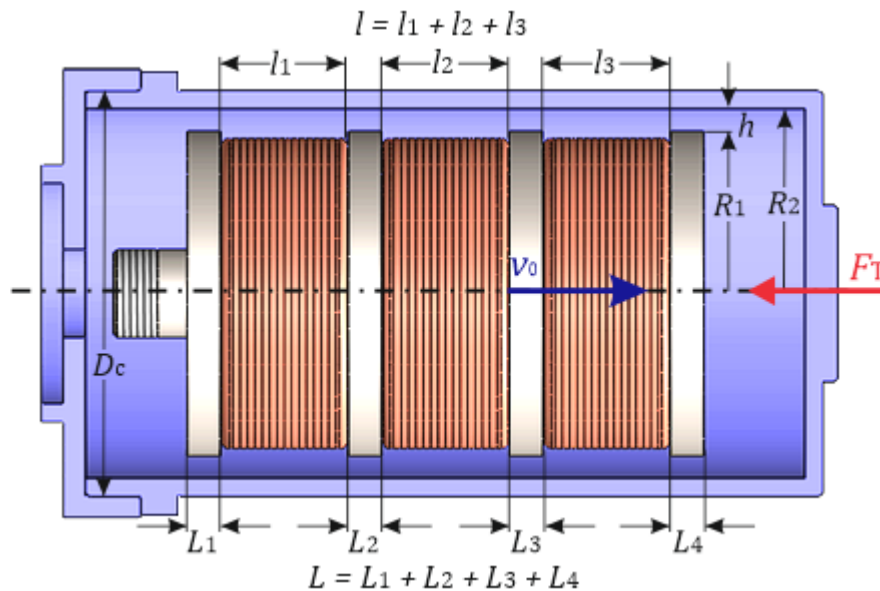


Figura 6.6. Geometría propuesta para el amortiguador magnetoreológico.

El radio menor del ducto anular es igual al radio del pistón y viene dado por:

$$R_1 = R_2 - h \quad (6.2)$$

$$R_1 = 25,0 - 0,7$$

$$R_1 = 24,3 \text{ mm} = 0,0243 \text{ m}$$

El diámetro del pistón del amortiguador es:

$$D_1 = 48,6 \text{ mm}$$

Y el área de la sección transversal del pistón viene dado por:

$$A_p = \pi R_1^2 \quad (6.3)$$

$$A_p = 1,855 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

La relación entre el espesor del canal de flujo y el diámetro del pistón es:

$$\frac{0,7 \text{ mm}}{48,6 \text{ mm}} = 0,014$$

Se cumple que $h/D_1 \ll 1$, por lo que es adecuado utilizar el método de aproximación de placas paralelas para dimensionar el amortiguador.

Entonces, el ancho de canal de flujo es equivalente al perímetro medio del ducto anular, es decir:

$$w = \pi(R_1 + R_2) \quad (6.4)$$

$$w = 0,155 \text{ m}$$

El área efectiva para el paso del fluido por el ducto anular, viene dado por:

$$A_e = w \cdot h \quad (6.5)$$

$$A_e = 0,108 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

La velocidad promedio del pistón es igual a la velocidad que requiere el pistón para recorrer la longitud máxima de amortiguamiento en el tiempo de la fase de apoyo simple, durante un ciclo de marcha normal:

$$v_0 = \frac{y}{t_a} \quad (6.6)$$

$$v_0 = \frac{0,02 \text{ m}}{0,456 \text{ s}}$$

$$v_0 = 0,0439 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, el caudal volumétrico de fluido MRF-140CG, requerido durante la carrera de amortiguamiento, es:

$$Q = v_0 A_p \quad (6.7)$$

$$Q = 0,0439 \text{ m/s} \cdot 1,855 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = 81,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para asegurar que cuando el amortiguador esté en estado-apagado, la persona que utiliza la prótesis se mantenga estable cuando se encuentra parada y apoyada con ambas piernas, se establece que la fuerza no controlable requerida F_{η}' , debe ser igual a la mitad del peso de una persona con percentil 95°, es decir:

$$F_{\eta}' = \frac{W_h}{2} \quad (6.8)$$

$$F_{\eta}' = 470 \text{ N}$$

En la ecuación de la figura 6.2, se despeja longitud axial efectiva del polo magnético requerida para obtener una fuerza viscosa no controlable de 470 N.

$$L = \frac{F_{\eta}' w h^3}{12\eta_p Q A_p \left(1 + \frac{w h v_0}{2Q}\right)} \quad (6.9)$$

$$L = \frac{470 \cdot 0,155 \cdot 0,0007^3}{12 \cdot 0,8081 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6} \cdot 1,855 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{0,155 \cdot 0,0007 \cdot 0,0439}{2 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6}}\right)}$$

$$L = 0.01657 \text{ m} \approx 17,0 \text{ mm}$$

Se selecciona una longitud axial efectiva del polo magnético de 17 mm, la misma que, con el propósito de aumentar las regiones activas de corte del fluido, se divide en cuatro secciones de 4,25 mm de longitud cada una, de tal manera que se obtiene el pistón de tres etapas con tres bobinas, mostrado en la figura 6.6.

6.7.3 Cálculo de las cargas que actúa en el cilindro

La fuerza no controlable F_η debida a la resistencia viscosa del fluido, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \frac{12\eta_p QL}{h^3 w} A_p \quad (6.10)$$

$$F_\eta = \left(1 + \frac{0,155 \cdot 0,0007 \cdot 0,0439}{2 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6}}\right) \frac{12 \cdot 0,8081 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,017}{0,0007^3 \cdot 0,155} 1,855 \cdot 10^{-3}$$

$$F_\eta = 482,06 \text{ N}$$

Para un campo magnético de 1,0 T (1000 mT), la resistencia a la fluencia por cizallamiento desarrollada por el fluido MRF-140CG en respuesta al campo aplicado, se obtiene en base al modelo plástico de Bingham, mediante la ecuación de regresión lineal mostrada en la figura 4.40.

$$y = 0,0556x - 0,7118 \quad (6.11)$$

Donde:

- y representa la resistencia total al flujo ($\tau_{T(H)}$) en kPa.
- x representa la densidad de flujo magnético (B) en mT.

$$\tau_{T(H)} = 0,0556 \cdot 1000 - 0,7118$$

$$\tau_{T(H)} = 54,896 \text{ kPa}$$

El coeficiente c se calcula a partir de la ecuación 2.3:

$$c = 2,07 + \frac{1}{1 + \frac{0,4 \cdot 0,155 \cdot 0,0007^2 \cdot 54,896 \cdot 10^3}{12 \cdot 0,8081 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6}}}$$

$$c = 2,39$$

La fuerza controlable $F_{\tau(H)}$ debida al esfuerzo cortante inducido por el campo magnético aplicado, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{\tau(H)} = \frac{c\tau_{T(H)}L}{h} A_p \quad (6.12)$$

$$F_{\tau(H)} = \frac{2,39 \cdot 54,896 \cdot 10^3 \cdot 0,017}{0,0007} 1,855 \cdot 10^{-3}$$

$$F_{\tau(H)} = 5766,22 \text{ N}$$

La fuerza total F_T desarrollada por el amortiguador magnetoreológico, es:

$$F_T = 482,06 + 5766,22$$

$$F_T = 6248,27 \text{ N}$$

La presión no controlable ΔP_η debido a la viscosidad del fluido, se obtiene mediante la ecuación 2.1:

$$\Delta P_\eta = \frac{12 \cdot 0,8081 \cdot 81,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,017}{0,0007^3 \cdot 0,155}$$

$$\Delta P_\eta = 252482,9 \text{ Pa} = 0,2525 \text{ MPa}$$

La presión controlable $\Delta P_{\tau(H)}$ debido a la resistencia a la fluencia inducida por el campo magnético, se obtiene de la ecuación 2.2:

$$\Delta P_{\tau(H)} = \frac{2,39 \cdot 54,896 \cdot 10^3 \cdot 0,017}{0,0007}$$

$$\Delta P_{\tau(H)} = 3108334,6 \text{ Pa} = 3,1083 \text{ MPa}$$

Entonces, la presión total ΔP en el amortiguador magnetoreológico es:

$$\Delta P = 0,2525 + 3,1083$$

$$\Delta P = 3,361 \text{ MPa}$$

El rango dinámico del dispositivo se calcula a partir de la ecuación 6.1

$$\lambda_d = 1 + \frac{5766,22 \text{ N}}{482,06 \text{ N}}$$

$$\lambda_d = 12,96$$

Este valor se encuentra cerca al valor óptimo del rango dinámico mostrado en la figura 6.3. Por lo tanto, se garantiza un amplio rango de control de la fuerza de amortiguamiento y se valida el dimensionamiento del amortiguador.

El volumen mínimo de fluido activo disponible para generar la fuerza de amortiguamiento, viene dado por:

$$V_d = w \cdot L \cdot h \quad (6.13)$$

$$V_d = 0,155 \cdot 0,017 \cdot 0,0007$$

$$V_d = 1,84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 1,84 \text{ cm}^3$$

Debido a que el volumen total de fluido en un dispositivo bien diseñado, debe tener de 25 a 50 veces el volumen de fluido activo, el rango adecuado para el volumen total de fluido en el amortiguador, es:

$$46 \text{ cm}^3 \leq V_T \leq 92 \text{ cm}^3$$

6.7.4 Diseño del Solenoide para Inducir el Campo Magnético

Considerando que el pistón del amortiguador también cumple la función de núcleo del solenoide, es necesario seleccionar un material que tenga una alta permeabilidad relativa y al mismo tiempo una resistencia a la fluencia adecuada para que resista todos los esfuerzos que se generan durante las etapas de amortiguamiento.

El material seleccionado fue el acero de medio contenido de carbono AISI 1020, cuya permeabilidad relativa es de $\mu_r = 2000$ (Anexo 11).

Reemplazando las ecuaciones 2.12, 2.17 y 2.16 en la ecuación 2.15, se tiene:

$$B = B_0 + \mu_0 \chi_m H = B_0 + B_0 \chi_m = B_0(1 + \chi_m) = \mu_r B_0$$

Luego despejando la densidad de flujo magnético en el espacio libre, se obtiene:

$$B_0 = \frac{B}{\mu_r} \quad (6.14)$$

$$B_0 = \frac{1,0 \text{ T}}{2000}$$

$$B_0 = 0,005 \text{ T}$$

Despejando n de la ecuación 2.14, se tiene:

$$n = \frac{B_0}{\mu_0 I} \quad (6.15)$$

$$n = \frac{0,005 \text{ T}}{4 \pi 10^{-7} \text{ T m/A} \cdot 1 \text{ A}}$$

$$n = 3978,87 \text{ m}^{-1}$$

Para un pistón con una longitud total de 68 mm, la longitud total del solenoide es:

$$l = (68 - 17) \text{ mm}$$

$$l = 51 \text{ mm}$$

Entonces, el número mínimo de vueltas requerido en la bobina del solenoide, se obtiene a partir de la ecuación 2.14:

$$N = 3978,87 \text{ m}^{-1} \cdot 0,051 \text{ m}$$

$$N = 202,93 \text{ vueltas} \approx 203 \text{ vueltas}$$

Con el fin de aumentar el número de regiones activas de corte del fluido, se establece un solenoide con tres bobinas, cada una con una longitud parcial de 17 mm, como se muestra en la figura 6.4.

$$l = l_1 + l_2 + l_3 \quad (6.16)$$

$$l = (17 + 17 + 17)mm = 51 mm$$

Las bobinas del solenoide son de cable sólido de cobre y para su selección se utiliza la tabla de tamaño de conductores AWG del Anexo 12, donde se observa que para el caso de una intensidad de corriente de 1 A, le corresponde un cable con calibre 21, pero por razones de seguridad y disponibilidad en el mercado, se selecciona un cable de calibre 20 que tiene un diámetro de 0,8128 mm.

El número de capas de bobinado que se requiere para obtener las 203 vueltas en cada bobina, viene dado por:

$$\#_{capas} = \frac{ND_{cable}}{l_1} \quad (6.17)$$

$$\#_{capas} = \frac{203 \cdot 0,8128 mm}{17 mm}$$

$$\#_{capas} = 9,7 \approx 10 capas$$

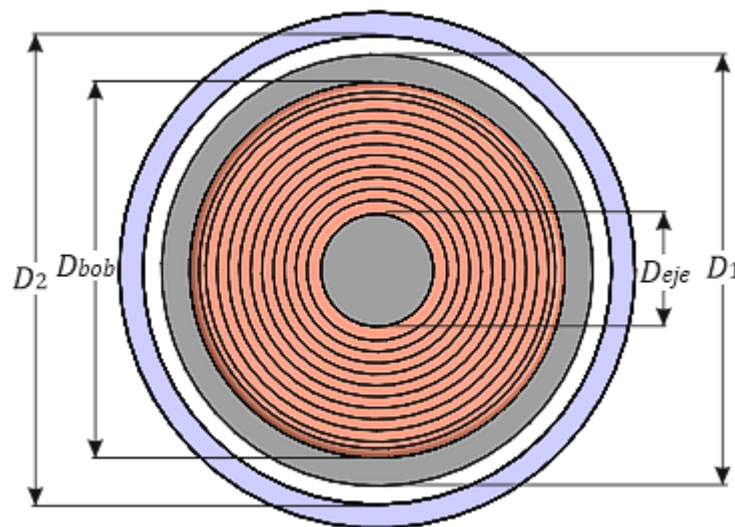


Figura 6.7. Corte transversal del solenoide.

Para un diámetro del eje del pistón de 12 mm, el diámetro exterior de cada bobina (figura 6.7), se obtiene de la siguiente ecuación:

$$D_{bob} = D_{eje} + 2 \cdot \#_{capas} D_{cable} \quad (6.18)$$

$$D_{bob} = 12 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \cdot 0,8128 \text{ mm}$$

$$D_{bob} = 28,26 \text{ mm}$$

El diámetro exterior de la bobina es adecuado ya que es menor que el diámetro del pistón de 48,6 mm. Por lo tanto, el diseño del solenoide está correcto.

Con el fin de comprobar el dimensionamiento del solenoide, éste se analiza mediante un software interactivo por elementos finitos (FEA) para simular y resolver problemas de electromagnetismo tridimensional (3D). Las condiciones de frontera asignadas para ejecutar el análisis se muestran en la figura 6.8. La dirección de la corriente se va alternando en cada bobina para que los campos magnéticos no se anulen entre sí. Esto se realiza enrollando las bobinas en sentido opuesto.

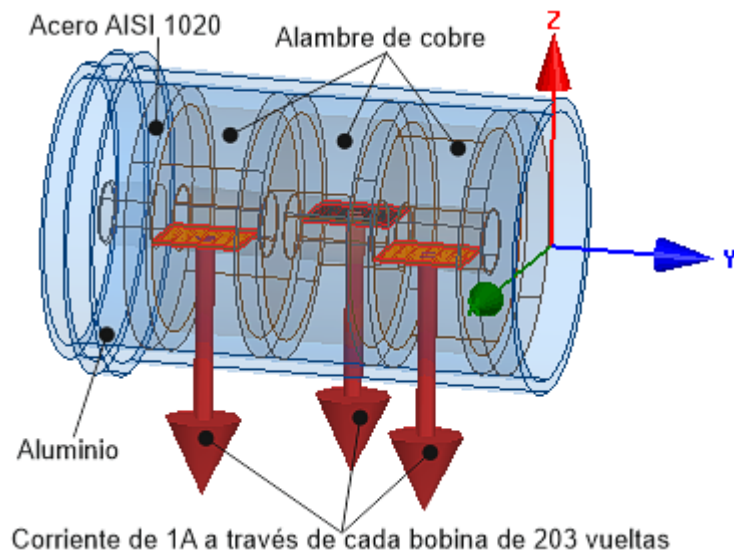


Figura 6.8. Condiciones de frontera para al análisis de electromagnetismo.

En la figura 6.9 se observa la distribución y la dirección del campo magnético generado por las tres bobinas del solenoide. La mayor intensidad de campo se produce en el núcleo del solenoide, principalmente en los dos discos centrales del pistón y su magnitud es de 1,0108 T.

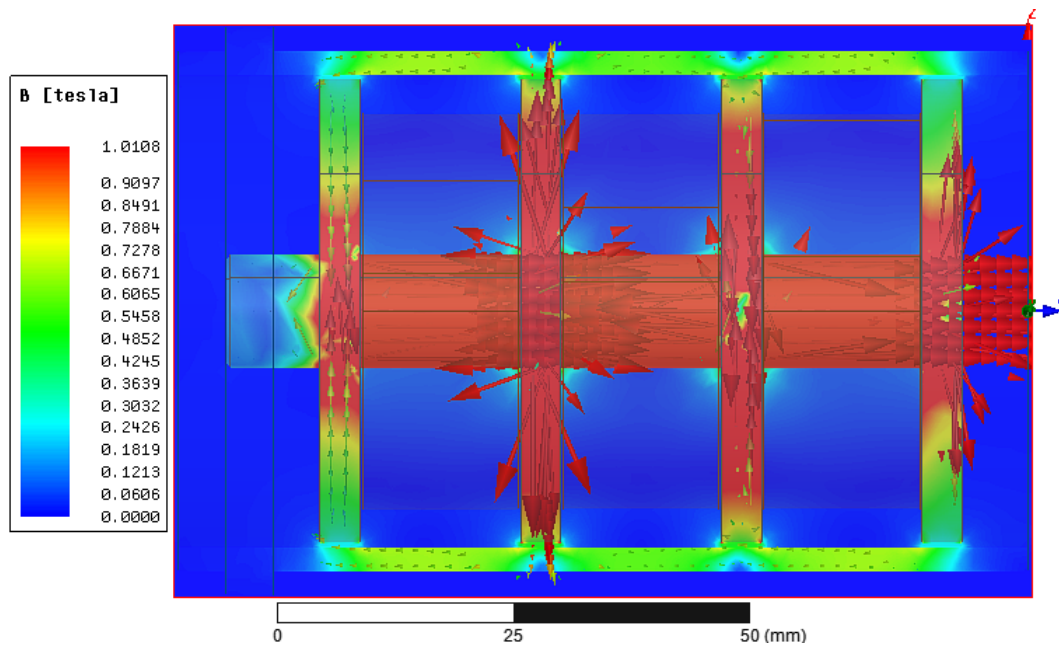


Figura 6.9. Distribución y dirección del campo magnético en el plano YZ.

En la figura 6.10 se aprecia la distribución del campo magnético en 3D y se determina que las líneas de campo tienen una dirección radial, de tal manera que se garantiza que el campo magnético atraviese el canal de flujo en dirección perpendicular al flujo de MRF-140CG a lo largo de toda la circunferencia externa de cada uno de los cuatro discos circulares que conforma el pistón del amortiguador.

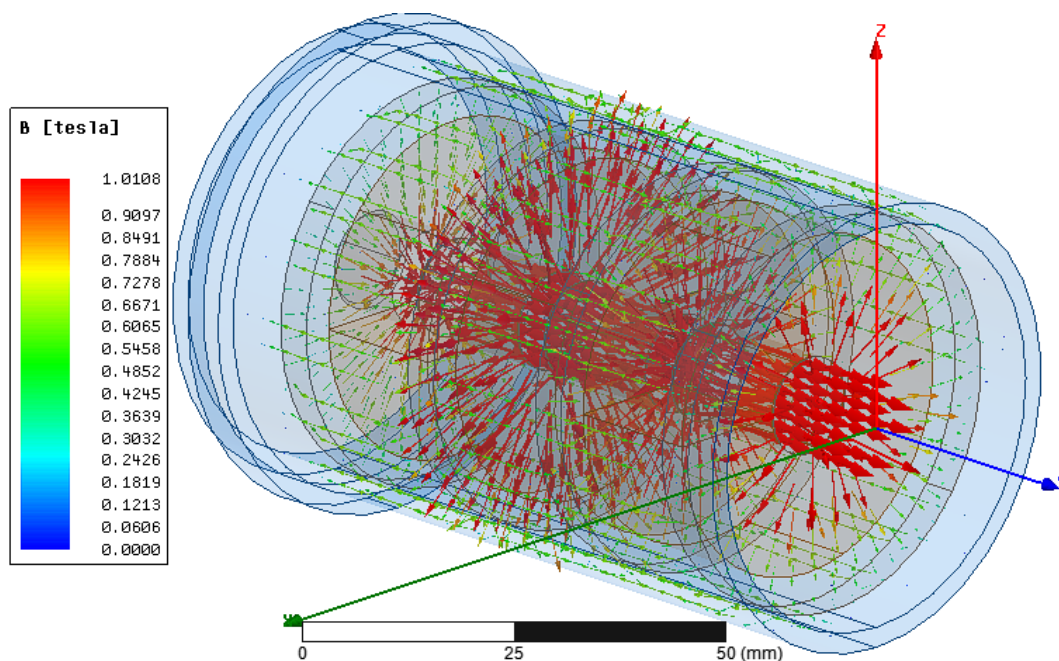


Figura 6.10. Distribución y dirección del campo magnético en 3D.

6.7.5 Diseño de los Componentes Mecánicos del Amortiguador

A continuación, se describe el análisis de esfuerzos y el diseño de los principales componentes mecánicos del amortiguador magnetoreológico. Los planos de construcción se presentan en el Anexo 13.

6.7.5.1 Diseño del Pistón

Como se mencionó en la sección anterior el pistón representado en la figura 6.11, se fabricó en acero AISI 1020, cuyas propiedades mecánicas se muestran en el Anexo 14. Bajo condiciones críticas de funcionamiento, el pistón debe soportar la fuerza total de amortiguamiento ($F_T = 6248,27 \text{ N}$) que se genera cuando se induce el campo magnético de 1,0 T. Dicha fuerza actúa de forma proporcional sobre las superficies cilíndricas externas de los cuatro discos que forman el pistón.

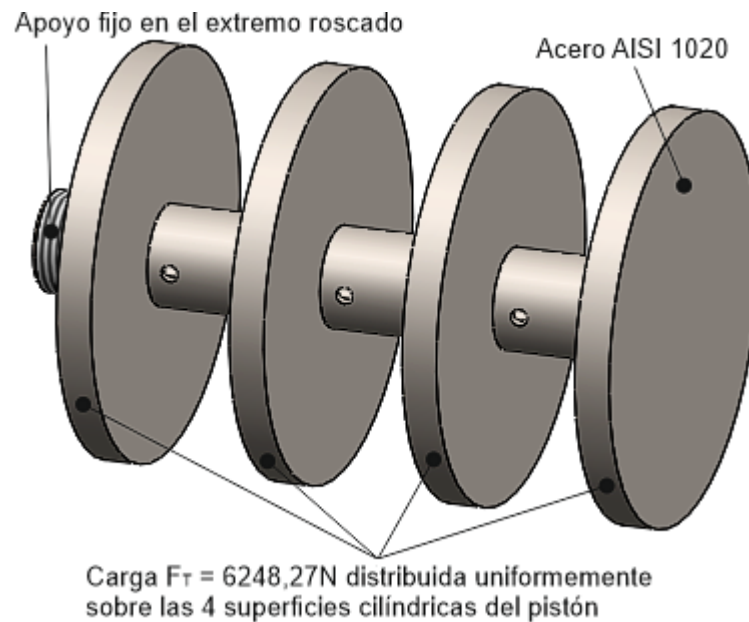


Figura 6.11. Condiciones de frontera en el pistón del amortiguador.

El análisis de esfuerzos del pistón se realiza mediante un software de análisis por elementos finitos con un mallado con elementos sólidos tetraédricos parabólicos de orden superior, como se muestra en la figura 6.12, debido a que este tipo de elementos representan con mayor precisión los contornos curvos y producen mejores aproximaciones matemáticas.

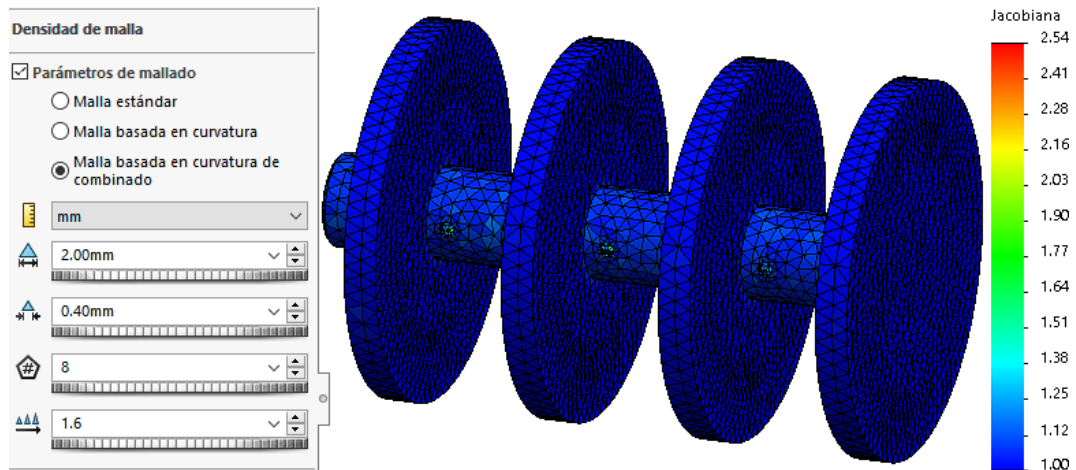


Figura 6.12. Características del mallado del pistón.

En los resultados de la figura 6.13, se observa que el máximo esfuerzo de Von Mises se produce en el agujero para el paso del alambre del bobinado y alcanza un valor de 121,74 MPa, sin embargo, al ser este esfuerzo menor que la resistencia a la fluencia del acero AISI 1020, el pistón resiste el esfuerzo máximo sin fallar.

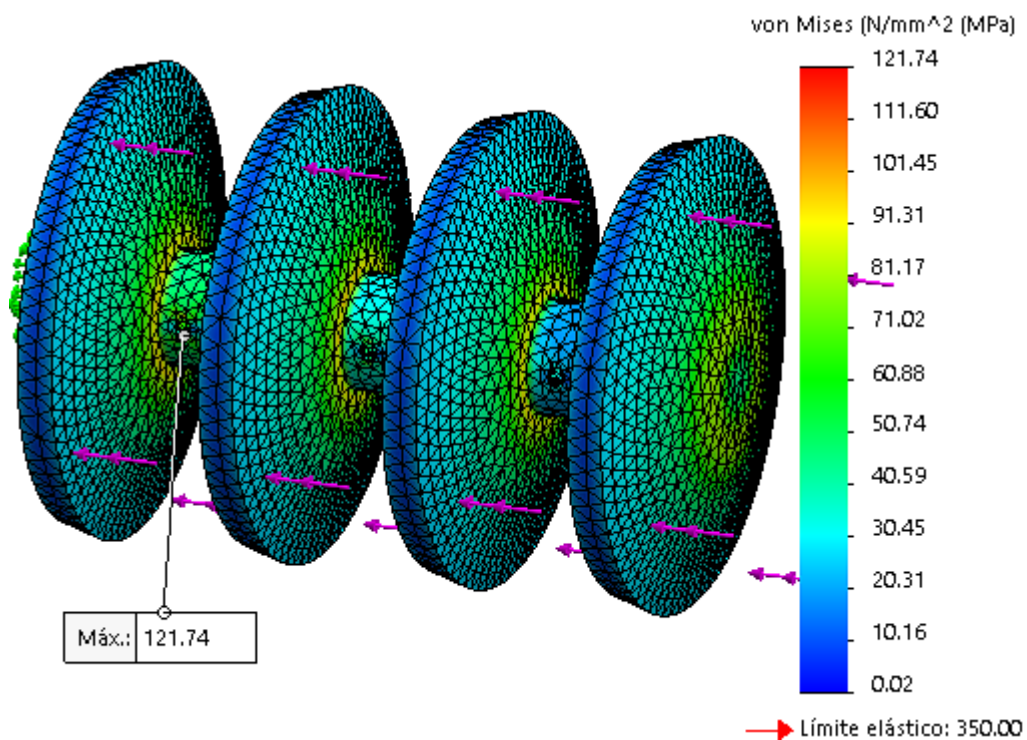


Figura 6.13. Distribución de esfuerzos en el pistón.

Con respecto a la distribución del factor de seguridad, en la figura 6.14 se puede apreciar que las zonas críticas del pistón se encuentran en el agujero para el cable

del bobinado y en la base de los discos circulares del pistón, pero al ser su valor mínimo 2.87, se concluye que el diseño del pistón es seguro y cumple con los requerimientos de resistencia bajo condiciones críticas de funcionamiento.

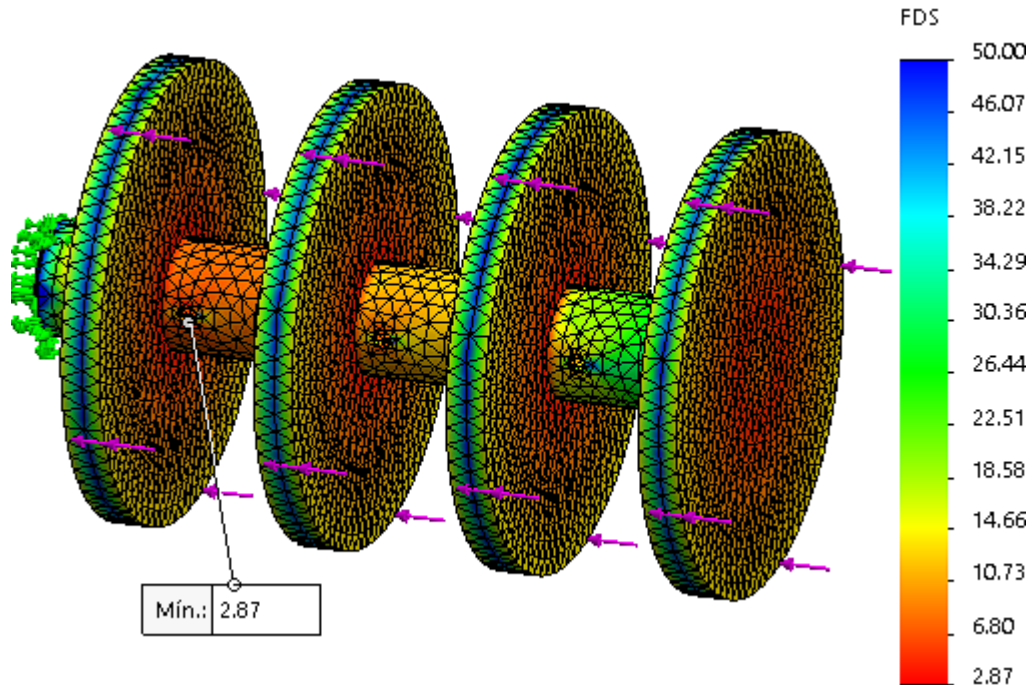


Figura 6.14. Distribución del factor de seguridad en el pistón.

6.7.5.2 Diseño del Cilindro

Con el propósito de reducir el peso del amortiguador y al mismo tiempo garantizar su integridad estructural y su adecuado funcionamiento cuando sobre él actúan las cargas máximas de amortiguamiento, para fabricar el cilindro se utiliza la aleación de aluminio 7075-T6, cuyas propiedades mecánicas se muestran en el Anexo 15.

Bajo condiciones críticas de funcionamiento, el cilindro debe resistir la presión total ($\Delta P = 3,361 \text{ MPa}$) que se genera en el amortiguador cuando el fluido MRF-140CG se encuentra bajo la acción de un campo magnético de 1,0 T. Como se muestra en la figura 6.15, esta presión actúa sobre todas las paredes internas del cilindro.

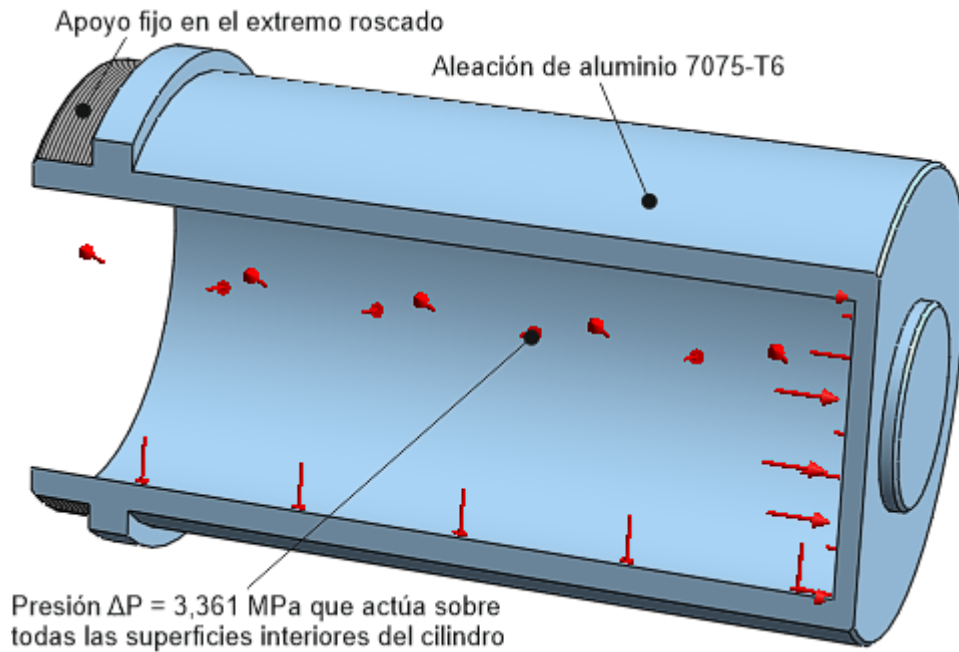


Figura 6.15. Condiciones de frontera en el cilindro del amortiguador.

Para el análisis de esfuerzos en el cilindro se aplica el mallado con elementos sólidos tetraédricos parabólicos mostrado en la figura 6.16, debido a que este tipo de elementos representan con mayor precisión los contornos curvos.

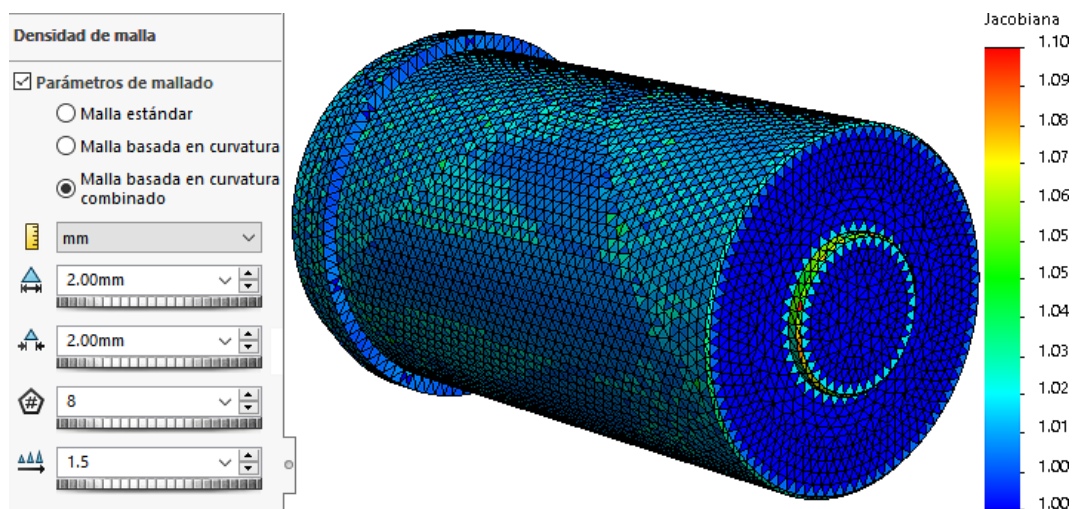


Figura 6.16. Características del mallado del cilindro.

De los resultados del análisis de esfuerzos en el cilindro en la figura 6.17, se aprecia que el esfuerzo de Von Mises máximo tiene un valor de 183,21 MPa y se produce en la base del cilindro, sin embargo, este esfuerzo no supera la resistencia a la fluencia del material, por lo que el cilindro no falla.

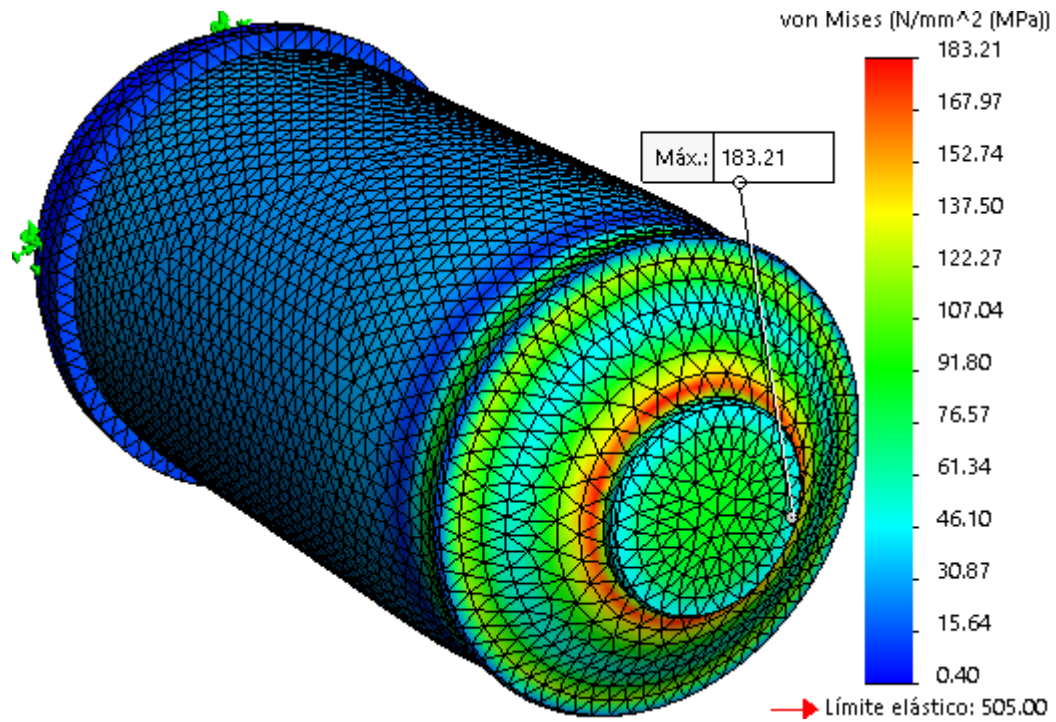


Figura 6.17. Distribución de esfuerzos en el cilindro.

En la distribución del factor de seguridad mostrado en la figura 6.18, se aprecia que las zonas críticas se encuentran en la base del cilindro, pero al ser su valor mínimo 2.76, se considera que el espesor de pared de 2,5 mm, es adecuado para el cilindro.

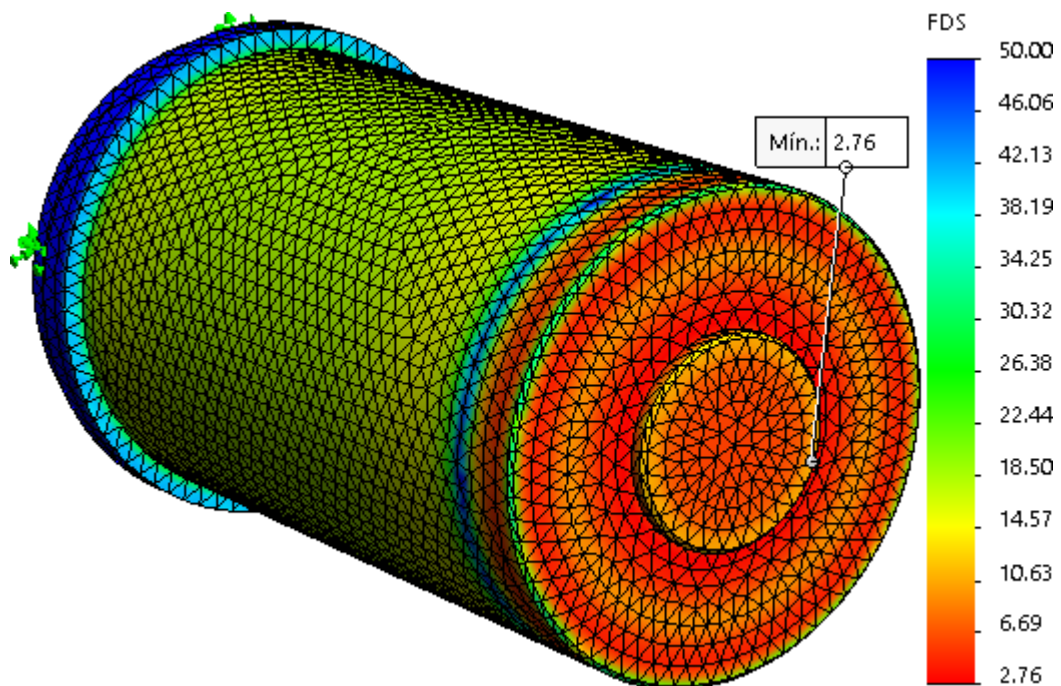


Figura 6.18. Distribución del factor de seguridad en el cilindro.

6.7.5.3 Diseño del Vástago

El vástago es el elemento que transmite la fuerza de amortiguamiento a los otros componentes mecánicos de la prótesis, por lo que debe ser capaz de resistir la fuerza total desarrollada por el amortiguador cuando el cilindro se encuentra totalmente extendido.

Con el propósito de evitar problemas de oxidación en el vástago y al mismo tiempo evitar que el campo magnético se transmita a los otros componentes de la prótesis, el vástago se fabrica de un material inoxidable y paramagnético que para este caso es el acero inoxidable AISI 316.

Como se ilustra en la figura 6.19, el vástago del amortiguador tiene la forma de una pieza estructural larga y esbelta que soporta una carga axial de compresión que tiende a hacerlo fallar por inestabilidad elástica o pandeo. Por este motivo, el vástago se analiza como columna.

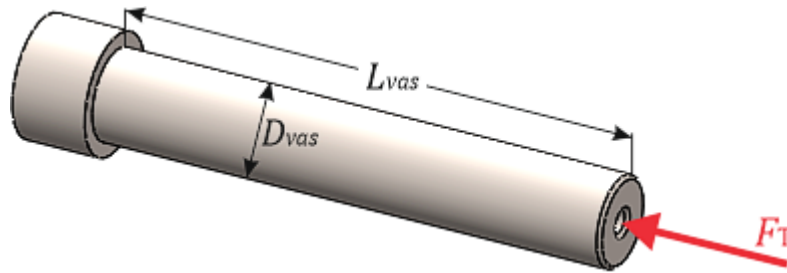


Figura 6.19. Vástago del amortiguador.

El diámetro del vástago es igual al diámetro del eje del pistón, es decir 12 mm. Las propiedades de la sección transversal de la columna se calculan a continuación.

Área de sección transversal, es:

$$A = \frac{\pi}{4} D_{vas}^2 \quad (6.19)$$

$$A = \frac{\pi}{4} 0,012^2$$

$$A = 0,113 \cdot 10^{-3} m^2$$

El radio de giro mínimo para una sección circular viene dado por:

$$r = \frac{D_{vas}}{4} \quad (6.20)$$

$$r = 0,003 \text{ m}$$

Para una longitud del vástago de 70 mm, la longitud efectiva de la columna, viene dado por la siguiente ecuación:

$$L_e = KL_{vas} \quad (6.21)$$

$$L_e = 2,1 \cdot 0,07 \text{ m}$$

$$L_e = 0,147 \text{ m}$$

Donde:

- K es el factor de fijación de los extremos y para una columna con un extremo fijo y el otro libre $K = 2,1$.

Entonces la relación delgadez de la columna es:

$$Rel. Delg. = \frac{L_e}{r} \quad (6.22)$$

$$Rel. Delg. = \frac{0,147 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}$$

$$Rel. Delg. = 49,0$$

La constante de la columna se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (6.23)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 193 \cdot 10^9}{172 \cdot 10^6}}$$

$$C_c = 148,83$$

Donde:

- E es el módulo de elasticidad del acero inoxidable AISI 316 = $193 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- S_y es el límite de resistencia a la fluencia del acero AISI 316 = $172 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Como $Rel. Delg. < C_c$, la columna es corta y la carga crítica que puede soportar se obtiene a partir de la ecuación de J. B. Johnson:

$$F_{Cr} = AS_y \left[1 - \frac{S_y(L_e/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (6.24)$$

$$F_{Cr} = 0,113 \cdot 10^{-3} \cdot 172 \cdot 10^6 \left[1 - \frac{172 \cdot 10^6 \cdot 49,0^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 193 \cdot 10^9} \right]$$

$$F_{Cr} = 18398,39 \text{ N}$$

El factor de seguridad que se tiene en el vástago, es:

$$F.S. = \frac{F_{Cr}}{F_T} \quad (6.25)$$

$$F.S. = \frac{18398,39}{6248,27}$$

$$F.S. = 2,945$$

En la figura 6.20 se muestra el ensamblaje en 3D de los componentes principales del prototipo de amortiguador magnetoreológico para prótesis transfemoral.

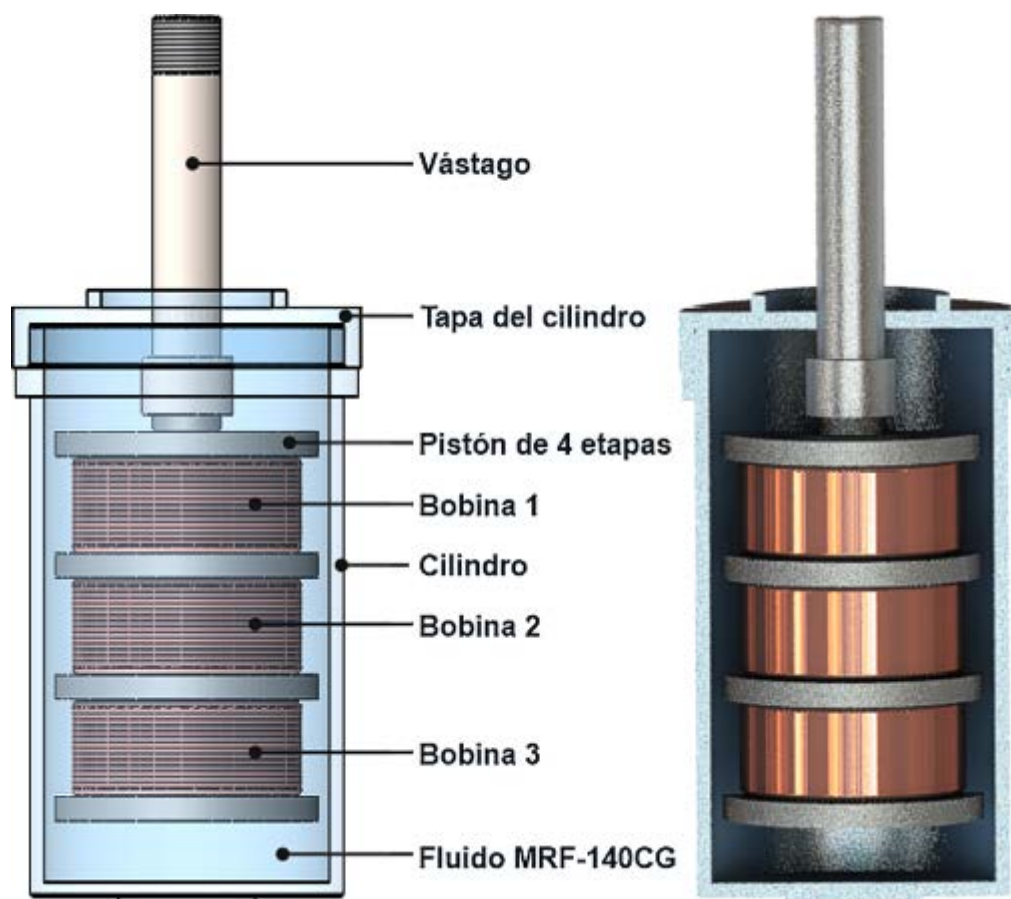


Figura 6.20. Ensamblaje del prototipo de amortiguador magnetoreológico.

6.8 Administración

En esta sección se realiza un análisis de costo, tanto para realizar las pruebas del fluido en los laboratorios como para la construcción del prototipo de amortiguador magnetoreológico para prótesis transfemoral.

Tabla 6.1. Costos de los ensayos de laboratorio.

CANT.	DETALLE	PRECIO (Unitario)	TOTAL (USD)
1	Muestras de fluido MRF-140CG (250 cm3)	\$ 550,00	\$ 550,00
1	Electroimán de 1 Tesla	\$ 200,00	\$ 200,00
1	Celda de carga	\$ 50,00	\$ 50,00
1	Materiales para ensayos de laboratorio - ESPE	\$ 250,00	\$ 250,00
1	Ensayos de laboratorio - Centro Carrocero	\$ 600,00	\$ 600,00
1	Transporte de las muestras de MRF-140CG	\$ 100,00	\$ 120,00
		TOTAL	\$ 1750,00

Tabla 6.2. Costos para la construcción del amortiguador magnetoreológico.

CANT.	DETALLE	PRECIO (Unitario)	TOTAL (USD)
1	Fluido MRF-140CG (120 cm3)	\$ 250,00	\$ 250,00
1	Eje de aleación de aluminio 7075-T6 (3x8) plg	\$ 120,00	\$ 120,00
1	Eje de acero AISI 1020 (2x6) plg	\$ 30,00	\$ 30,00
1	Eje de acero inoxidable AISI 316 (1x4) plg	\$ 50,00	\$ 50,00
30 m	Alambre de cobre calibre 20	\$ 1,5	\$ 45,00
2	Empaques	\$ 10,00	\$ 20,00
50 h	Mecanizado en torno CNC de los componentes	\$ 5,00	\$ 250,00
20 h	Ensamblaje del amortiguador	\$ 3,00	\$ 60,00
		TOTAL	\$ 825,00

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Bhavsar, N. Y. Vaidya, P. Ganguly. A. Humphreys, A. Robisson, G. McKinley, H. Tu, N. Wicks and F. Pauchet, “Intelligence in Novel Materials”, Oilfield Review, pp. 32-41, May. 2008.
- [2] D. Carlson, B. Marjoram, J. Toscano, D. Leroy, K. Burson, K. St Clair and A. Kintz, “Magneto-Rheological Technology and Applications”, Lord Corporation, Cary, USA, 2007.
- [3] S. E. Premalatha, R. Chokkalingam and M. Mahendran, “Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids”, American Journal of Polymer Science, pp. 50-55, 2012.
- [4] B. K. Kumbhar, S. R. Patil and S. M. Sawant, “Synthesis and characterization of magneto-rheological (MR) fluids for MR brake application”, Engineering Science and Technology Journal, vol. 18, pp. 432-438, 2015.
- [5] C. Molina, M. Ardila, and A. Hernández, “Modelling of magnetorheological fluid produced by mineral magnetite”, Ingenio Magno Journal, vol. 5 pp. 120-127, Dic. 2014.
- [6] Y. Sato, K. Sunakoda, H. Sodeyama and K. Hiramoto, “Investigation on the detailed resistance force of MRF damper”, IEEE Xplore in SICE Annual Conference, pp. 917-922, Sep. 2013.
- [7] M. M. Mrokowska, P. M. Rowinski, and M. B. Kalinowska, “A methodological approach of estimating resistance to flow under unsteady flow conditions”, Hydrology Earth System Sciences, vol. 19, pp. 4041-4053, Oct. 2015.
- [8] C. D. Mesquida and J. L. Lässig, “Solución numérica de la ecuación constitutiva para fluidos magnetoreológicos”, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, vol. 33, pp. 2231-2246, Sep. 2014.

- [9] D. J. Leo, Engineering analysis of smart material systems, 1st ed, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] L. Wen, D. Vogt, Z. Shi, Q. Shen and Z. Ren, Design, Fabrication, Properties and Applications of Smart and Advanced Materials, 1st ed, X. Hou, Ed. Florida, United States of America: Taylor & Francis Group, 2016.
- [11] D. Velte, I. Jiménez, N. Murillo, O. Adarraga and A. Pérez, “Nuevos Materiales Inteligentes”, Fundación Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial y Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, España, 2011.
- [12] S. B. Choi and Y. M. Han, Magnetorheological Fluid Technology Applications in Vehicle Systems, 1st ed, Florida, United States of America: Taylor & Francis Group, 2013.
- [13] H. P. Monner and P. Wierach, “Overview of smart-structures technology at the German Aerospace Center”, Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, pp. 1-19, Ago. 2006.
- [14] S. Egusa and N. Iwasawa, “Piezoelectric Paints as One Approach to Smart Structural Materials with Health- Monitoring Capabilities”, Smart Materials and Structures, vol. 7, pp. 438–445, 1Sep. 1998.
- [15] H. Y. Luo and E. W. Abel, “A comparison of methods for the training of NiTi two-way shape memory alloy”, Smart Materials and Structures, vol. 16, pp. 2543–2549, Oct. 2007.
- [16] X. Gao, R. Qiao and L. C. Brinson, “Phase diagram kinetics for shape memory alloys: a robust finite element implementation”, Smart Materials and Structures, vol. 16, pp. 2102–2115, Oct. 2007.
- [17] M. Behl and A. Lendlein, “Shape-Memory Polymers”, Materials Today, vol. 10, pp. 20–28, Apr. 2007.

- [18] X. Guo, L. Liu, B. Zhou, Y. Liu and J. Leng, “Influence of strain rates on the mechanical behaviors of shape memory polymer”, *Smart Materials and Structures*, vol. 24, pp. 01–08, Ago. 2015.
- [19] F. Goncalves, “Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates” Doctor of Philosophy Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Jan. 2005.
- [20] O. Ashour, W. Kordonsky and G. Rogers, “Magnetorheological Fluids: Materials, Characterization and Devices”, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 7, pp. 123–130, Mar. 1998.
- [21] J. D. Carlson, *Smart Materials*, 1st ed, M. Schwartz, Ed. Florida, United States of America: Taylor & Francis Group, 2009.
- [22] S. A. Bin, “The Behaviour of Magnetorheological Fluids in Squeeze Mode” Doctor of Philosophy Thesis, Dublin City University, Dublin, Aug. 2008.
- [23] G. Yang, “Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control” Doctor of Philosophy Thesis, University of Notre Dame, Indiana, Dec. 2010.
- [24] H. Fonseca, E. Gonzalez, J. Restrepo, C. Parra and C. Ortiz, “Magnetic effect in viscosity of magnetorheological fluids”, *Journal of Physics*, vol.687, pp. 01-04, 2016.
- [25] A. Hajalilou, S. A. Mazlan, H. Lavvafi and K. Shameli, *Field Responsive Fluids as Smart Materials*, 1st ed, Singapore City, Singapore: Springer, 2016.
- [26] K. D. Weiss, J. D. Carlson and D. A. Nixon, “Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids”, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 5, pp. 772-775, Nov. 1998.
- [27] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson, “Properties and Application of Commercial Magnetorheological Fluids”, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 10, pp. 05-13, Jan. 1999.

- [28] F. D. Goncalves, M. Ahmadian and J. D. Carlson, “Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities”, *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 75–85, Dec. 2006.
- [29] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd ed, New York, United States of America: McGraw-Hill, 2014.
- [30] M. C. Potter, D. C. Wiggert, B. Ramadan and T. P. Shih, *Mechanics of Fluids*, 4th ed, Stamford, United States of America: Cengage Learning, 2012.
- [31] F. M. White, *Fluids Mechanics*, 8th ed, Rhode Island, United States of America: McGraw-Hill, 2012.
- [32] F. T. Ulaby and U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, 7th ed, Boston, United States of America: Pearson Education, 2015.
- [33] W. H. Hayt and J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, 8th ed, New York, United States of America: McGraw-Hill, 2012.
- [34] H. D. Young y R. A. Freedman, *Física III - Electromagnetismo*, Sears y Zemansky, 14ta ed, Sao Paulo, Brasil: Pearson Education, 2015.
- [35] D. C. Giancoli, *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*, 6ta ed, Ciudad de México, México: Prentice Hall, 2016.
- [36] R. A. Serway y C. Vuille, *Fundamentos de Física*, 9na ed, Santa Fe, México: Cengage Learning, 2012.
- [37] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, 1st ed, New York, United States of America: Cambridge University Press, 2009.
- [38] D. R. Askeland and W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 7th ed, Stamford, United States of America: Cengage Learning, 2017.
- [39] P. Fulay and J. K. Lee, *Electronic, Magnetic, and Optical Materials*, 2nd ed, Y. Gogotsi, Ed. Philadelphia, United States of America: CRC Press, 2017.

- [40] J. D. Carlson, “MR fluids and devices in the real world”, *International Journal of Modern Physics B*, vol. 19, pp. 1463-1470, 2005.
- [41] D. H. Wang and W. H. Liao, “Magnetorheological Fluid Dampers: A Review of Parametric Modelling”, *Smart Materials and Structures*, vol. 20, pp. 01–34, Jun. 2011.
- [42] J. Goldasz and B. Sapiński, *Insight into Magnetorheological Shock Absorbers*, 1st ed, Bundesstadt, Switzerland: Springer, 2015.
- [43] G. Yang, B. F. Spencer, J. D. Carlson and M. K. Sain, “Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations”, *Engineering Structures*, vol. 20, pp. 309-323, 2002.
- [44] J. Berasategui, M. J. Elejabarrieta and M. M. Bou-Ali, “Characterization analysis of a MR damper”, *Smart Materials and Structures*, vol. 23, pp. 01-12, Mar. 2014.
- [45] R. Hernández, C. Fernández y M. P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6ta ed, Santa Fe, México: McGraw-Hill, 2014.
- [46] V. Rajtukov, M. Michalíková, L. Bednarcíková, A. Balogová and J. Zivcak, “Biomechanics of Lower Limb Prostheses”, *Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems*, vol. 96, pp. 382-391, 2014.
- [47] M. Iosa, A. Fusco, F. Marchetti, G. Morone, C. Caltagirone, S. Paolucci and A. Peppe, “The Golden Ratio of Gait Harmony: Repetitive Proportions of Repetitive Gait Phases”, *BioMed Research International*, vol. 2013, pp. 01-07, Apr. 2013.

ANEXOS

ANEXO 1

Ficha técnica de los fluidos MRF-140CG

MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-140CG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-140CG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-140CG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-140CG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-140CG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

For more information on MR technology, refer to the MR Design Guides located on www.lord.com/mr.

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redisperse the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-1200 sec ⁻¹	0.280 ± 0.070
Density	
g/cm ³	3.54-3.74
(lb/gal)	(29.5-31.2)
Solids Content by Weight, %	85.44
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

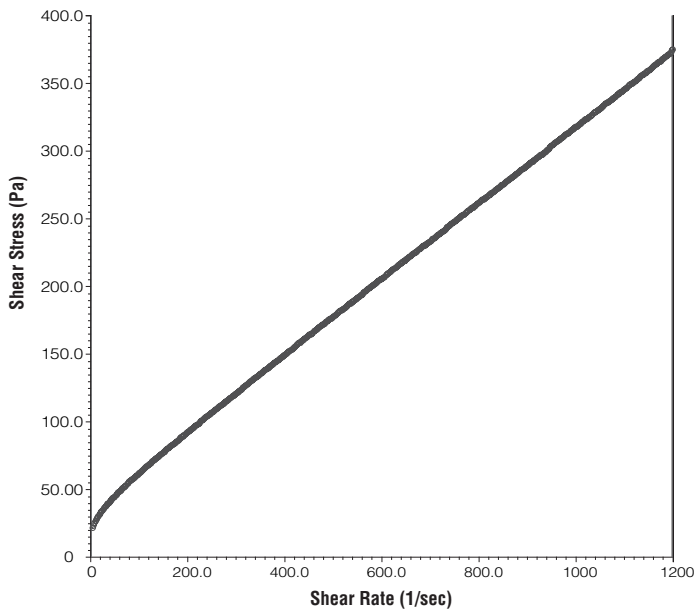
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

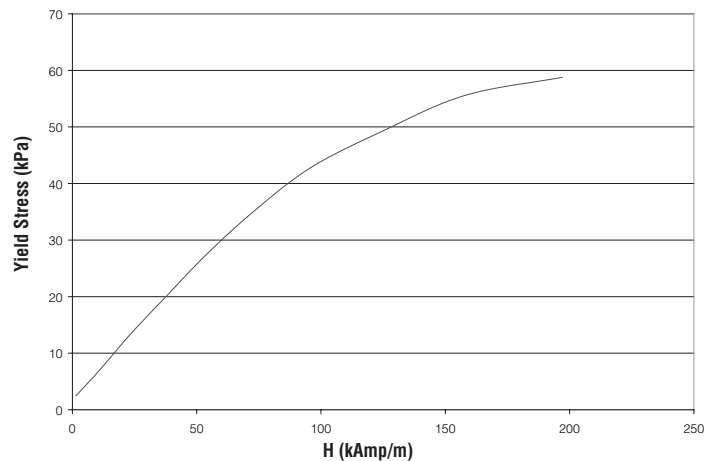
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

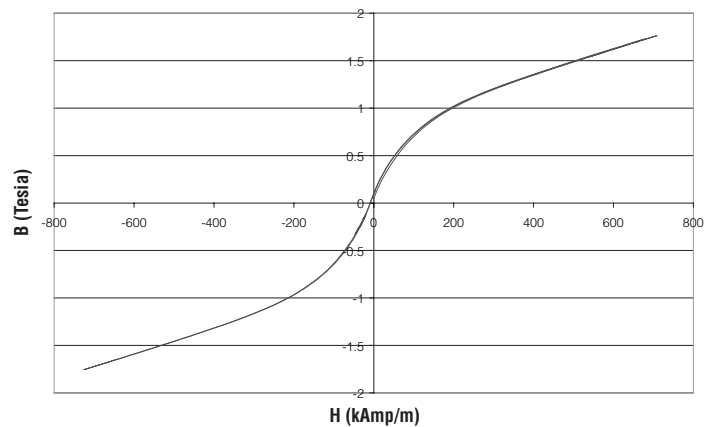
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

"Ask Us How" is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide . . . Ask Us How.

LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)
+1 877 ASK LORD (275 5673)

www.lord.com

ANEXO 2

**Datos obtenidos en los ensayos de laboratorio con el reómetro Anton Paar
Physica MCR-501 y el dispositivo magnetoreológico MRD-70/1Text**

Velocidad de deformación (1/s)	Viscosidad aparente (Pas)															
	20 °C				30 °C				40 °C				50 °C			
	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	800 mT
0,035	280,320	150543,060	520967,370	927892,390	165,332	201776,770	606136,630	977323,170	1088549,400	108,364	168666,050	569723,800	927940,890	1129474,700	124,173	179321,820
0,044	254,253	125425,150	447376,150	776137,510	91,3880,410	147,898	171708,150	507932,200	829032,020	99,989	136854,060	536650,390	821431,720	914736,410	113,124	153342,970
0,054	225,252	106879,200	391275,610	649885,040	75,4684,850	135,041	146752,520	454402,460	64834,190	91,006	116975,180	434844,080	621917,500	731790,730	87,940	127827,560
0,065	202,204	86677,747	311139,950	542415,000	638317,050	124,798	123254,900	358917,980	570818,150	84,137	96772,099	347083,390	551284,250	598944,440	88,552	108950,840
0,078	184,433	71123,827	262085,140	452350,020	534863,540	115,208	97913,619	294747,000	460883,110	74,357	81867,181	283773,470	440038,750	486551,700	80,331	89725,043
0,094	166,432	59621,584	224920,980	374866,400	444427,670	100,771	80940,667	247642,940	386582,330	68,249	69574,798	242301,760	376923,340	406984,600	71,656	74962,904
0,113	150,948	49777,990	187169,150	315273,120	362169,170	94,753	66566,489	208397,980	326673,880	64,322	57962,824	196520,050	360186,130	421232,420	64,234	63770,734
0,136	135,626	41984,811	156164,000	258782,270	301210,560	87,041	56248,082	167940,230	266671,120	57,683	48387,253	163330,160	241249,200	268798,880	60,455	52005,976
0,164	123,640	35414,274	129893,580	215333,490	248245,030	79,458	47661,894	142732,770	206979,610	54,212	40492,333	142433,570	201736,980	224304,130	54,489	44853,552
0,198	109,470	29863,055	106895,870	176642,480	207610,760	71,883	40141,102	117888,130	191777,510	50,299	34265,781	110455,920	164760,740	188022,730	49,150	37521,835
0,238	96,952	25083,031	89369,684	146269,140	168591,390	64,382	33022,256	96879,336	141801,830	45,314	28859,375	93929,917	135065,470	157115,470	45,147	31681,162
0,287	84,952	21353,052	73570,925	120222,810	141637,470	57,660	27891,543	80147,646	116160,370	41,641	24150,081	77482,730	111155,820	130298,350	41,42	26744,209
0,346	73,614	18307,659	62219,935	98278,925	117610,610	50,756	24306,813	66888,294	96883,139	39,327	20423,512	63805,381	91779,899	110746,740	37,904	22756,205
0,417	64,129	15661,943	51748,396	80866,813	96932,448	44,563	19420,864	55429,224	80721,180	35,747	21047,818	49692,680	76440,213	90229,081	34,700	19033,454
0,502	55,633	13303,627	42653,387	67999,974	79838,474	38,962	16326,601	45743,357	67620,493	32,210	12551,559	42205,455	62893,418	74811,777	30,615	17194,975
0,605	48,120	11366,595	35124,888	56227,108	67415,562	33,711	10322,793	38314,356	56312,747	28,956	11892,026	35189,053	52035,391	62404,025	27,061	13333,087
0,729	41,383	9563,084	29320,913	47999,585	55786,575	29,159	11111,512	31622,893	47764,463	25,274	9968,083	28872,209	44307,542	51431,170	23,687	11284,715
0,878	35,836	8003,694	24237,970	39036,708	46154,732	25,347	9309,255	25978,743	39004,334	21,870	8414,410	23792,431	36410,935	42881,949	20,727	9696,688
1,058	30,724	6619,865	20027,332	33135,672	39125,905	21,766	7741,621	21537,375	32423,423	19,366	7171,992	19742,106	30590,315	35003,771	17,904	8433,264
1,275	26,582	5635,679	16432,710	27923,388	32448,446	18,862	6504,050	17588,073	26600,776	16,729	6087,759	15713,655	24672,231	29221,816	15,427	7088,486
1,537	22,839	4651,969	13714,725	22551,381	27771,120	16,146	5444,785	14527,780	21835,660	14,507	5167,472	13190,764	20258,886	23973,926	13,129	5865,943
1,852	19,758	3876,511	11286,988	18461,995	22408,455	13,885	4530,484	11891,340	18353,679	12,446	4294,393	10860,897	17233,428	19999,127	11,370	4884,203
2,231	17,074	3263,942	9426,449	15356,619	18557,369	12,041	3749,104	9861,275	15027,206	10,763	3618,377	8927,645	13882,545	16648,157	9,741	3848,991
2,689	14,766	2712,869	7788,942	12862,329	15433,086	10,387	3070,838	8039,869	12303,038	9,324	3041,503	7728,107	11305,565	13655,643	8,370	3340,770
3,240	12,789	2269,529	6475,675	10601,277	12850,084	8,980	2589,099	6549,843	10256,859	8,043	2555,676	5948,802	9474,341	11423,049	7,199	2776,765
3,904	11,134	1924,658	5359,333	8759,205	10479,060	7,799	2200,178	5454,447	8278,100	6,914	2155,356	4893,103	7751,413	9385,591	6,216	2291,723
4,705	9,687	1619,428	4358,373	7194,016	8781,169	6,786	1855,254	4559,803	6880,695	6,025	1774,936	4044,710	6417,088	7839,693	5,368	1893,436
5,669	8,448	1347,494	3559,878	5951,349	7340,862	5,883	1545,858	3685,440	5774,528	5,229	1441,795	3369,429	5329,379	6439,633	4,630	1577,616
6,831	7,409	1127,733	2999,734	4915,101	6005,500	5,127	1269,635	3079,897	4750,282	4,552	1163,065	2795,612	4302,661	5237,946	3,985	1318,096
8,321	6,514	909,724	2525,835	4055,210	5027,325	4,493	1068,267	2538,771	3877,382	4,179	999,124	2332,887	3544,861	4389,390	3,466	1096,738
9,919	5,740	779,573	2058,150	3400,002	4194,206	3,954	916,462	2113,518	3218,044	3,740	872,355	1878,482	2988,084	3633,286	3,027	892,024
11,952	5,090	657,649	1730,661	2843,827	3461,522	3,467	733,716	1730,084	2690,616	3,038	654,978	1579,325	2514,295	3009,814	2,623	748,963
14,402	4,521	542,763	1434,420	2352,982	2883,108	3,081	636,104	1437,180	2220,683	2,658	564,515	1310,933	2065,525	2505,225	2,311	611,353
17,355	4,043	454,318	1201,017	1995,778	2317,405	2,733	511,575	1188,485	1803,477	2,354	470,309	1077,507	1718,157	2081,512	2,017	508,055
20,913	3,629	370,153	987,690	1641,187	1972,769	2,433	434,202	994,575	1528,954	2,076	390,456	894,341	1376,961	1649,264	1,779	415,918
25,199	3,275	316,627	832,454	1365,948	1652,256	2,186	365,894	827,055	1271,673	1,856	304,031	747,198	1173,545	1431,152	1,576	344,955
30,364	2,977	253,811	699,477	1123,335	1368,093	1,971	307,032	690,728	1055,469	1,658	261,384	616,061	984,409	1169,486	1,403	274,190
36,590	2,717	222,180	589,252	944,573	1123,777	1,785	255,781	578,659	879,881	1,488	224,306	512,065	803,174	967,551	1,252	230,778
44,090	2,497	202,269	491,955	798,292	948,848	1,628	214,813	482,798	732,163	1,345	186,920	427,564	673,129	801,392	1,124	190,273
53,129	2,308	190,879	417,172	667,125	817,840	1,493	173,337	407,093	615,062	1,225	158,780	357,641	563,152	670,684	1,014	160,279
64,020	2,146	170,965	366,200	560,043	655,405	1,377	148,701	344,577	514,709	1,118	131,146	298,585	460,970	556,664	0,922	133,308
77,143	2,007	154,477	312,845	471,188	549,818	1,278	126,823	293,288	434,510	1,030	109,215	251,798	386,000	464,664	0,841	113,865
92,958	1,889	125,256	272,968	399,029	464,820	1,193	115,143	244,590	364,255	0,942	91,040	212,987	326,075	387,009	0,771	97,920
112,015	1,704	105,635	233,734	334,549	394,071	1,119	98,007	197,939	311,042	0,887	76,953	179,366	269,163	326,052	0,712	78,718
134,973	1,694	87,150	196,299	283,767	325,798	1,056	81,984	183,321	252,855	0,830	66,182	153,078	227,697	271,404	0,663	70,838
162,644	1,615	78,166	165,542	239,493	277,094	1,003	71,278	150,214	213,693	0,782	59,306	127,721	190,500	230,602	0,619	61,426
195,989	1,542	69,632	139,651	200,633	232,338	0,954	60,923	123,238	183,346	0,742	52,332	99,875	162,459	188,420	0,582	56,083
236,170	1,471	51,819	117,648	167,971	198,060	0,912	52,441	106,122	153,566	0,707	44,627	91,608	136,115	158,987	0,551	47,893
284,585	1,395	46,662	100,446	140,094	163,285	0,874	44,348	88,870	129,547	0,677	38,015	78,899	116,859	134,264	0,522	41,183
350,000	1,286	39,173	83,102	118,029	136,824	0,836	36,929	75,399	128,309	0,651	32,234	68,176	98,207	113,111	0,499	35,032

ANEXO 3

**Datos de las mediciones en laboratorio de la viscosidad aparente sin campo
magnético**

Velocidad deformación (1/s)	Viscosidad aparente (Pa·s)			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
	0 mT	0 mT	0 mT	0 mT
0,035	280,320	165,332	108,364	124,173
0,044	254,253	147,898	99,989	113,124
0,054	225,252	135,041	91,006	97,940
0,065	202,204	124,798	84,137	88,552
0,078	184,433	115,208	74,357	80,331
0,094	166,432	100,771	68,249	71,656
0,113	150,948	94,753	64,322	64,234
0,136	135,626	87,041	57,683	60,455
0,164	123,640	79,458	54,212	54,489
0,198	109,470	71,883	50,299	49,150
0,238	96,952	64,382	45,314	45,147
0,287	84,952	57,660	41,641	41,412
0,346	73,614	50,756	39,327	37,904
0,417	64,129	44,563	35,747	34,700
0,502	55,633	38,962	32,210	30,615
0,605	48,120	33,711	28,956	27,061
0,729	41,383	29,159	25,274	23,687
0,878	35,836	25,347	21,870	20,727
1,058	30,724	21,766	19,366	17,904
1,275	26,582	18,862	16,729	15,427
1,537	22,839	16,146	14,507	13,129
1,852	19,758	13,885	12,446	11,370
2,231	17,074	12,041	10,763	9,741
2,689	14,766	10,387	9,324	8,370
3,240	12,789	8,980	8,043	7,199
3,904	11,134	7,799	6,914	6,216
4,705	9,687	6,786	6,025	5,368
5,669	8,448	5,883	5,229	4,630
6,831	7,409	5,127	4,552	3,985
8,231	6,514	4,493	3,955	3,466
9,919	5,740	3,954	3,442	3,027
11,952	5,090	3,467	3,038	2,623
14,402	4,521	3,081	2,658	2,311
17,355	4,043	2,733	2,354	2,017
20,913	3,629	2,433	2,076	1,779
25,199	3,275	2,186	1,856	1,576
30,364	2,977	1,971	1,658	1,403
36,590	2,717	1,785	1,488	1,252
44,090	2,497	1,628	1,345	1,124
53,129	2,308	1,493	1,225	1,014
64,020	2,146	1,377	1,118	0,922
77,143	2,007	1,278	1,030	0,841
92,958	1,889	1,193	0,952	0,771
112,015	1,784	1,119	0,887	0,712
134,973	1,694	1,056	0,830	0,663
162,644	1,615	1,003	0,782	0,619
195,989	1,542	0,954	0,742	0,582
236,170	1,471	0,912	0,707	0,551
284,585	1,395	0,874	0,677	0,522
350,000	1,286	0,836	0,651	0,499

ANEXO 4

**Datos de las mediciones en el laboratorio del esfuerzo cortante sin campo
magnético**

Velocidad deformación (1/s)	Esfuerzo cortante (Pa)			
	0 mT			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0,035	10,340	6,098	4,000	4,581
0,044	11,305	6,571	4,446	5,029
0,054	12,062	7,235	4,875	5,247
0,065	13,053	8,054	5,430	5,716
0,078	14,341	8,959	5,783	6,248
0,094	15,595	9,445	6,397	6,715
0,113	17,046	10,699	7,263	7,255
0,136	18,457	11,844	7,849	8,226
0,164	20,273	13,029	8,889	8,934
0,198	21,625	14,203	9,939	9,712
0,238	23,080	15,326	10,790	10,749
0,287	24,371	16,541	11,949	11,881
0,346	25,449	17,548	13,595	13,104
0,417	26,715	18,567	14,893	14,456
0,502	27,927	19,558	16,171	15,371
0,605	29,108	20,392	17,516	16,369
0,729	30,164	21,253	18,421	17,265
0,878	31,475	22,263	19,210	18,205
1,058	32,519	23,036	20,497	18,950
1,275	33,901	24,054	21,336	19,673
1,537	35,099	24,814	22,294	20,176
1,852	36,588	25,711	23,049	21,055
2,231	38,098	26,867	24,016	21,736
2,689	39,702	27,928	25,071	22,506
3,240	41,435	29,094	26,062	23,324
3,904	43,469	30,447	26,995	24,268
4,705	45,573	31,927	28,346	25,255
5,669	47,894	33,350	29,643	26,245
6,831	50,609	35,023	31,093	27,224
8,231	53,621	36,986	32,557	28,533
9,919	56,933	39,219	34,139	30,022
11,952	60,834	41,441	36,306	31,347
14,402	65,106	44,381	38,277	33,286
17,355	70,171	47,423	40,863	35,009
20,913	75,887	50,878	43,407	37,207
25,199	82,534	55,081	46,779	39,708
30,364	90,400	59,860	50,346	42,590
36,590	99,432	65,318	54,455	45,798
44,090	110,106	71,785	59,310	49,545
53,129	122,635	79,304	65,087	53,864
64,020	137,409	88,174	71,605	59,026
77,143	154,830	98,556	79,428	64,848
92,958	175,589	110,898	88,500	71,656
112,015	199,818	125,387	99,394	79,782
134,973	228,649	142,532	112,056	89,432
162,644	262,610	163,110	127,219	100,633
195,989	302,195	186,980	145,493	114,113
236,170	347,393	215,348	166,988	130,082
284,585	396,975	248,675	192,707	148,483
350,000	440,888	286,733	223,260	171,010

ANEXO 5

Datos de resistencia a la fluencia por corte del fluido MRF-140CG

Velocidad deformación (1/s)	RESISTENCIA A LA FLUENCIA POR CORTE (kPa)				
	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT
0,035	0,0103	5,5511	19,2142	34,3930	39,9809
0,044	0,0113	5,5655	20,0336	34,2943	40,7622
0,054	0,0121	5,7245	21,0715	35,2028	40,2625
0,065	0,0131	5,5984	20,1270	35,1319	41,4377
0,078	0,0143	5,5448	20,5308	35,4783	41,5466
0,094	0,0156	5,5921	21,1156	35,2992	41,6300
0,113	0,0170	5,6265	21,2181	35,7610	41,2762
0,136	0,0185	5,7179	21,3424	35,4242	41,3599
0,164	0,0203	5,8121	21,3632	35,4613	40,9484
0,198	0,0216	5,9058	21,1915	34,9753	41,2209
0,238	0,0231	5,9774	21,3568	34,9527	40,3153
0,287	0,0244	6,1320	21,1750	34,6615	40,8608
0,346	0,0254	6,3353	21,5834	34,1244	40,8572
0,417	0,0267	6,5311	21,6322	33,8395	40,5672
0,502	0,0279	6,6852	21,4764	34,2739	40,2532
0,605	0,0291	6,8828	21,3138	34,1438	40,9437
0,729	0,0302	6,9778	21,4411	35,1226	40,8364
0,878	0,0315	7,0369	21,3515	34,4084	40,7083
1,058	0,0325	7,0147	21,2559	35,1975	41,5834
1,275	0,0339	7,1964	21,0159	35,7424	41,4356
1,537	0,0351	7,1579	21,1327	34,7871	42,0942
1,852	0,0366	7,1875	20,9549	34,3093	41,6807
2,231	0,0381	7,2914	21,0913	34,3834	41,5941
2,689	0,0397	7,3029	20,9973	34,7575	41,6750
3,240	0,0414	7,3620	21,0374	34,4644	41,8099
3,904	0,0435	7,5223	20,9811	34,3141	41,0831
4,705	0,0456	7,6272	20,5587	33,9573	41,4826
5,669	0,0479	7,6497	20,2302	33,8444	41,7955
6,831	0,0506	7,7129	20,5449	33,6834	41,1960
8,231	0,0536	7,4988	20,8450	33,4827	41,5521
9,919	0,0569	7,7424	20,4698	33,8323	41,7781
11,952	0,0608	7,8711	20,7385	34,0952	41,5421
14,402	0,0651	7,8277	20,7162	34,0043	41,6907
17,355	0,0702	7,8945	20,9011	34,7387	40,3818
20,913	0,0759	7,7480	20,7082	34,4305	41,4265
25,199	0,0825	7,9889	21,0331	34,5364	41,8012
30,364	0,0904	7,7159	21,2953	34,2265	41,7004
36,590	0,0994	8,1349	21,6201	34,6778	41,3563
44,090	0,1101	8,9230	21,7487	35,3205	41,9996
53,129	0,1226	10,1399	22,2200	35,5555	43,6287
64,020	0,1374	10,9508	23,5036	35,9604	42,1178
77,143	0,1548	11,9225	24,1934	36,4767	42,5722
92,958	0,1756	11,6536	25,4401	37,2218	43,3627
112,015	0,1998	11,8471	26,2548	37,5837	44,3071
134,973	0,2286	11,7757	26,5698	38,4202	44,6725
162,644	0,2626	12,7285	27,0026	39,0789	45,2455
195,989	0,3022	12,1742	27,4432	39,4462	45,6792
236,170	0,3474	12,2539	27,8683	39,7966	46,9282
284,585	0,3970	13,2959	28,6695	39,9934	46,6539
350,000	0,4409	13,4527	28,5917	40,6048	47,1164
PROMEDIO	0,0870	8,0352	22,1234	35,3974	42,0142

ANEXO 6

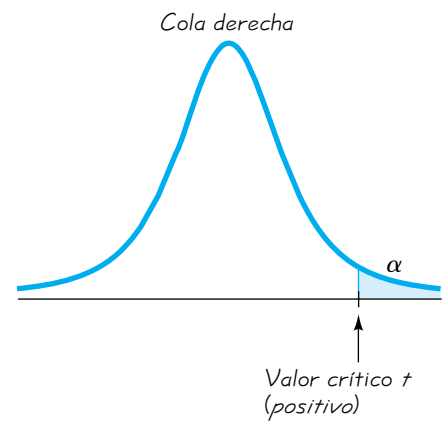
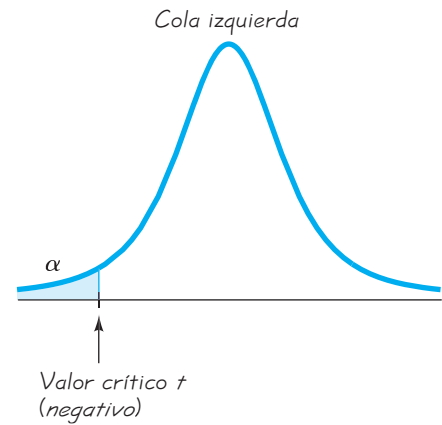
Resultados de resistencia al flujo del fluido MRF-140CG

Velocidad de corte (t/s)	RESISTENCIA TOTAL AL FLUIDO (kPa)																							
	20°C						30°C						40°C						50°C					
	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	800 mT	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	800 mT	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	800 mT	0 mT	200 mT	400 mT	600 mT	800 mT	800 mT
0.035	0.0343	6.9853	20.9559	34.5536	41.1722	38.7513	0.0233	8.3099	22.1322	33.7348	38.7513	37.1688	0.0200	7.4201	20.5115	31.5730	37.1688	37.1688	0.0185	8.1071	21.2602	33.7752	39.9777	39.9777
0.044	0.0343	6.9855	20.9562	34.5538	41.1724	38.7515	0.0233	8.3100	22.1323	33.7349	38.7515	37.1688	0.0200	7.4202	20.5115	31.5730	37.1688	37.1688	0.0185	8.1072	21.2603	33.7752	39.9777	39.9778
0.054	0.0343	6.9858	20.9565	34.5539	41.1726	38.7516	0.0233	8.3102	22.1324	33.7350	38.7516	37.1688	0.0200	7.4203	20.5115	31.5730	37.1688	37.1688	0.0185	8.1074	21.2604	33.7752	39.9778	39.9778
0.065	0.0343	6.9861	20.9568	34.5542	41.1728	38.7517	0.0234	8.3104	22.1325	33.7351	38.7517	37.1689	0.0200	7.4204	20.5116	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1075	21.2605	33.7752	39.9778	39.9778
0.078	0.0343	6.9864	20.9572	34.5545	41.1731	38.7519	0.0234	8.3106	22.1326	33.7352	38.7519	37.1689	0.0200	7.4206	20.5116	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1076	21.2605	33.7752	39.9778	39.9778
0.094	0.0344	6.9868	20.9576	34.5548	41.1735	38.7520	0.0234	8.3109	22.1328	33.7353	38.7520	37.1689	0.0200	7.4208	20.5116	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1078	21.2606	33.7752	39.9779	39.9779
0.113	0.0344	6.9873	20.9582	34.5552	41.1739	38.7523	0.0234	8.3112	22.1330	33.7354	38.7523	37.1689	0.0200	7.4210	20.5117	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1081	21.2607	33.7752	39.9779	39.9779
0.136	0.0344	6.9879	20.9589	34.5557	41.1743	38.7525	0.0234	8.3116	22.1332	33.7356	38.7525	37.1689	0.0200	7.4213	20.5117	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1084	21.2608	33.7752	39.9779	39.9779
0.164	0.0345	6.9886	20.9597	34.5563	41.1749	38.7529	0.0234	8.3120	22.1335	33.7358	38.7529	37.1689	0.0201	7.4217	20.5118	31.5730	37.1689	37.1689	0.0185	8.1087	21.2610	33.7753	39.9780	39.9780
0.198	0.0345	6.9895	20.9606	34.5570	41.1756	38.7533	0.0235	8.3126	22.1339	33.7361	38.7533	37.1689	0.0201	7.4221	20.5119	31.5731	37.1689	37.1689	0.0185	8.1091	21.2612	33.7753	39.9781	39.9781
0.238	0.0346	6.9906	20.9618	34.5578	41.1765	38.7538	0.0235	8.3132	22.1343	33.7364	38.7538	37.1689	0.0201	7.4226	20.5120	31.5731	37.1689	37.1689	0.0186	8.1096	21.2614	33.7753	39.9781	39.9781
0.287	0.0346	6.9918	20.9632	34.5588	41.1775	38.7543	0.0235	8.3140	22.1348	33.7368	38.7543	37.1689	0.0201	7.4232	20.5121	31.5731	37.1689	37.1689	0.0186	8.1102	21.2617	33.7754	39.9782	39.9782
0.346	0.0347	6.9934	20.9649	34.5600	41.1787	38.7550	0.0236	8.3150	22.1354	33.7373	38.7550	37.1690	0.0202	7.4239	20.5123	31.5732	37.1690	37.1690	0.0186	8.1109	21.2621	33.7754	39.9784	39.9784
0.417	0.0348	6.9952	20.9670	34.5615	41.1802	38.7559	0.0236	8.3162	22.1362	33.7379	38.7559	37.1690	0.0202	7.4248	20.5125	31.5732	37.1690	37.1690	0.0186	8.1118	21.2625	33.7755	39.9785	39.9785
0.502	0.0349	6.9974	20.9694	34.5633	41.1820	38.7569	0.0237	8.3176	22.1370	33.7385	38.7569	37.1690	0.0203	7.4259	20.5127	31.5733	37.1690	37.1690	0.0187	8.1128	21.2630	33.7755	39.9787	39.9787
0.605	0.0350	7.0001	20.9724	34.5655	41.1841	38.7581	0.0238	8.3193	22.1381	33.7394	38.7581	37.1691	0.0203	7.4271	20.5130	31.5733	37.1691	37.1691	0.0187	8.1141	21.2636	33.7756	39.9789	39.9789
0.729	0.0352	7.0033	20.9760	34.5680	41.1867	38.7596	0.0239	8.3213	22.1394	33.7403	38.7596	37.1691	0.0204	7.4287	20.5133	31.5734	37.1691	37.1691	0.0188	8.1156	21.2644	33.7757	39.9791	39.9791
0.878	0.0354	7.0072	20.9803	34.5712	41.1898	38.7614	0.0240	8.3238	22.1409	33.7415	38.7614	37.1692	0.0205	7.4305	20.5137	31.5735	37.1692	37.1692	0.0189	8.1174	21.2653	33.7758	39.9795	39.9795
1.058	0.0356	7.0119	20.9855	34.5749	41.1935	38.7635	0.0242	8.3268	22.1426	33.7430	38.7635	37.1693	0.0206	7.4327	20.5142	31.5736	37.1693	37.1693	0.0189	8.1196	21.2663	33.7759	39.9798	39.9798
1.275	0.0359	7.0175	20.9918	34.5795	41.1981	38.7661	0.0243	8.3303	22.1450	33.7447	38.7661	37.1694	0.0208	7.4354	20.5147	31.5737	37.1694	37.1694	0.0190	8.1222	21.2676	33.7761	39.9803	39.9803
1.537	0.0362	7.0243	20.9993	34.5849	41.2035	38.7693	0.0246	8.3346	22.1477	33.7468	38.7693	37.1695	0.0209	7.4386	20.5154	31.5739	37.1695	37.1695	0.0192	8.1254	21.2692	33.7763	39.9808	39.9808
1.852	0.0367	7.0325	21.0084	34.5915	41.2101	38.7730	0.0248	8.3398	22.1510	33.7493	38.7730	37.1696	0.0211	7.4425	20.5163	31.5741	37.1696	37.1696	0.0193	8.1292	21.2710	33.7765	39.9814	39.9814
2.231	0.0372	7.0423	21.0194	34.5994	41.2180	38.7775	0.0251	8.3461	22.1549	33.7523	38.7775	37.1698	0.0214	7.4472	20.5173	31.5743	37.1698	37.1698	0.0195	8.1338	21.2733	33.7768	39.9822	39.9822
2.689	0.0378	7.0542	21.0326	34.6090	41.2275	38.7830	0.0255	8.3536	22.1597	33.7559	38.7830	37.1700	0.0216	7.4529	20.5185	31.5746	37.1700	37.1700	0.0197	8.1394	21.2760	33.7771	39.9832	39.9832
3.240	0.0385	7.0685	21.0485	34.6205	41.2390	38.7896	0.0259	8.3627	22.1654	33.7603	38.7896	37.1702	0.0220	7.4597	20.5199	31.5750	37.1702	37.1702	0.0200	8.1461	21.2793	33.7775	39.9843	39.9843
3.904	0.0393	7.0858	21.0677	34.6343	41.2528	38.7975	0.0265	8.3737	22.1722	33.7656	38.7975	37.1705	0.0224	7.4679	20.5217	31.5754	37.1705	37.1705	0.0203	8.1541	21.2832	33.7780	39.9856	39.9856
4.705	0.0404	7.1066	21.0908	34.6511	41.2695	38.8070	0.0271	8.3869	22.1805	33.7720	38.8070	37.1709	0.0229	7.4778	20.5238	31.5759	37.1709	37.1709	0.0207	8.1639	21.2880	33.7786	39.9873	39.9873
5.669	0.0416	7.1316	21.1187	34.6712	41.2896	38.8185	0.0279	8.4028	22.1905	33.7796	38.8185	37.1713	0.0235	7.4897	20.5263	31.5765	37.1713	37.1713	0.0212	8.1756	21.2937	33.7794	39.9893	39.9893
6.831	0.0432	7.1618	21.1522	34.6955	41.3138	38.8324	0.0289	8.4219	22.2025	33.7889	38.8324	37.1718	0.0243	7.5040	20.5294	31.5772	37.1718	37.1718	0.0217	8.1897	21.3006	33.7802	39.9916	39.9916
8.231	0.0450	7.1982	21.1927	34.7247	41.3430	38.8491	0.0300	8.4450	22.2170	33.8000	38.8491	37.1724	0.0251	7.5213	20.5331	31.5781	37.1724	37.1724	0.0224	8.2067	21.3089	33.7813	39.9945	39.9945
9.919	0.0472	7.2420	21.2414	34.7599	41.3781	38.8692	0.0314	8.4728	22.2345	33.8135	38.8692	37.1731	0.0262	7.5422	20.5376	31.5792	37.1731	37.1731	0.0232	8.2272	21.3190	33.7825	39.9979	39.9979
11.952	0.0498	7.2949	21.3002	34.8024	41.4205	38.8935	0.0331	8.5064	22.2555	33.8296	38.8935	37.1740	0.0275	7.5673	20.5429	31.5805	37.1740	37.1740	0.0242	8.2519	21.3310	33.7840	40.0021	40.0021
14.402	0.0530	7.3585	21.3709	34.8535	41.4715	38.9227	0.0351	8.5467	22.2809	33.8491	38.9227	37.1751	0.0290	7.5975	20.5494	31.5820	37.1751	37.1751	0.0253	8.2817	21.3456	33.7858	40.0071	40.0071
17.355	0.0569	7.4352	21.4562	34.9152	41.5330	38.9579	0.0375	8.5954	22.3114	33.8726	38.9579	37.1763	0.0309	7.6340	20.5572	31.5839	37.1763	37.1763	0.0268	8.3176	21.3631	33.7880		

ANEXO 7

Tabla de valores críticos para la distribución t de Student

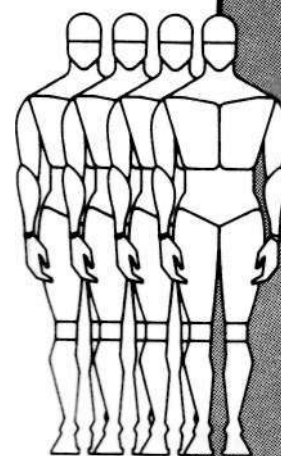
TABLA A-3	Distribución t: Valores críticos t				
	Área en una cola				
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
Grados de libertad	Área en dos colas				
	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20
1	63.657	31.821	12.706	6.314	3.078
2	9.925	6.965	4.303	2.920	1.886
3	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638
4	4.604	3.747	2.776	2.132	1.533
5	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476
6	3.707	3.143	2.447	1.943	1.440
7	3.499	2.998	2.365	1.895	1.415
8	3.355	2.896	2.306	1.860	1.397
9	3.250	2.821	2.262	1.833	1.383
10	3.169	2.764	2.228	1.812	1.372
11	3.106	2.718	2.201	1.796	1.363
12	3.055	2.681	2.179	1.782	1.356
13	3.012	2.650	2.160	1.771	1.350
14	2.977	2.624	2.145	1.761	1.345
15	2.947	2.602	2.131	1.753	1.341
16	2.921	2.583	2.120	1.746	1.337
17	2.898	2.567	2.110	1.740	1.333
18	2.878	2.552	2.101	1.734	1.330
19	2.861	2.539	2.093	1.729	1.328
20	2.845	2.528	2.086	1.725	1.325
21	2.831	2.518	2.080	1.721	1.323
22	2.819	2.508	2.074	1.717	1.321
23	2.807	2.500	2.069	1.714	1.319
24	2.797	2.492	2.064	1.711	1.318
25	2.787	2.485	2.060	1.708	1.316
26	2.779	2.479	2.056	1.706	1.315
27	2.771	2.473	2.052	1.703	1.314
28	2.763	2.467	2.048	1.701	1.313
29	2.756	2.462	2.045	1.699	1.311
30	2.750	2.457	2.042	1.697	1.310
31	2.744	2.453	2.040	1.696	1.309
32	2.738	2.449	2.037	1.694	1.309
34	2.728	2.441	2.032	1.691	1.307
36	2.719	2.434	2.028	1.688	1.306
38	2.712	2.429	2.024	1.686	1.304
40	2.704	2.423	2.021	1.684	1.303
45	2.690	2.412	2.014	1.679	1.301
50	2.678	2.403	2.009	1.676	1.299
55	2.668	2.396	2.004	1.673	1.297
60	2.660	2.390	2.000	1.671	1.296
65	2.654	2.385	1.997	1.669	1.295
70	2.648	2.381	1.994	1.667	1.294
75	2.643	2.377	1.992	1.665	1.293
80	2.639	2.374	1.990	1.664	1.292
90	2.632	2.368	1.987	1.662	1.291
100	2.626	2.364	1.984	1.660	1.290
200	2.601	2.345	1.972	1.653	1.286
300	2.592	2.339	1.968	1.650	1.284
400	2.588	2.336	1.966	1.649	1.284
500	2.586	2.334	1.965	1.648	1.283
750	2.582	2.331	1.963	1.647	1.283
1000	2.581	2.330	1.962	1.646	1.282
2000	2.578	2.328	1.961	1.646	1.282
Grande	2.576	2.326	1.960	1.645	1.282



ANEXO 8

Peso y dimensiones estructurales del cuerpo humano según el percentil

2A



PESO

Peso * de hombres y mujeres adultos, en libras y kilos,
según edad, sexo y selección de percentiles†

		18 a 79 (Total)	18 a 24 Años	25 a 34 Años	35 a 44 Años	45 a 54 Años	55 a 64 Años	65 a 74 Años	75 a 79 Años
		lb kg	lb kg	lb kg	lb kg	lb kg	lb kg	lb kg	lb kg
99	HOMBRES	241 109,3	231 104,8	248 112,5	244 110,7	241 109,3	230 104,3	225 102,0	212 96,2
	MUJERES	236 107,0	218 98,9	239 108,4	238 108,0	240 108,9	244 110,7	214 97,1	205 93,0
95	HOMBRES	212 96,2	214 97,1	223 101,2	219 99,3	219 99,3	213 96,6	207 93,9	198 89,8
	MUJERES	199 90,3	170 77,1	191 86,6	204 92,5	205 93,0	211 95,7	196 88,9	193 87,5
90	HOMBRES	205 93,0	193 87,5	208 94,3	207 93,9	209 94,8	203 92,1	198 89,8	191 86,6
	MUJERES	182 82,6	157 71,2	173 78,5	184 83,5	190 86,2	195 88,5	183 83,0	178 80,7
80	HOMBRES	190 86,2	180 81,6	195 88,5	193 87,5	194 88,0	190 86,2	183 83,0	170 77,1
	MUJERES	164 74,4	145 65,8	152 68,9	165 74,8	171 77,6	176 79,8	169 76,7	162 73,5
70	HOMBRES	181 82,1	171 77,6	185 83,9	184 83,5	185 83,9	180 81,6	172 78,0	161 73,0
	MUJERES	152 68,9	137 62,1	143 64,9	153 69,4	158 71,7	165 74,8	160 72,6	155 70,3
60	HOMBRES	173 78,5	164 74,4	177 80,3	177 80,3	178 80,7	172 78,0	166 75,3	150 68,0
	MUJERES	144 65,3	131 59,4	136 61,7	144 65,3	149 67,6	154 69,9	151 68,5	147 66,7
50	HOMBRES	166 75,3	157 71,2	169 76,7	171 77,6	171 77,6	165 74,8	161 73,0	146 66,2
	MUJERES	137 62,1	126 57,2	130 59,0	137 62,1	143 64,9	146 66,2	145 65,8	137 62,1
40	HOMBRES	159 72,1	151 68,5	162 73,5	164 74,4	163 73,9	158 71,7	153 69,4	141 64,0
	MUJERES	131 59,4	122 55,3	125 56,7	131 59,4	137 62,1	140 63,5	138 62,6	127 57,6
30	HOMBRES	152 68,9	145 65,8	154 69,9	158 71,7	156 70,8	151 68,5	146 66,2	137 62,1
	MUJERES	125 56,7	117 53,1	120 54,4	125 56,7	130 59,0	134 60,8	132 59,9	119 54,0
20	HOMBRES	144 65,3	140 63,5	146 66,2	151 68,5	149 67,6	143 64,9	138 62,6	132 59,9
	MUJERES	118 53,5	111 50,3	114 51,7	119 54,0	122 55,3	129 58,5	125 56,7	113 51,3
10	HOMBRES	134 60,8	131 59,4	136 61,7	141 64,0	139 63,0	131 59,4	126 57,2	120 54,4
	MUJERES	111 50,3	104 47,2	107 48,5	113 51,3	113 51,3	120 54,4	114 51,7	105 47,6
5	HOMBRES	126 57,2	124 56,2	129 58,5	134 60,8	131 59,4	123 55,8	117 53,1	107 48,5
	MUJERES	104 47,2	99 44,9	102 46,3	109 49,4	106 48,1	112 50,8	106 48,1	95 43,1
1	HOMBRES	112 50,8	115 52,2	114 51,7	121 54,9	116 52,6	112 50,8	99 44,9	99 44,9
	MUJERES	93 42,2	91 41,3	92 41,7	100 45,4	95 43,1	95 43,1	92 41,7	74 33,6

* Mediciones practicadas con los examinados con el torso desnudo, calzados con zapatillas de papel y vestidos con una bata ligera, de exploración, hasta las rodillas. Bolsillos de los hombres vacíos.

† Medida bajo la cual desciende el porcentaje de personas indicado en el grupo de edad dado.

ANEXO 9

Valores recomendados del factor de diseño

This chapter will not pursue the quantitative analysis of deformation, leaving that to be your responsibility as the design of a machine evolves. Later chapters do address some critical cases such as the interference fit between two mating parts (Chapter 13), the position of the teeth of one gear relative to its mating gear (Chapter 9), the radial clearance between a journal bearing and the shaft rotating within it (Chapter 16), and the deformation of springs (Chapter 19). Also, Section 5–10, as a part of the general design procedure, suggests some guidelines for limiting deflections.

5–7 DESIGN FACTORS

The term *design factor*, N , is a measure of the relative safety of a load-carrying component. In most cases, the strength of the material from which the component is to be made is divided by the design factor to determine a *design stress*, σ_d , sometimes called the *allowable stress*. Then the actual stress to which the component is subjected should be less than the design stress. For some kinds of loading, it is more convenient to set up a relationship from which the design factor, N , can be computed from the actual applied stresses and the strength of the material. Still in other cases, particularly for the case of the buckling of columns, as discussed in Chapter 6, the design factor is applied to the *load* on the column rather than the strength of the material.

Section 5–9 presents methods for computing the design stress or design factor for several different kinds of loading and materials.

The designer must determine what a reasonable value for the design factor should be in any given situation. Often the value of the design factor or the design stress is governed by codes established by standards-setting organizations such as the American Society of Mechanical Engineers, the American Gear Manufacturers Association, the U.S. Department of Defense, the Aluminum Association, or the American Institute of Steel Construction. For structures, local or state building codes often prescribe design factors or design stresses. Some companies have adopted their own policies specifying design factors based on past experience with similar conditions.

In the absence of codes or standards, the designer must use judgment to specify the desired design factor. Part of the design philosophy, discussed in Section 5–6, discussed issues such as the nature of the application, environment, nature of the loads on the component to be designed, stress analysis, material properties, and the degree of confidence in data used in the design processes. All of these considerations affect the decision about what value for the design factor is appropriate. This book will use the following guidelines.

Ductile Materials

1. **$N = 1.25$ to 2.0 .** Design of structures under static loads for which there is a high level of confidence in all design data.
2. **$N = 2.0$ to 2.5 .** Design of machine elements under dynamic loading with average confidence in all design data. (Typically used in problem solutions in this book.)
3. **$N = 2.5$ to 4.0 .** Design of static structures or machine elements under dynamic loading with uncertainty about loads, material properties, stress analysis, or the environment.
4. **$N = 4.0$ or higher.** Design of static structures or machine elements under dynamic loading with uncertainty about some combination of loads, material properties, stress analysis, or the environment. The desire to provide extra safety to critical components may also justify these values.

ANEXO 10

**Hoja de cálculo electrónica para el dimensionamiento del amortiguador
magnetoreológico**

DIMENSIONAMIENTO DEL AMORTIGUADOR MAGNETOREOLÓGICO																								
Fuerza no controlable en estado apagado (N)	F_{η}^*	470.0																						
Viscosidad del MRF-140CG en estado apagado (Pa.s)	η_P	0.8081																						
Densidad de flujo magnético máxima (mT)	B	1000.0																						
Resistencia total al flujo en función del campo (kPa)	$\tau_T(H)$	54.8964																						
Longitud máxima de amortiguamiento (m)	γ	0.020																						
Tiempo de la fase de apoyo en el ciclo de marcha (s)	t_a	0.456																						
Díámetro interior del cilindro del amortiguador (m)	D_2	0.050																						
Díámetro del pistón del amortiguador (m)	D_1	0.046	0.0462	0.0464	0.0466	0.0468	0.0470	0.0472	0.0474	0.0476	0.0478	0.0480	0.0482	0.0484	0.0486	0.0488	0.0490	0.0492	0.0494	0.0496	0.0498			
Velocidad promedio del pistón (m/s)	v_0	0.0439																						
Radio exterior del ducto anular (m)	R_2	0.0250																						
Radio interior del ducto anular (m)	R_1	0.0230	0.0231	0.0232	0.0233	0.0234	0.0235	0.0236	0.0237	0.0238	0.0239	0.0240	0.0241	0.0242	0.0243	0.0244	0.0245	0.0246	0.0247	0.0248	0.0249			
Espesor del canal de flujo anular - Gap (m)	h	0.0020	0.0019	0.0018	0.0017	0.0016	0.0015	0.0014	0.0013	0.0012	0.0011	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001		
Ancho equivalente del ducto anular (m)	W	0.1508	0.1511	0.1514	0.1517	0.1521	0.1524	0.1527	0.1530	0.1533	0.1536	0.1539	0.1543	0.1546	0.1549	0.1552	0.1555	0.1558	0.1561	0.1565	0.1568			
Área de la sección transversal del pistón (m2)	A_P	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019		
Área efectiva de paso del fluido (m2)	A_e	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000		
Caudal volumétrico del amortiguador (m3/s)	Q	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001		
Longitud axial efectiva del polo magnético (m)	L	0.4425	0.3754	0.3159	0.2633	0.2172	0.1771	0.1425	0.1129	0.0879	0.0670	0.0498	0.0360	0.0250	0.0166	0.0103	0.0059	0.0030	0.0013	0.0004	0.0000	0.0000		
Área promedio de corte del fluido (m)	A	0.0667	0.0567	0.0478	0.0400	0.0330	0.0270	0.0218	0.0173	0.0135	0.0103	0.0077	0.0055	0.0039	0.0026	0.0016	0.0009	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000		
Gradiente adimensional del límite de fluencia	ζ	46.8466	42.0011	37.4497	33.1868	29.2070	25.5048	22.0750	18.9126	16.0126	13.3700	10.9801	8.8382	6.9398	5.2804	3.8555	2.6610	1.6926	0.9463	0.4180	0.1039			
Parámetro función del perfil de velocidad	C	2.1207	2.1262	2.1326	2.1401	2.1488	2.1593	2.1717	2.1868	2.2050	2.2275	2.2555	2.2905	2.3348	2.3913	2.4634	2.5544	2.6663	2.7954	2.9267	3.0301			
Fuerza controlable dependiente del campo (N)	$F_{\tau}(H)$	42808.24	38661.19	34736.68	31033.32	27549.66	24284.16	21235.17	18400.89	15779.30	13368.14	11164.74	9165.94	7367.95	5766.21	4355.42	3130.19	2086.93	1228.31	570.42	147.35			
Fuerza no controlable en estado-apagado (N)	F_{η}	18.06	21.28	25.30	30.35	36.78	45.11	56.06	70.75	90.90	119.23	160.34	222.22	319.66	482.06	773.33	1349.96	2663.49	6377.53	21742.03	175691.72			
Fuerza total desarrollada por el amortiguador (N)	F_{τ}	42826.30	38682.47	34761.97	31063.67	27586.44	24329.27	21291.23	18471.64	15870.20	13487.37	11325.08	9388.16	7687.62	6248.27	5128.75	4480.15	4750.41	7605.84	22312.45	175839.07			
Rango dinámico	λ_d	2371.9195	1817.5173	1374.1792	1023.6524	749.9873	539.3366	379.7643	261.0659	174.5981	113.1177	70.6304	42.2470	24.0492	12.9615	6.6320	3.3187	1.7835	1.1926	1.0262	1.0008			
Relación de apertura del ducto	h/R_2	0.0800	0.0760	0.0720	0.0680	0.0640	0.0600	0.0560	0.0520	0.0480	0.0440	0.0400	0.0360	0.0320	0.0280	0.0240	0.0200	0.0160	0.0120	0.0080	0.0040			
Presión debido a la resistencia a la fluencia (Pa)	$\Delta P_{\tau}(H)$	2.58E+07	2.31E+07	2.05E+07	1.82E+07	1.60E+07	1.40E+07	1.21E+07	1.04E+07	8.87E+06	7.45E+06	6.17E+06	5.02E+06	4.00E+06	3.11E+06	2.33E+06	1.66E+06	1.10E+06	6.41E+05	2.95E+05	7.56E+04			
Presión debido a la viscosidad del fluido (Pa)	ΔP_{η}	9.96E+03	1.17E+04	1.38E+04	1.65E+04	2.00E+04	2.44E+04	3.02E+04	3.80E+04	4.86E+04	6.35E+04	8.50E+04	1.17E+05	1.68E+05	2.52E+05	4.03E+05	7.01E+05	1.38E+06	3.29E+06	1.12E+07	8.98E+07			
Presión total en el amortiguador (Pa)	ΔP_{τ}	2.58E+07	2.31E+07	2.06E+07	1.82E+07	1.60E+07	1.40E+07	1.22E+07	1.05E+07	8.92E+06	7.51E+06	6.25E+06	5.14E+06	4.17E+06	3.36E+06	2.73E+06	2.36E+06	2.48E+06	3.93E+06	1.15E+07	8.99E+07			
Volumen mínimo de fluido activo requerido (m3)	V	3.185E-03	2.192E-03	1.480E-03	9.780E-04	6.307E-04	3.957E-04	2.407E-04	1.412E-04	7.951E-05	4.263E-05	2.157E-05	1.017E-05	4.397E-06	1.702E-06	5.705E-07	1.570E-07	3.246E-08	4.273E-09	2.466E-10	1.900E-12			
Volumen mínimo de fluido activo disponible (m3)	V_d	1.335E-04	1.078E-04	8.609E-05	6.792E-05	5.285E-05	4.048E-05	3.046E-05	2.246E-05	1.617E-05	1.132E-05	7.671E-06	4.992E-06	3.091E-06	1.843E-06	9.621E-07	4.602E-07	1.870E-07	5.868E-08	1.150E-08	7.129E-10			

ANEXO 11

Permeabilidad magnética relativa de varios materiales

Table B-3 RELATIVE PERMEABILITY μ_r OF SOME COMMON MATERIALS^a

$\mu = \mu_r \mu_0$ and $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Material	Relative Permeability, μ_r
Diamagnetic	
Bismuth	$0.99983 \simeq 1$
Gold	$0.99996 \simeq 1$
Mercury	$0.99997 \simeq 1$
Silver	$0.99998 \simeq 1$
Copper	$0.99999 \simeq 1$
Water	$0.99999 \simeq 1$
Paramagnetic	
Air	$1.000004 \simeq 1$
Aluminum	$1.00002 \simeq 1$
Tungsten	$1.00008 \simeq 1$
Titanium	$1.0002 \simeq 1$
Platinum	$1.0003 \simeq 1$
Ferromagnetic (nonlinear)	
Cobalt	250
Nickel	600
Mild steel	2,000
Iron (pure)	4,000–5,000
Silicon iron	7,000
Mumetal	$\sim 100,000$
Purified iron	$\sim 200,000$
^a These are typical values; actual values depend on material variety.	

Note: Except for ferromagnetic materials, $\mu_r \simeq 1$ for all dielectrics and conductors.

ANEXO 12

Tabla de tamaño de conductores AWG

American Wire Gauge Conductor Size Table

American wire gauge (AWG) is a standardized wire gauge system for the diameters of round, solid, nonferrous, electrically conducting wire. The larger the AWG number or wire gauge, the smaller the physical size of the wire. The smallest AWG size is 40 and the largest is 0000 (4/0). AWG general rules of thumb - for every 6 gauge decrease, the wire diameter doubles and for every 3 gauge decrease, the cross sectional area doubles. **Note** - W&M Wire Gauge, US Steel Wire Gauge and Music Wire Gauge are different systems.

American Wire Gauge (AWG) Sizes and Properties Chart / Table

Table 1 lists the AWG sizes for electrical cables / conductors. In addition to wire size, the table provides values load (current) carrying capacity, resistance and skin effects. The resistances and skin depth noted are for copper conductors. A detailed description of each conductor property is described below Table 1.

Table 1: American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

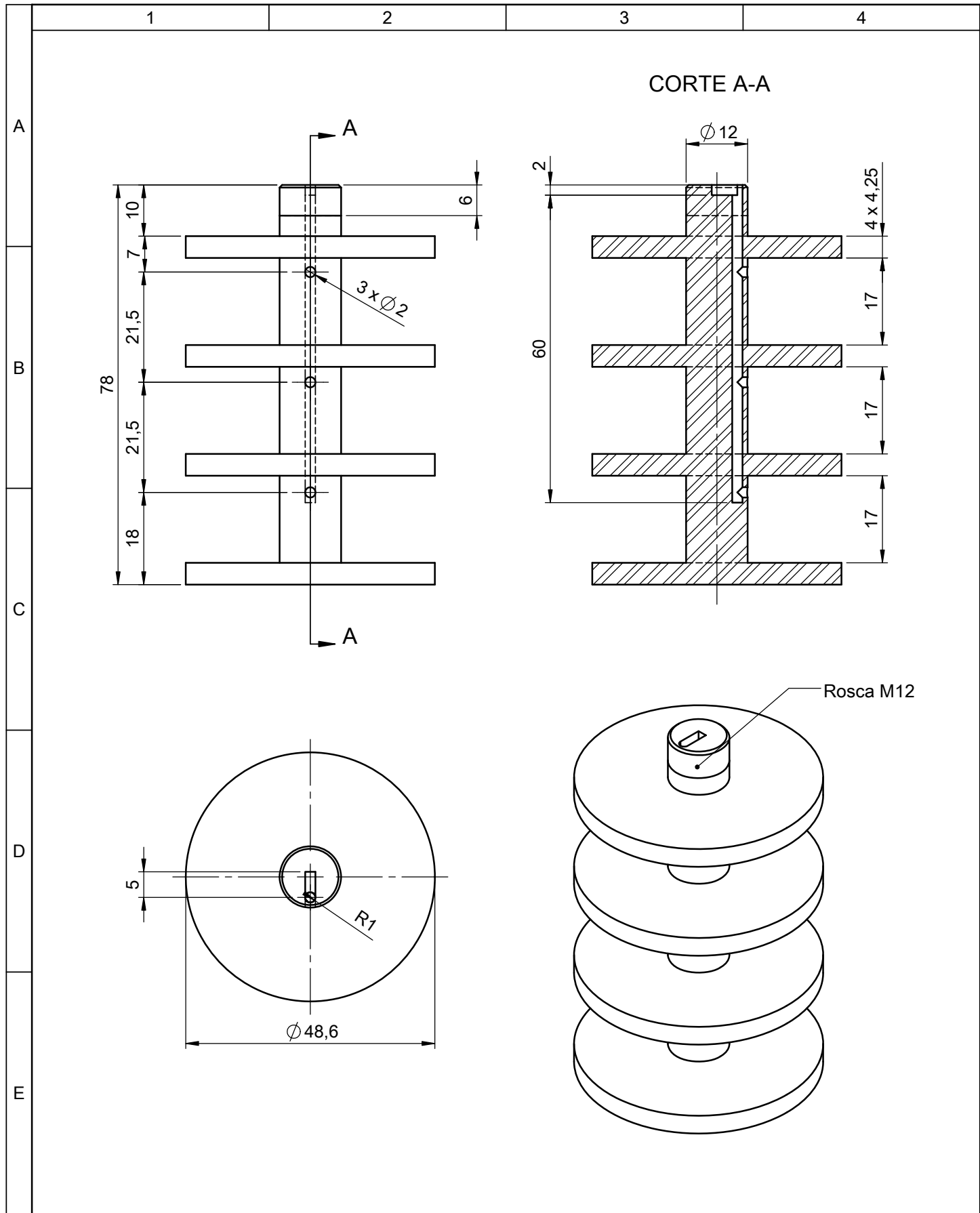
AWG Notes: American Wire Gauge (AWG) is a standardized wire gauge system used predominantly in the United States to note the diameter of electrically conducting wire. The general rule of thumb is for every 6 gauge decrease the wire diameter doubles and every 3 gauge decrease doubles the cross sectional area.

Diameter Notes: A mil is a unit of length equal to 0.001 inch (a "milli-inch" or a "thousandth of one inch") ie. 1 mil = 0.001".

Resistance Notes: The resistance noted in the table above is for copper wire conductor. For a given current, you can use the noted resistance and apply [Ohms Law](#) to calculate the voltage drop across the conductor.

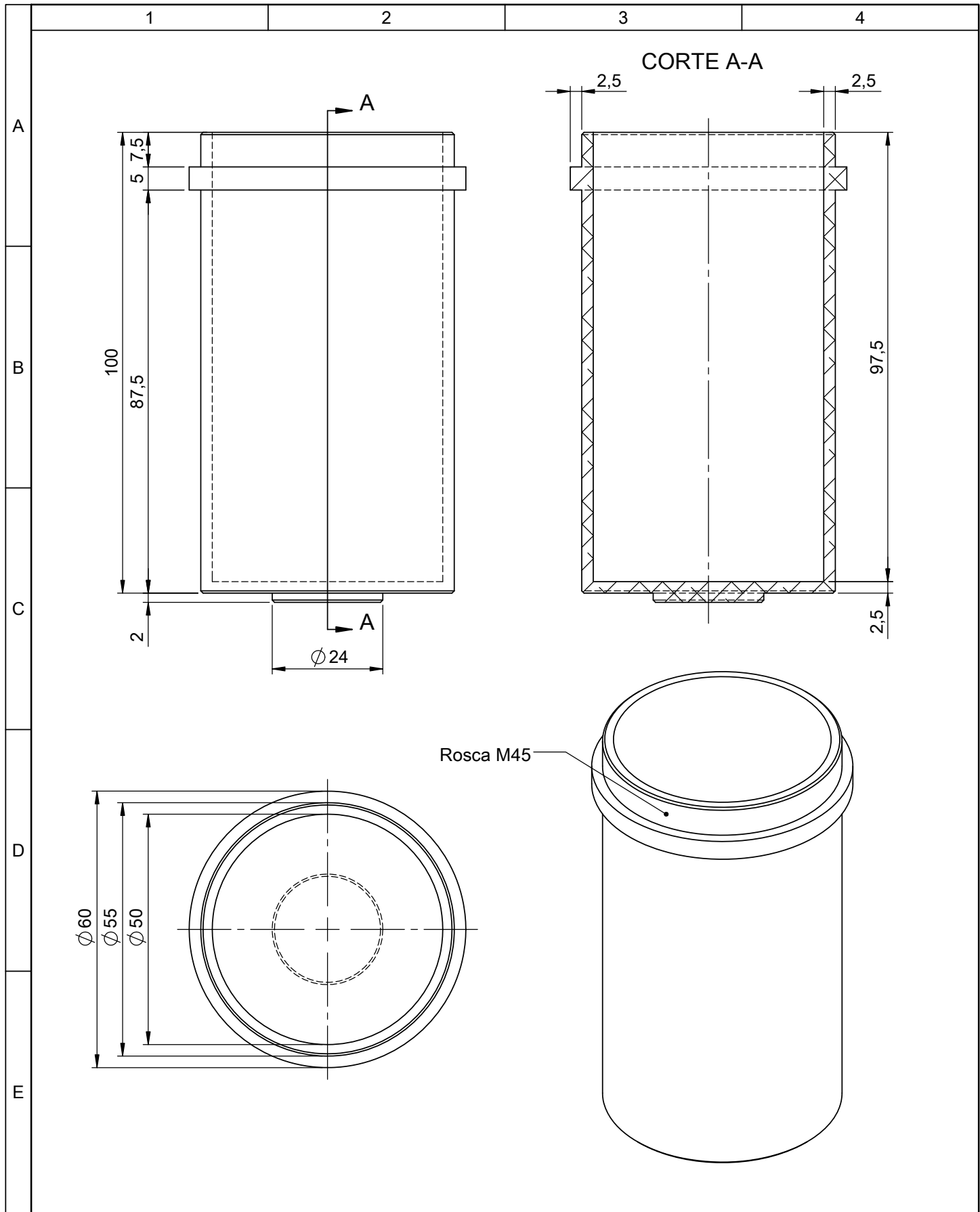
ANEXO 13

Planos de construcción del amortiguador magnetoreológico

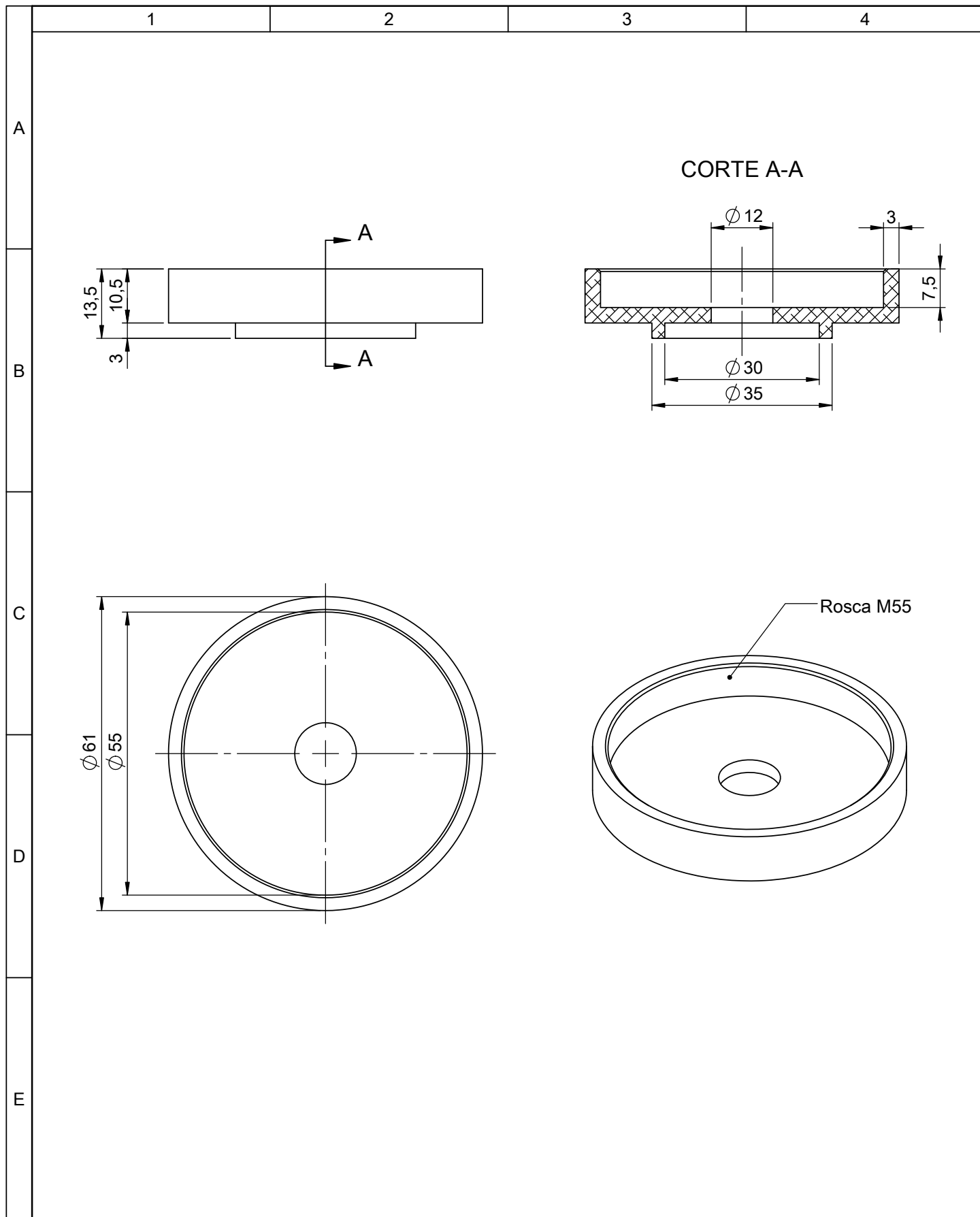


					Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
					±0,1	3 N	Acero AISI 1020		
						Fecha	Nombre	Denominación: PISTON MRF	Escala: 1:1
				Dibujó:	22/09/17	Ing. Arteaga O.			
				Revisó:	22/09/17	Ing. Espín S.			
				Aprobó:	22/09/17	Ing. Espín S.			
					UTA		Número del dibujo: 01 de 05		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Ingeniería Mecánica		(Sustitución)			

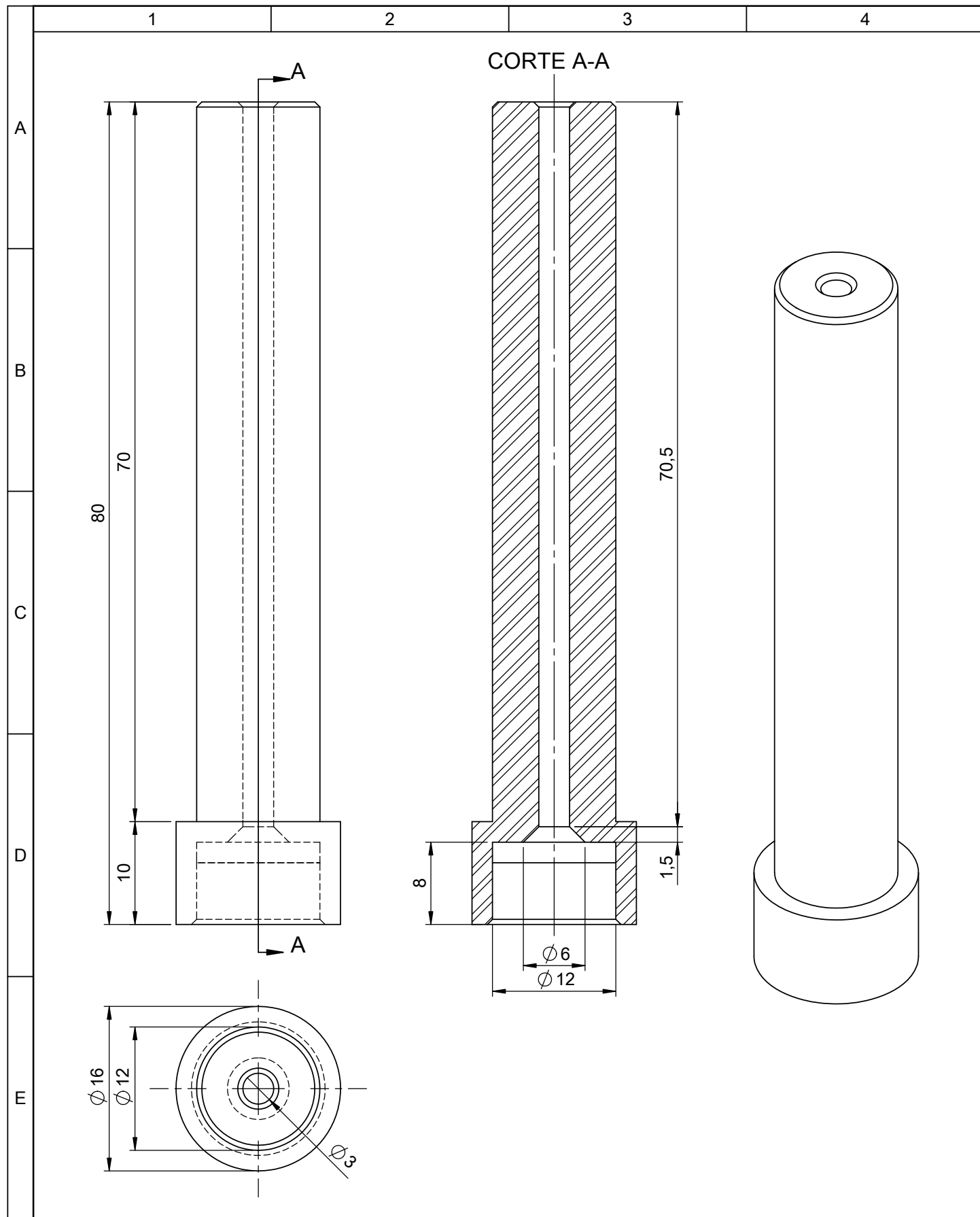
PISTON MRF



																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	0,3 N			
						Aleación de Aluminio 7075-T6		
						Denominación: TAPA DEL CILINDRO		
						Número del dibujo: 03 de 05		
						(Sustitución)		
						Escala: 1:1		



--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ANEXO 14

Propiedades del Acero AISI 1020 CD

AISI 1020 Steel, cold rolled

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [AISI 1000 Series Steel](#); [Low Carbon Steel](#)

Material Notes: 1020 steel responds well to cold work and heat treating. Weldability is fair.

Applications: Shafts, lightly stressed gears, hard wearing surfaces, pins, chains and case hardened parts where core strength is not critical.

1020 is suitable for case hardened parts where core strength is not critical.

Key Words: UNS G10200, AMS 5032, AMS 5045, ASTM A29, ASTM A108, ASTM A510, ASTM A519, ASTM A29, A108, A510, A512, A513, A519, A544, A575 M10120, A576, A635, A659, A827, A830, BS 970 040A20, 050A20 (En2C), 050A20 (En2D), 060A20, BS 970 Part 1 070M20, DEF STAN95-1-1 C1020, SAE J412, SAE J414, DIN 1.0402, AFNOR CC 20, UNI C 20, SS14 1450 (Sweden), SAE J403

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in³	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	121	121	
Hardness, Knoop	140	140	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	68	68	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	126	126	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	420 MPa	60900 psi	
Tensile Strength, Yield	350 MPa	50800 psi	
Elongation at Break	15 %	15 %	In 50 mm
Reduction of Area	40 %	40 %	
Modulus of Elasticity	186 GPa	27000 ksi	
Bulk Modulus	148 GPa	21500 ksi	calculated from elastic modulus and Poisson's ratio
Poissons Ratio	0.29	0.29	
Machinability	65 %	65 %	Based on AISI 1212 steel. as 100% machinability
Shear Modulus	72.0 GPa	10400 ksi	calculated from elastic modulus and Poisson's ratio

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity 	0.0000159 ohm-cm @Temperature 0.000 °C	0.0000159 ohm-cm @Temperature 32.0 °F	condition unknown
	0.0000219 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.0000219 ohm-cm @Temperature 212 °F	condition unknown
	0.0000292 ohm-cm @Temperature 200 °C	0.0000292 ohm-cm @Temperature 392 °F	condition unknown

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.7 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	6.50 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
	12.8 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 300 °C	7.11 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 572 °F	
	13.9 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 500 °C	7.72 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity 	0.486 J/g-°C @Temperature >=100 °C	0.116 BTU/lb-°F @Temperature >=212 °F	condition unknown
	0.519 J/g-°C @Temperature 150 - 200 °C	0.124 BTU/lb-°F @Temperature 302 - 392 °F	
	0.599 J/g-°C @Temperature 350 - 400 °C	0.143 BTU/lb-°F @Temperature 662 - 752 °F	
Thermal Conductivity	51.9 W/m-K	360 BTU-in/hr-ft²-°F	Typical steel

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.17 - 0.23 %	0.17 - 0.23 %	
Iron, Fe	99.08 - 99.53 %	99.08 - 99.53 %	As remainder
Manganese, Mn	0.30 - 0.60 %	0.30 - 0.60 %	
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

ANEXO 15

Propiedades de la aleación de aluminio 7075-T6

Identification

Designation

7075

Condition

T6 (Solution heat-treated and artificially aged)

UNS number

A97075

EN name

EN AW-7075 (EN AW-Al Zn6CuMgZr)

General Properties

Density

2823

kg/m³

Price

* 2.667

USD/kg

Composition overview

Composition (summary)

Al/5.9-6.9Zn/2-2.7Mg/1.9-2.5Cu/0.15Fe/0.12Si/0.08-0.15Zr/0.1Mn

Base

Al (Aluminum)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	88.61	%
Cr (chromium)	0.02	%
Cu (copper)	2.179	%
Fe (iron)	0.075	%
Mg (magnesium)	2.324	%
Mn (manganese)	0.05	%
Si (silicon)	0.06	%
Ti (titanium)	0.03	%
Zn (zinc)	6.38	%
Zr (zirconium)	0.1095	%
Other	0.075	%

Mechanical properties

Young's modulus	71.77	GPa
Flexural modulus	* 71.78	GPa
Shear modulus	27.68	GPa
Bulk modulus	70.75	GPa
Poisson's ratio	0.3367	
Shape factor	13	
Yield strength (elastic limit)	550.9	MPa
Tensile strength	608.7	MPa
Compressive strength	* 543.8	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	550.9	MPa
Elongation	9.702	% strain
Hardness - Vickers	* 126.5	HV
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 152	MPa
Fatigue strength model (stress range)	* 121.5	MPa
Parameters: Stress Ratio = 0, Number of Cycles = 1e7		
Fracture toughness	* 33.54	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 4.472e-4	

Thermal properties

Melting point	* 824.7	K
Maximum service temperature	412.1	K
Minimum service temperature	0.15	K