DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 26–32

# Análisis magnetostático como herramienta para el dimensionamiento del émbolo de un amortiguador con fluido magnetorreológico
# Magnetostatic analysis as a tool for sizing the piston of a magnetorheological fluid damper

R. Sánchez-Rodríguez [a,*], O. A. García-Pérez [a]

[a] *Universidad Aeronáutica en Querétaro, 76278, Colón, Querétaro, México.*

**Resumen**

Uno de los retos principales en el diseño de suspensiones magnetorreológicas radica en el análisis de la interacción entre el campo magnético y el fluido, de la cual depende directamente la fuerza de amortiguamiento. En el presente trabajo se analiza la interacción entre la densidad del flujo magnético, el fluido magnetorreológico y la estructura mecánica del émbolo, estableciendo cómo las dimensiones geométricas de este último afectan directamente la distribución del flujo magnético y la capacidad de restricción del fluido para alcanzar la fuerza de amortiguamiento objetivo. Se llevó a cabo un análisis numérico magnetostático que permitió validar el dimensionamiento del émbolo, así como determinar la intensidad del campo magnético y las características físicas de la bobina. Los resultados demostraron la obtención de una fuerza superior a la nominal requerida.

*Palabras Clave:* Fluido magnetorreológico, Fuerza de amortiguamiento, Análisis magnetostático, Densidad de flujo magnético, Dimensionamiento de émbolo.

**Abstract**

One of the primary challenges in the design of magnetorheological fluid suspensions involves analyzing the interaction between the magnetic field and the fluid, as the suspension's damping force directly depends on this relationship. This paper presents an analysis of the interaction between magnetic flux density, the magnetorheological fluid, and the mechanical structure of the suspension piston, establishing how the specific geometric dimensions of the piston directly affect the magnetic flux distribution and the fluid's restriction capacity to achieve the target damping force. A magnetostatic numerical analysis was conducted to validate the piston's geometric sizing and to determine the magnetic field intensity and the physical characteristics of the coil. The results demonstrate that a force exceeding the target value was successfully obtained.

*Keywords:* Magnetorheological fluid, Damping force, Magnetostatic analysis, Magnetic flux density, Piston sizing.

## 1. Introducción

La atenuación de vibraciones mecánicas en estructuras ha motivado el desarrollo de sistemas de control pasivo, semiactivo y activo. El desempeño de estos sistemas depende en gran medida de las capacidades de los actuadores para modificar la dinámica estructural. Entre los dispositivos más utilizados se encuentran los amortiguadores, encargados de disipar la energía vibratoria. Sin embargo, los amortiguadores con fluidos convencionales presentan limitaciones, ya que su desempeño óptimo se restringe a las condiciones nominales para las cuales fueron diseñados (Chauhan *et al.*, 2024a). Dado que las condiciones operativas de las estructuras mecánicas suelen variar, los sistemas convencionales pierden efectividad, incrementando la amplitud de las vibraciones.

En este contexto, la implementación de materiales inteligentes, como los fluidos magnetorreológicos (MR), representa una alternativa viable debido a su capacidad para modificar sus propiedades reológicas de manera instantánea y reversible mediante la aplicación de un campo magnético externo (Carlson y Spencer, 1996). Estos fluidos, compuestos por partículas ferromagnéticas suspendidas en un portador viscoso, experimentan una transición controlada de estado líquido a semisólido, lo que incrementa su esfuerzo de cedencia. Este comportamiento se

*Autor para la correspondencia: rsr.aero.en@gmail.com
**Correo electrónico**: rsr.aero.en@gmail.com (Rafael Sánchez-Rodríguez), oscar.garcia@unaq.mx (Oscar Alejandro García-Pérez).

**Historial del manuscrito:** recibido el 17/04/2026, última versión-revisada recibida el 24/08/2026, aceptado el 08/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.17329

describe comúnmente mediante el modelo de Bingham (Jr *et al.*, 1997).

A pesar de las ventajas operativas de las suspensiones MR frente a las convencionales, su implementación enfrenta retos considerables. En la literatura reciente se reportan diversos enfoques de optimización geométrica del núcleo y del espacio anular para maximizar la densidad de flujo magnético y mitigar la saturación prematura (Hu *et al.*, 2022); no obstante, gran parte de las investigaciones se enfocan en la caracterización aislada del fluido o en el diseño del circuito magnético, sin realizar una integración exhaustiva con la estructura mecánica del émbolo bajo requerimientos de carga específicos.

La complejidad de la interacción entre la densidad del campo magnético y el fluido dentro de una geometría mecánica restringida constituye un desafío fundamental para el desarrollo de suspensiones efectivas. Aunque estudios previos proponen configuraciones generales (Parlak *et al.*, 2012), se requiere un análisis detallado que garantice un desempeño preciso de fuerza bajo condiciones de diseño estandarizadas.

En la presente investigación se aborda el desafío de dimensionar integralmente la geometría del émbolo para obtener una fuerza objetivo específica sin alcanzar la saturación magnética prematura. A diferencia de otros estudios, este trabajo se enfoca en el dimensionamiento geométrico a partir de un requerimiento de carga definido. Mediante análisis numérico magnetostático, se determinan las dimensiones críticas para garantizar que la inducción electromagnética y la interacción física en el espacio anular resulten en el desempeño deseado, proporcionando un esquema predictivo estandarizado para el desarrollo de suspensiones inteligentes en aplicaciones aeroespaciales y terrestres (Spaggiari, 2022).

## 2. Marco Teórico

### 2.1. *Amortiguador con fluido MR*

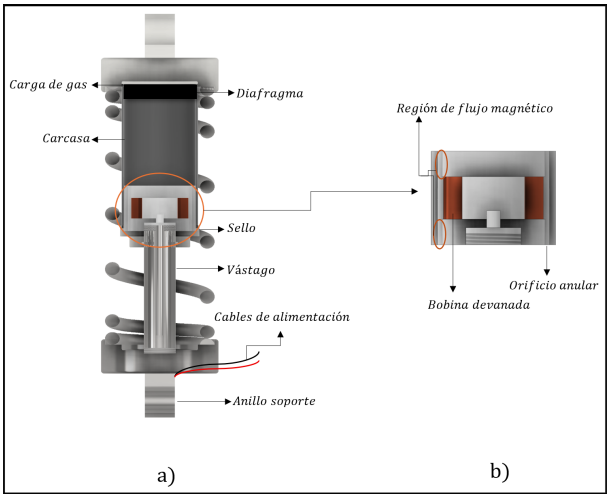



Figura 1: a) Configuración esquemática de una suspensión con fluido MR lineal. b) Conjunto del émbolo MR

Los fluidos magnetorreológicos pertenecen a la categoría de materiales inteligentes, caracterizados por su capacidad de alterar sus propiedades reológicas de forma reversible y rápida bajo la influencia de un campo magnético externo (Osial *et al.*, 2023). En un amortiguador MR, esta propiedad se aprovecha para modular la fuerza de amortiguamiento en tiempo real, permitiendo la adaptación a condiciones operativas variables.

El principio de funcionamiento predominante en estos dispositivos es el modo de flujo o "modo válvula". La configuración típica de un amortiguador MR consta de un cilindro hidráulico dividido en dos cámaras por un pistón, como se puede observar en la Figura 1 a). Este pistón integra un canal anular (gap) (ver Figura 1 b)) a través del cual fluye el fluido MR durante el desplazamiento, cuya configuración geométrica específica se detalla estructuralmente más adelante en la Figura 5. Una bobina electromagnética, alojada en el interior del pistón, genera un campo magnético cuyas líneas de flujo intersecan perpendicularmente la trayectoria del fluido en este espacio anular (Liu *et al.*, 2022).

En ausencia de excitación magnética (estado *off*), las partículas ferromagnéticas se distribuyen aleatoriamente y el fluido exhibe un comportamiento newtoniano con baja viscosidad, determinada fundamentalmente por el aceite portador. En esta condición, la fuerza de amortiguamiento es mínima y depende de la viscosidad plástica y de la geometría del ducto (Chauhan *et al.*, 2024a).

Al energizar la bobina (estado *on*), el campo magnético inducido polariza las partículas, alineándolas paralelamente a las líneas de campo para formar estructuras en cadena que restringen el flujo como se puede observar en la Figura 2.

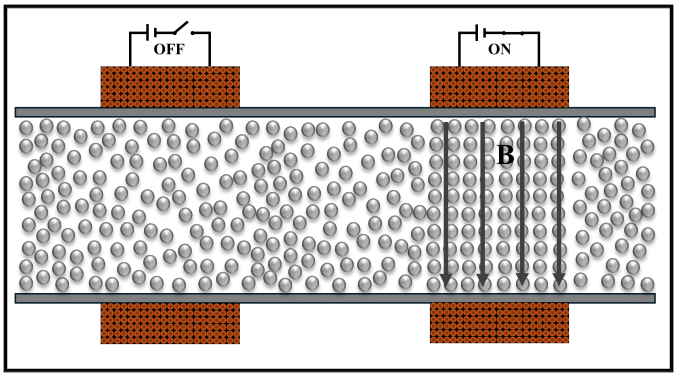



Figura 2: Comportamiento de un fluido MR en estados OFF y ON.

Esta modificación microestructural incrementa el esfuerzo de cedencia aparente del fluido ($\tau_y$). Para mantener el flujo a través del espacio anular, la presión inducida por el movimiento del pistón debe superar la resistencia impuesta por estas cadenas magnéticas. Este comportamiento se modela típicamente como un fluido visco-plástico, donde la fuerza total de amortiguamiento resulta de la suma de una componente viscosa (dependiente de la velocidad) y una componente magnética controlable (Jr *et al.*, 1997).

La modulación de la intensidad del campo magnético, mediante la variación de la corriente eléctrica, permite ajustar el esfuerzo de cedencia de manera continua. Así, el amortiguador con fluido MR adquiere propiedades semiactivas, combinando la fiabilidad de los sistemas pasivos con la versatilidad de los sistemas activos sin incurrir en altas demandas de consumo energético (Wang *et al.*, 2024).

### 2.2. Fluidos magnetorreológicos

#### 2.2.1. Composición y naturaleza del fluido

Los fluidos MR son suspensiones coloidales compuestas principalmente por partículas ferromagnéticas, un líquido portador y aditivos estabilizadores. Las partículas suspendidas, típicamente de hierro de carbonilo de alta pureza, presentan diámetros que oscilan entre 1 y 10 $\mu$m. El portador consiste en un líquido no magnético de baja viscosidad que facilita el transporte de las partículas y la disipación térmica. Adicionalmente, se incorporan aditivos para mitigar la sedimentación y reducir la fricción interfacial, asegurando la estabilidad química y mecánica a largo plazo (Chauhan *et al.*, 2024a).

#### 2.2.2. Mecanismo de activación y transición de fase

Tal como se describió en la sección anterior, la estructuración del fluido depende de la red de cadenas ferromagnéticas (Osial *et al.*, 2023). La principal ventaja ingenieril de esta transición reológica de líquido a semisólido radica en su velocidad de respuesta: el incremento en el esfuerzo de cedencia ocurre en intervalos de tiempo sumamente cortos, comúnmente inferiores a los 10 ms. Esta característica es la que habilita un control de amortiguamiento dinámico de alta frecuencia, ideal para suprimir vibraciones mecánicas súbitas en diversas estructuras.

#### 2.2.3. Modelado reológico: modelo de Bingham

La caracterización del comportamiento del fluido MR se ha abordado mediante diversos modelos matemáticos. El modelo de Herschel-Bulkley se emplea para describir fenómenos de adelgazamiento o espesamiento por corte, mientras que el modelo de Casson es utilizado en fluidos visco-plásticos con transiciones suaves, a bajas tasas de deformación (Wereley y Pang, 1998).

Sin embargo, para el diseño y análisis de amortiguadores con fluido MR, el modelo plástico de Bingham es ampliamente aceptado. Este modelo captura el comportamiento macroscópico dominante de manera concisa: rigidez en el régimen de precedencia y viscosidad lineal en el régimen de postcedencia, tal como se ilustra en la Figura 3. Por consiguiente, en la presente investigación se empleó el modelo de Bingham para representar la dinámica del fluido MR. La relación constitutiva se definió en la siguiente ecuación:

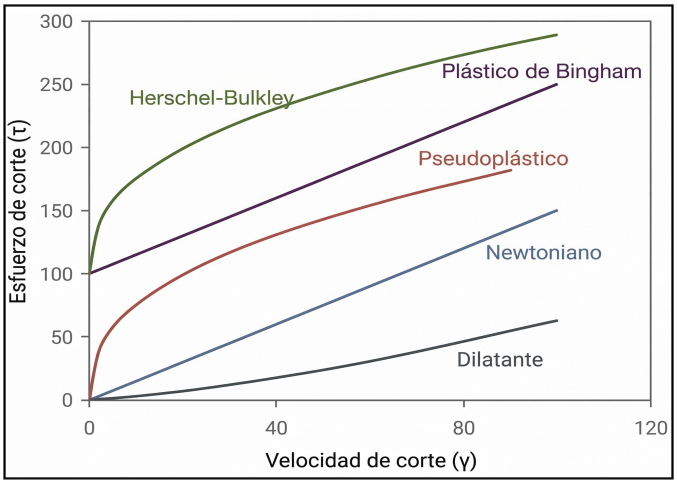



Figura 3: Comportamiento característico de fluidos según diversos modelos matemáticos.

$$\tau = \tau_y(B) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma} \tag{1}$$

Donde $\tau$ es el esfuerzo cortante total, $\tau_y(B)$ es el esfuerzo de cedencia dependiente de la magnitud de la densidad de flujo magnético $B$, $\eta$ es la viscosidad plástica postcedencia, y $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación cortante.

El esfuerzo de cedencia $\tau_y$ determina la magnitud de la fuerza de amortiguamiento controlable. Este parámetro se incrementa de forma no lineal con respecto a la densidad de flujo magnético en el espacio anular. No obstante, el incremento está limitado por la saturación magnética de las partículas, la cual se alcanza comúnmente entre 0.8 y 1 T para el hierro de carbonilo; inducciones magnéticas superiores no producen incrementos significativos en la resistencia (Osial *et al.*, 2023). Por lo tanto, el diseño del circuito electromagnético es fundamental para garantizar que el fluido opere dentro de su región lineal de activación, optimizando así la eficiencia energética del actuador (Hu *et al.*, 2022).

### 2.3. Fundamentos matemáticos del análisis magnetostático

El análisis magnetostático se basa en las leyes de Maxwell aplicadas a campos magnéticos invariantes con respecto del tiempo, las cuales son los pilares teóricos para el modelado electromagnético de actuadores MR. Este análisis establece la relación matemática fundamental entre la excitación eléctrica y la respuesta magnética del sistema.

#### 2.3.1. Ley de Ampère y fuerza magnetomotriz

El principio de operación de la bobina se fundamenta en la ley de Ampère, la cual establece que la integral de línea de la intensidad de campo magnético ($\vec{H}$) en una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente eléctrica encerrada. Para una bobina de $N$ espiras excitada por una corriente $I$, la fuerza magnetomotriz (FMM), denotada como $\mathcal{F}$, se define como:

$$\mathcal{F} = NI = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \tag{2}$$

Donde $\mathcal{F}$ representa el esfuerzo magnético total, $N$ es el número de espiras, $I$ es la corriente eléctrica, $\vec{H}$ es el vector de intensidad de campo magnético, y $d\vec{l}$ es el vector diferencial de longitud.

### 2.3.2. *Densidad de flujo magnético y permeabilidad*

La densidad de flujo magnético $\vec{B}$ se relaciona proporcionalmente con la intensidad de campo $\vec{H}$ a través de la permeabilidad magnética ($\mu$). Esta corresponde al producto de la permeabilidad del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa del material ($\mu_r$), como se expresa:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} \tag{3}$$

Para una configuración de solenoide ideal, la magnitud de la densidad de flujo en el núcleo interno se aproxima mediante la ecuación:

$$B = \mu_0\mu_r\frac{NI}{L_s} \tag{4}$$

Esta relación establece que la densidad de flujo y, por consiguiente, la activación del fluido MR, puede ser controlada directamente mediante la regulación de la corriente $I$ suministrada a la bobina (Liu *et al.*, 2022).

### 2.3.3. *Circuitos magnéticos y reluctancia*

El análisis magnético del émbolo se aborda mediante la analogía de circuitos magnéticos, donde la FMM induce un flujo magnético $\phi$ a través de una reluctancia $\mathcal{R}$, como se determina en la siguiente expresión:

$$\mathcal{F} = \phi\mathcal{R} \tag{5}$$

La reluctancia representa la oposición al flujo y depende de la geometría y la permeabilidad del material, definido como:

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu A_c} \tag{6}$$

donde $l_m$ es la longitud media de la trayectoria magnética y $A_c$ es el área de la sección transversal. En un amortiguador con fluido MR, la reluctancia total del circuito corresponde a la suma de las reluctancias individuales del núcleo, la carcasa y el espacio anular (gap). Debido a que la permeabilidad del fluido MR es mucho menor a la del acero, la reluctancia del gap domina el comportamiento global del circuito eléctrico de la bobina.

### 2.3.4. *Consideraciones eléctricas y térmicas*

El dimensionamiento requiere la integración de parámetros eléctricos para asegurar la eficiencia y la estabilidad térmica. La resistencia eléctrica $R$ del devanado se determina en función de la resistividad del material ($\rho$), la longitud total del conductor ($l_{\text{total}}$) y su sección transversal ($A_c$), expresada en la relación:

$$R = \rho\frac{l_{\text{total}}}{A_c} \tag{7}$$

La disipación de potencia por efecto Joule ($P = I^2R$) constituye un factor crítico. El calor generado debe disiparse adecuadamente para prevenir la degradación del aislamiento eléctrico y la alteración de las propiedades del fluido MR. La consideración simultánea de estos parámetros electromagnéticos garantiza que el diseño propuesto sea funcional y operativamente estable (Chauhan *et al.*, 2024b).

## 3. Metodología

La metodología empleada para el diseño y análisis se estructuró en dos etapas: una fase inicial de validación analítica basada en un caso de estudio de referencia, y una fase de diseño iterativo fundamentada en la caracterización reológica del fluido seleccionado.

### 3.1. *Procedimiento analítico*

Como fase inicial, se validó el modelo analítico mediante la reproducción de los resultados reportados por Parlak *et al.* (2012). Se emplearon las ecuaciones fundamentales del circuito magnético y el modelo de Bingham para estimar la densidad de flujo magnético en el gap y la fuerza de amortiguamiento bajo las condiciones de dicho estudio de referencia. La concordancia obtenida entre los valores calculados analíticamente y los resultados de la literatura confirmaron la fiabilidad de las Ecuaciones (1) a (11), las cuales se abordarán más adelante. Posteriormente, se procedió con el diseño del actuador para alcanzar una fuerza de amortiguamiento total objetivo ($F_{\text{total}}$) de 2400 N a una velocidad del pistón de 0.05 m/s.

Para el dimensionamiento electromagnético preciso, se estableció una correlación matemática directa entre la intensidad del campo magnético y la respuesta reológica del fluido empleado (MRF-132DG). Para vincular la densidad de flujo magnético ($B$) con el esfuerzo de cedencia ($\tau_y$), se emplearon las curvas experimentales de magnetización ($B$ vs $H$) y de respuesta reológica ($\tau_y$ vs $H$) suministradas por el fabricante (LORD Corporation, 2010) (ver Figura 4).

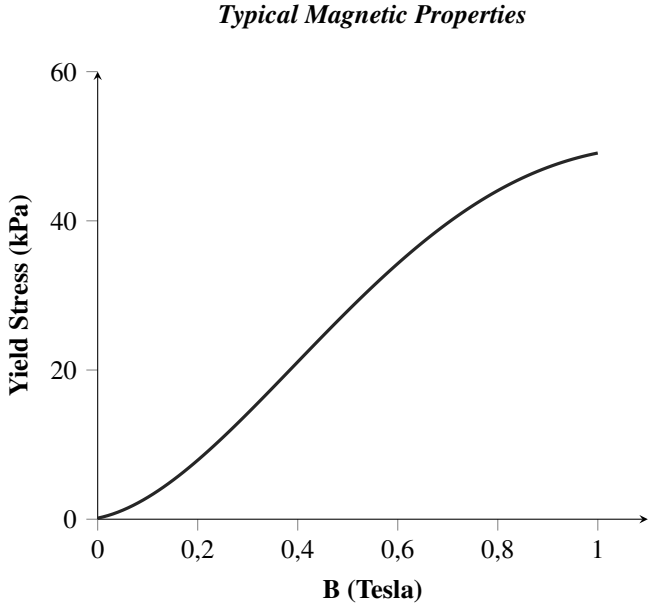



Figura 4: Relación continua entre el esfuerzo de fluencia y la densidad de flujo magnético para el fluido MRF-132DG, obtenida mediante regresión polinómica.

Mediante la correlación de puntos discretos de ambas curvas bajo valores comunes de intensidad de campo $H$, se generó un conjunto de datos correspondientes a $\tau_y$ vs $B$. Seguidamente, se aplicó una regresión polinómica de cuarto orden sobre los datos en el rango operativo de 0 a 1 T. La función resultante permitió evaluar el esfuerzo de cedencia para cualquier magnitud de densidad de flujo en el gap de manera continua. Esta relación empírica se definió como (Parlak *et al.*, 2012):

$$\tau_y(B) = 52{,}962B^4 - 176{,}51B^3 + 158{,}79B^2 + 13{,}708B + 0{,}1442 \quad (8)$$

donde $\tau_y$ representa el esfuerzo de cedencia y $B$ la densidad de flujo magnético. Esta ecuación capturó adecuadamente el comportamiento no lineal del fluido.

La fuerza total del amortiguador ($F_{\text{total}}$) se estimó como la suma de la componente viscosa ($F_\mu$) y la componente controlable magnéticamente ($F_\tau$), conforme al modelo de Bingham para flujo en ductos anulares (Wereley y Pang, 1998).

La fuerza viscosa, dependiente de la geometría y la cinemática del dispositivo, se determinó mediante la expresión siguiente:

$$F_\mu = U_p(A_p - A_r)\frac{6\mu_p L A_p}{\pi R_1 g^3} \quad (9)$$

donde $U_p$ es la velocidad del pistón, $A_p$ y $A_r$ son las áreas transversales del pistón y del vástago, $\mu_p$ es la viscosidad plástica base, $L$ es la longitud activa del gap, $R_1$ es el radio medio y $g$ es el espesor del gap.

La componente controlable se evaluó utilizando el esfuerzo de cedencia inducido, como:

$$F_\tau = c\frac{L}{g}A_p\tau_y \cdot \text{sgn}(U_p) \quad (10)$$

donde $c$ es un coeficiente adimensional dependiente del perfil de velocidad del flujo (aproximándose a 2 para flujo dominado por presión).

Para establecer las especificaciones de la bobina capaces de inducir el campo $B$ requerido, se implementó la ley de Ampère. Considerando que la principal caída de potencial ocurre en el espacio anular ($\mu_{r,\text{acero}} \gg \mu_{r,\text{fluido}}$), la fuerza magnetomotriz se aproximó con la ecuación:

$$N_c I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \approx \frac{B_{\text{gap}} \cdot 2g}{\mu_0 \mu_{r,\text{fluido}}} \quad (11)$$

donde $N_c$ es la cantidad de espiras, $I$ es la corriente eléctrica, $\mu_0$ es la permeabilidad del vacío y $\mu_{r,\text{fluido}}$ es la permeabilidad relativa del fluido MR. De esta formulación se determinó $N_c$ requerido para un valor de corriente preestablecido, garantizando el esfuerzo de cedencia necesario en el diseño.

Una vez obtenido el número de vueltas $N_c$, se verificó la viabilidad geométrica del devanado en el volumen de alojamiento asignado dentro del pistón. El diámetro máximo admisible para el alambre de cobre ($d_k$) se estimó mediante la relación:

$$d_k = \sqrt{\frac{L_c W}{N_c}} \quad (12)$$

donde $L_c$ y $W$ corresponden a la longitud axial y la profundidad radial del espacio destinado para la bobina, respectivamente. Este cálculo iterativo permitió consolidar la geometría final del núcleo y las especificaciones de devanado que posteriormente se sometieron a validación numérica.

### *3.2. Simulación por elemento finito*

El procedimiento se inició con la asignación de las propiedades de los materiales, los cuales se resumen en la Tabla 1. Para caracterizar el comportamiento magnético del fluido activo en el módulo ANSYS Magnetostatic, se digitalizó e incorporó su curva de magnetización no lineal (B-H) a partir de la gráfica de propiedades proporcionada en la ficha técnica del fabricante (LORD Corporation, 2010).

Tabla 1: Asignación de materiales en la simulación.

| **Componente** | **Material** |
|---|---|
| Devanado de la bobina | Cobre |
| Aislante térmico/eléctrico | Resina epóxica |
| Núcleo ferromagnético | Acero 1010 (SA1010) |
| Fluido activo | MRF-132DG |

La geometría del amortiguador se modeló mediante secciones transversales revolventes, representando el núcleo, la bobina, el aislante epóxico y el espacio anular de fluido. Posteriormente, se generó un dominio envolvente para agrupar todos los cuerpos y facilitar la asignación de condiciones de simulación.

Para la discretización del dominio, se aplicó un mallado con refinamiento local en regiones críticas como el espacio anular y el devanado, buscando un equilibrio óptimo entre la precisión de los resultados y el tiempo de cómputo. La configuración eléctrica de la bobina se estableció aplicando una condición de fuente de conducción sobre el volumen de cobre. Se definió una corriente continua de excitación fluyendo a través de las espiras que conforman el devanado, cuyos valores operativos se detallan en la Tabla 2 de la siguiente sección.

## 4. Resultados

### *4.1. Dimensionamiento analítico del émbolo*

El proceso partió de la definición de la estructura principal, estableciendo las dimensiones fundamentales del émbolo, el vástago, el núcleo ferromagnético y el alojamiento de la bobina. Los parámetros geométricos resultantes y las condiciones nominales de diseño se ilustran visualmente en la Figura 5 y se presentan en la Tabla 2.

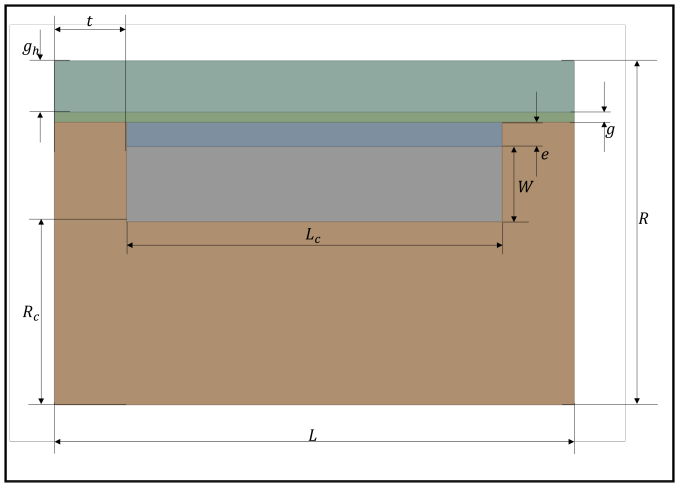



Figura 5: Parámetros geométricos definidos en el émbolo de la suspensión.

Tabla 2: Parámetros de entrada y condiciones de diseño geométrica.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Fuerza máxima objetivo ($F_{\text{obj}}$) | 2400 | N |
| Velocidad del pistón ($U_p$) | 0.05 | m/s |
| Carrera máxima operativa | 70 | mm |
| Corriente continua de excitación ($I$) | 1 | A |
| Diámetro del émbolo ($D$) | 45 | mm |
| Diámetro del vástago ($d$) | 15 | mm |
| Radio del núcleo ($R_c$) | 11.25 | mm |
| Espesor del aislante epóxico ($e$) | 1 | mm |
| Longitud activa total del gap ($L$) | 33 | mm |
| Espesor del gap ($g$) | 0.60 | mm |
| Longitud de los polos activos ($t$) | 9 | mm |
| Longitud axial de la bobina ($L_c$) | 15 | mm |
| Profundidad radial de la bobina ($W$) | 7.35 | mm |

Para la región donde interactúa el fluido magnetorreológico, se llevó a cabo un ajuste paramétrico iterativo hasta garantizar la magnitud de la fuerza resistiva deseada. Las propiedades reológicas y magnéticas características del fluido seleccionado se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades de operación del fluido MRF-132DG.

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Viscosidad plástica base ($\mu_p$) | 0.112 | Pa·s |
| Permeabilidad relativa ($\mu_{r,\text{fluido}}$) | 2 | - |

Aplicando el procedimiento descrito en la Sección 3.1, se evaluaron las contribuciones de la fuerza viscosa y controlable (Ecuaciones 9 y 10), así como los requerimientos del circuito magnético (Ecuaciones 11 y 12). Los resultados de este cálculo analítico de fuerzas y el dimensionamiento electromagnético se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados analíticos de fuerzas y parámetros electromagnéticos de salida.

| Variable | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Densidad de flujo magnético ($B$) | 0.90 | T |
| Esfuerzo de cedencia ($\tau_y$) | 47.17 | kPa |
| Fuerza viscosa ($F_\mu$) | 184.61 | N |
| Fuerza controlable ($F_\tau$) | 2250.80 | N |
| Fuerza total evaluada ($F_{\text{total}}$) | 2435.42 | N |
| Número de espiras requeridas ($N_c$) | 430 | vueltas |
| Diámetro máximo del alambre ($d_k$) | 0.50 | mm |

### 4.2. *Validación numérica del campo magnético*

El postprocesamiento de la simulación por elemento finito permitió visualizar la distribución del campo magnético en cortes axiales y radiales (ver Figura 6). Se verificó una concentración de densidad de flujo magnético congruente con los valores esperados en la región del gap, validando la suficiencia geométrica del núcleo propuesto para alojar el campo sin saturación extrema.

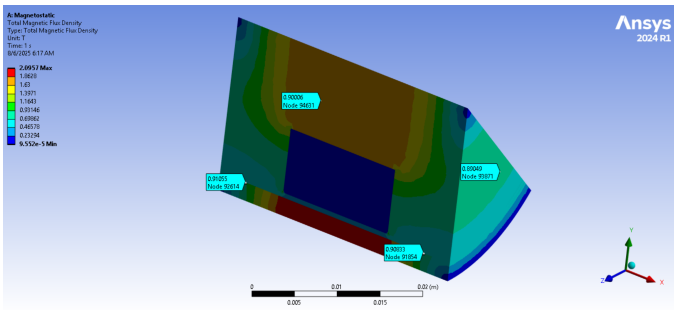



Figura 6: Resultados del análisis magnetostático de la configuración propuesta con valores de flujo magnético en los polos.

## 5. Discusión

El análisis cuantitativo demostró una congruencia significativa entre las formulaciones matemáticas y la simulación magnetostática por elemento finito. Mientras que el cálculo analítico proyectó una fuerza total de 2435.42 N a partir del campo magnético evaluado, el análisis numérico corroboró la generación de un flujo de 0.902 T en las regiones activas de los polos, validando con alta precisión la aproximación teórica de 0.90 T. Estos resultados respaldan la exactitud paramétrica de la configuración propuesta.

La obtención de 0.902 T se atribuye a la relación entre la intensidad del campo y el esfuerzo de cedencia ($\tau_y$) (Figura 4). Este nivel de inducción garantiza el desempeño óptimo del fluido MR (LORD Corp.), explotando su capacidad máxima sin exceder el límite donde el aumento del campo deja de traducirse en un mayor esfuerzo de cedencia. Alcanzar este valor asegura el cumplimiento de la fuerza objetivo de 2400 N requerida para la aplicación. Un flujo magnético distinto alteraría el rango de fuerzas amortiguadas. Aunque flujos mayores podrían incrementar ligeramente el desempeño, el enfoque de este trabajo prioriza la optimización energética para evitar la saturación constante del sistema, lo cual anularía la versatilidad

característica de una suspensión semiactiva. Bajo este concepto, los parámetros con mayor influencia en el desempeño son los geométricos ligados al espacio anular (gap). Consecuentemente, las aspectos críticos de diseño recaen en las propiedades magnéticas de la bobina. Esta concordancia teórica-numérica respalda tendencias reportadas en la literatura (Hu *et al.*, 2022; Chauhan *et al.*, 2024b). Si bien este modelo magnetostático se aplicó al diseño de suspensiones, la metodología es extrapolable a otros sistemas que dependan de la interacción entre campos magnéticos y componentes adyacentes.

## 6. Conclusiones

El análisis magnetostático por elemento finito (MEF) desarrollado en este estudio permitió caracterizar y validar el circuito electromagnético del émbolo propuesto. A partir de los resultados obtenidos, se logró una validación paramétrica que establece la relación directa entre los parámetros geométricos críticos (como $L_c$ y $W$) y la distribución del flujo magnético. Esta caracterización resultó fundamental para identificar y mitigar las zonas de saturación prematura en el material ferromagnético frente a distintas condiciones de excitación. El principal aporte de conocimiento de esta investigación al diseño conceptual de amortiguadores magnetorreológicos radica en que la metodología empleada proporciona un marco de referencia robusto que supera las aproximaciones analíticas ideales. Esta aproximación permite a los diseñadores maximizar la densidad de flujo en la brecha activa de manera precisa, garantizando la eficiencia magnética del circuito durante las etapas tempranas de desarrollo (Wang *et al.*, 2024). Como trabajo futuro, la validación paramétrica y magnética obtenida en este estudio constituye la base ingenieril necesaria para la etapa de manufactura de estos componentes. La consolidación de este diseño dimensional permitirá avanzar hacia la fabricación del prototipo y su posterior caracterización experimental en bancos de prueba bajo condiciones operativas reales.

## Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron Grammarly para verificar la ortografía y gramática. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

## Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Aeronáutica en Querétaro por el apoyo institucional y las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación.

## Referencias

Carlson, J. D. y Spencer, B. F. (1996). Magneto-rheological fluid dampers: Current status and future directions. En *Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems*, volumen 2715, pp. 14–24. SPIE.

Chauhan, V., Kumar, A., y Sham, R. (2024a). Magnetorheological fluids: A comprehensive review. *Manufacturing Review*, 11:6.

Chauhan, V., Kumar, A., y Sham, R. (2024b). Performance evaluation of magnetorheological damper using finite element analysis. *NanoWorld Journal*, 10(S1):S259–S264.

Hu, G., Wu, L., Deng, Y., Yu, L., y Li, G. (2022). Optimal design and performance analysis of magnetorheological damper based on multiphysics coupling model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 558:169527.

Jr, B. F. S., Dyke, S. J., Sain, M. K., y Carlson, J. D. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3):230–238.

Liu, Y., Li, A., Sun, Z., y Chen, S. (2022). Theoretical design and experimental study of magnetic circuit for magnetorheological (mr) damper of shear-valve mode. *Advanced Electromagnetics*, 11(4).

LORD Corporation (2010). Rd-8041-1 technical datasheet. Technical datasheet RD-8041-1, LORD Corporation, Cary, NC.

Osial, M., Pregowska, A., Warczak, M., y Giersig, M. (2023). Magnetorheological fluids: A concise review of composition, physicochemical properties, and models. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34(16):1864–1884.

Parlak, Z., Colakoglu, M., y Engin, T. (2012). Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field. *Smart Materials and Structures*, 21(12):125015.

Spaggiari, A. (2022). Magnetorheological fluids in aerospace applications: A review. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(4):03122001.

Wang, Z., Liu, C., Zheng, X., Zhao, L., y Qiu, Y. (2024). Advancements in semi-active automotive suspension systems with magnetorheological dampers: A review. *Applied Sciences*, 14(17):7866.

Wereley, N. M. y Pang, L. (1998). Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models. *Smart Materials and Structures*, 7(5):732–743.