

# *Dimensionamento de pistão magnetoreológico utilizando análise numérica*

Lays Cristina Gama Lopes; Luiz Fernando Cótica; Ivair Aparecido dos Santos; Wagner André dos Santos Conceição  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
UEM  
Maringá, Brasil  
laysgamalopes@gmail.com

**Resumo**— Dispositivos magnetoreológicos – MR vêm recebendo uma atenção especial nos últimos anos, por serem mecanismos de controle muito promissores, que utilizam fluido MR para controlar o movimento. Os fluidos MR consistem em micropartículas magneticamente polarizáveis, dispersas em um fluido transportador. Quando um campo magnético é aplicado aos fluidos MR, as partículas formam correntes, alterando sua reologia de um fluido para um semissólido que apresenta comportamento visco plástico. Esta capacidade do fluido MR alterar reversivelmente e instantaneamente sua viscosidade de um fluido para um semissólido de maneira controlável e proporcional ao campo magnético aplicado, permite o controle da força de resistência ao movimento sobre mecanismo. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um pistão MR de resistência ao movimento com dimensões que supram as necessidades de projeto, evitando o superdimensionamento por meio da análise numérica.

**Palavras-chave**—dispositivo magnético reológico; fluido MR; análise numérica; projetos mecânicos.

## I. INTRODUÇÃO

Dispositivos de controle de vibrações se dividem em três grupos básicos de acordo com o modo de atuação, podendo ser de controle passivo, ativo ou semiativo. Dispositivos de controle semiativo vêm atraindo a atenção da comunidade científica por serem capazes de gerar força de controle de forma passiva através da dissipação ou armazenamento da energia produzida pelo sistema. No entanto, é possível que a intensidade da força seja controlada de maneira ativa por um sinal de controle que ajusta as propriedades mecânicas, em tempo real, de acordo com a necessidade do sistema.

Um pistão semiativo pode ter a intensidade da força que gera controlada alterando-se a viscosidade do fluido de trabalho pela aplicação de um campo magnético também controlável. O material capaz de gerar essa resposta ao campo aplicado é denominado Fluido Magnetoreológico – (MR) [1]. Para um fluido MR, a tensão de cisalhamento pode ser controlada de forma a aumentar ou diminuir com a intensidade do campo magnético.

O objetivo deste trabalho é dimensionar um pistão magnético reológico a partir das propriedades, medidas experimentalmente, de um fluido magnético reológico, utilizando uma análise numérica para encontrar as dimensões

ótimas do dispositivo evitando superdimensionamento e desperdício de material, fatores cruciais para o desenvolvimento de novos projetos.

## II. FLUIDO MAGNATOREOLÓGICO

Fluidos magnetoreológicos são formados basicamente por três componentes principais: um líquido portador que pode ser um óleo hidrocarboneto (mais comum), composto por óleos minerais, sintéticos ou até mesmo a mistura dos dois, por silicones ou água dependendo da aplicação; partículas micro magnéticas, inseridas no líquido portador formando uma dispersão coloidal [2] e aditivos para evitar sedimentação, prevenir aglomeração, melhorar a lubrificação, prevenir oxidação, modificar a viscosidade e inibir a corrosão [3]. Esse material tem o aspecto de um óleo cinza (sem aplicação de campo magnético) como pode ser observado em Fig. 1.



Fig. 1. Aspecto do fluido magnético reológico sem aplicação de campo magnético e com aplicação de campo magnético, respectivamente (imagem adaptada de [4]).

Nos tópicos que seguem será feita uma abordagem sobre as características do fluido MR.

### A. Fluido MR - Comportamento

Quando expostas a um campo magnético, as partículas magnéticas inseridas no fluido apresentam um momento de dipolo magnético paralelo à direção das linhas de fluxo de campo e assim, as partículas anteriormente desordenadas, alinham-se ao longo dessas linhas de fluxo formando uma estrutura em forma de correntes [5], como pode ser observado em Fig. 2.

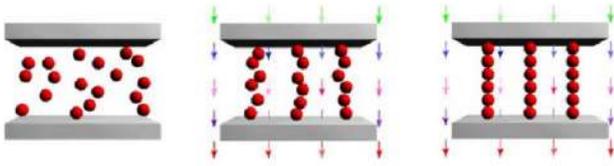


Fig. 2. Alinhamento das partículas magnéticas presentes no fluido MR (© 2005 Lord Corporation [6]. Todos os direitos reservados).

Para sair dessa configuração, faz-se necessária a aplicação de uma tensão de cisalhamento que seja suficientemente grande para fazer com que as correntes formadas pelas partículas deslizem umas sobre as outras. A resistência que essas correntes apresentam ao deslizamento é proporcional à magnitude do campo aplicado, então quanto maior o campo, maior a interação entre as partículas e maior a tensão de cisalhamento necessária para fazer escoar o material, agora em estado de semissólido.

Esse comportamento apresentado pelo fluido MR é descrito pelo modelo visco-plástico de Bingham [7], dado por (1):

$$\tau = \tau_0(H)\text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma}, \quad (1)$$

e representado graficamente por Fig. 3, em que  $\tau_0(H)$  é a tensão de cisalhamento limite induzida pelo campo magnético (Pa),  $\text{sgn}$  é a função sinal,  $\eta$  é a viscosidade plástica (Pa.s) do fluido e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação por cisalhamento (1/s) do material.

Nota-se que na ausência de campo magnético,  $H=0$ , o material se comporta como um fluido newtoniano.

### B. Fluido MR – Modo de Operação

O fluido magnético reológico apresenta três modos distintos de aplicação, sendo estes o módulo válvula, modo de cisalhamento e modo de esmagamento [8]. Sendo o modo de válvula o mais popular modo de operação e o modo aplicado na operação de pistão MR.

Ainda segundo [8], neste modo os polos magnéticos são fixos e funcionam como válvulas e então o fluido MR é pressurizado de maneira que flua entre esses dois polos. Expondo o fluido ao campo magnético, o alinhamento das partículas cria uma resistência ao fluxo do fluido o que leva a conclusão de que a vazão do material é função da intensidade do campo magnético aplicado. A Fig. 4 representa o modo de válvula.

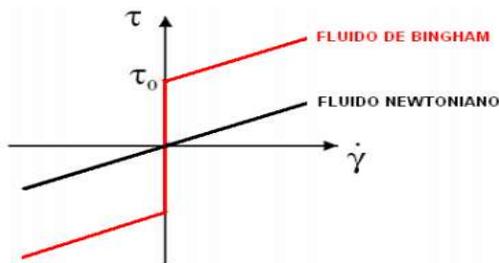


Fig. 3. Modelo visco-plástico de Bingham (imagem adaptada de [7]).

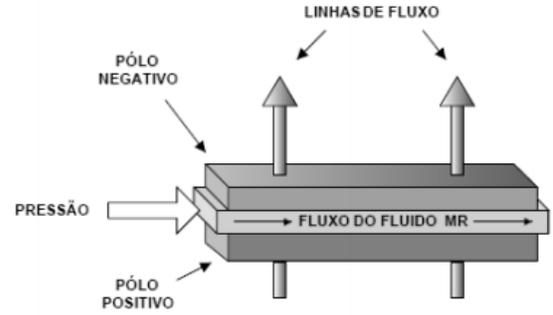


Fig. 4. Modelo visco-plástico de Bingham (imagem adaptada de [9]).

### C. Fluido MR – Caracterização

Para aplicação no dispositivo desenvolvido, foi utilizado um fluido MR comercial da empresa Lord Corporation, o MRF 122EG.

Para que fosse possível encontrar dados para o fluido MR como intensidade do campo magnético, tensão de cisalhamento em função do campo aplicado, taxa de deformação por cisalhamento e a constante de amortecimento plástico, uma caracterização deste foi realizada experimentalmente com testes de reometria, utilizando um reômetro de placas paralelas passível de aplicação de campo magnético.

O aparelho é composto por cinco partes principais: um acessório para o fluido MR, uma entrada mecânica, um circuito eletromagnético, uma célula de carga de compressão e um sistema de aquisição de dados.

A placa superior foi ligada a um servo motor que permitia o giro da mesma, provocando ações de cisalhamento no fluido MR o qual estava em contato, além de um motor linear capaz de ajustar as dimensões de espaço entre as duas placas, onde o fluido se alojava. Um magnetômetro foi utilizado para medir o campo magnético aplicado.

## III. PISTÃO MAGNETOREOLÓGICO

Uma interessante aplicação deste material está associada a sistemas amortecedores que tem por finalidade estabilizar a vibração sentida pelo dispositivo. A ideia é que ao sentir um impacto, um comando seja enviado ao dispositivo, como um sinal magnético e assim, a viscosidade do fluido no interior da câmara é alterada proporcionalmente ao estímulo gerado e a vibração sentida é, então, estabilizada. Esses amortecedores MR são representados por um cilindro principal contendo um pistão, um circuito magnético controlável (bobinas), um acumulador e o fluido MR, como pode ser observado em Fig.5.

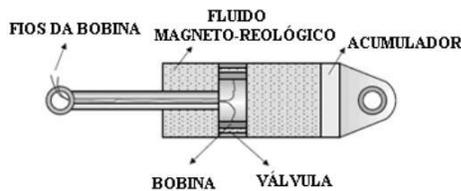


Fig. 5. Representação de um amortecedor magnetoreológico (imagem adaptada de [9]).

Com base nessa configuração um pistão magnetoreológico foi desenvolvido com o intuito de gerar resistência ao movimento de um objeto qualquer preso a sua haste. Os tópicos que seguem revelam a metodologia utilizada para o desenvolvimento de tal dispositivo.

#### A. Pistão MR - Configuração

O software de desenho CAD 3D – Solidworks foi utilizado para o desenvolvimento do design do mecanismo, tornando possível encontrar a melhor configuração para as necessidades de projeto. Este é representado pela Fig. 6 e conta com o cilindro principal, um êmbolo, uma haste com acessório que possibilite prendê-la ao objeto que se deseja controlar o movimento, uma mola de compressão que permite o retorno da haste para a posição inicial e o fluido magnético reológico.

As dimensões e material previamente estipulados para o êmbolo estão de acordo com a Tabela 1.

O funcionamento do pistão se dá pelo movimento do êmbolo, onde o fluido magnetoreológico flui através de seus orifícios, que possuem bobinas, circulando de uma câmara a outra. Como o campo magnético gerado é perpendicular ao êmbolo do pistão (válvula), uma região de ativação é criada e as partículas alinhadas criam uma barreira à passagem do fluido, resultando na força do mecanismo.



Fig. 6. Pistão MR com retorno por mola.

TABELA I. DIMENSÕES E MATERIAL

Propriedade	Símbolo	Valor
Espessura do êmbolo	e	0,02m
Densidade do pistão (aço)	$\rho$	7900kg/m <sup>3</sup>

Com base no modelo do comportamento reológico do fluido MR (de Bingham), um modelo mecânico idealizado

proposto por [10] foi criado e também foi chamado de modelo Bingham, que consiste de um elemento de atrito de Coulomb colocado em paralelo com o amortecedor viscoso, como mostrado na Fig. 7.

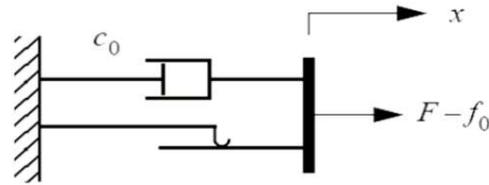


Fig. 7. Modelo de Bingham (imagem adaptada de [1]).

De acordo com o modelo, para velocidades do pistão diferente de zero, a força (N) gerada pelo mecanismo é dada por:

$$F = fc \operatorname{sgn}(x) + c_0 x + f_0, \quad (2)$$

em que  $x$  é a velocidade relativa das extremidades do amortecedor (m/s),  $\operatorname{sgn}(\ )$  é a função sinal,  $c_0$  é a constante de amortecimento plástico (Pa.s),  $fc$  é a força relacionada à tensão de escoamento do fluido (N) e  $f_0$  é a força incluída na equação devido ao acumulador presente nos amortecedores (N).

Para o caso do pistão aqui modelado em que não há a presença de um acumulador, essa força é retirada da equação e substituída pela força elástica da mola de compressão.

Com base no equacionamento apresentado e tendo conhecimento do modo de operação tanto do fluido como do dispositivo, o mecanismo foi dimensionado para apresentar a melhor resposta aos estímulos gerados com maior economia possível.

#### B. Pistão MR – Dimensionamento

Para o dimensionamento do dispositivo foi realizado um balanço de forças de acordo com o esquema representado em Fig. 8.

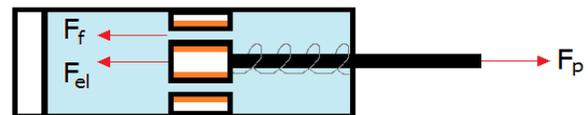


Fig. 8. Balanço de forças do dispositivo.

Tem-se assim que para o fluido magnetizado a força na puxada (N) é dada por:

$$F = f_c \operatorname{sgn}(v) + c_0 v + F_{el}, \quad (3)$$

em que  $F_{el}$  é a força elástica da mola de compressão (N), representada por:

$$F_{el} = k.d, \quad (4)$$

sendo  $k$  a constante elástica da mola (N/m),  $d$  o percurso percorrido pelo pistão (m) e  $f_c$  definida como:

$$f_c = \tau_{OFF}(H).A, \quad (5)$$

em que  $A$  é a área de seção transversal do êmbolo.

No retorno do êmbolo à posição inicial, o sistema é desmagnetizado e o fluido opera como um fluido newtoniano. A volta se dá devido à força da mola, com baixa resistência devido ao fluido que apresenta suas partículas dispersas. As equações (6) e (7) mostram o balanço de forças na volta:

$$F_v = F_{el} - F_{fv}, \quad (6)$$

$$F_{fv} = \tau_{OFF}(H).A, \quad (7)$$

em que  $\tau_{OFF}(H)$  é a tensão de cisalhamento em Off State (Pa) (sem aplicação de campo magnético).

E lembrando que, pela segunda lei de Newton, a força é uma relação de massa e aceleração, assim, conhecendo as dimensões do êmbolo e sabendo o material do qual é fabricado (aço) e assim, a sua densidade, é possível manipular (6) de forma a obter:

$$m.a = F_{el} - \tau_{OFF}(H).A, \quad (8)$$

sendo:

$$m = V . \rho, \quad (9)$$

em que  $m$  é a massa do pistão (kg) e  $V$  é o seu volume ( $m^3$ ) (que pode ser determinado com a descoberta do raio ótimo do êmbolo).

Para que fosse possível encontrar as dimensões ótimas do sistema de acordo com as exigências de projeto, alguns dados de entrada foram fornecidos como pode-se observar na Tabela II.

TABELA II. DADOS DE ENTRADA DE PROJETO

Dados de Projeto		
Propriedade	Símbolo	Valor
Velocidade de volta	v	0,7m/s
Velocidade de puxada (ida)	v_ida	0,1725m/s
Força máxima de puxada	Fp	2500N
Percurso do pistão	d	0,7m

### C. Pistão MR – Análise Numérica

Apesar de alguns dados terem sido previamente estipulados para que o pistão opere de forma favorável às exigências de projeto, não se tem conhecimento do Raio ótimo do êmbolo –  $R$  (m), e conseqüentemente da área de seção transversal, dada por (10), e da camisa do pistão de forma que

este proporcione tamanho tal que gere a força máxima requerida com o menor volume de recipiente (da camisa do pistão) possível, pois quanto menor for o êmbolo menos fluido magnético reológico será empregado, pois menor será o volume do sistema, fator de extrema importância para economia de material aplicado em um projeto de engenharia.

$$A = \pi.R^2 \quad (10)$$

Além disso, é preciso garantir, antes da construção do protótipo, que este vá gerar a força máxima requerida quando o fluido estiver na sua máxima magnetização e que quando a magnetização for nula o êmbolo terá tamanho tal que retornará a sua posição inicial na velocidade exigida, lembrando que quanto maior o pistão, maior é a força que dificulta a volta.

Como todas as equações para o dimensionamento do sistema envolvem o Raio ótimo do êmbolo é preciso desenvolver um programa computacional iterativo que envolva todas as equações e as curvas dos dados analisados experimentalmente de forma a retornar um valor favorável para o raio que supra, ao mesmo tempo, todas as necessidades de projeto, gerando a força necessária com menos gastos de material e tornando possível o conhecimento da quantidade de fluido MR a ser utilizada.

O programa computacional foi desenvolvido no software MATLAB e assim, os dados de projeto foram obtidos pela análise numérica, diminuindo as possibilidades de erro ao construir o mecanismo.

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que fosse possível variar o campo magnético, foi variada a corrente elétrica, obtendo dados conforme a Tabela III.

TABELA III. CAMPO MAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA

Corrente Elétrica - A	Campo magnético - mT
0	0,7
1	171,4
2	345
3	511
4	658
5	768

Os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação por tensão de cisalhamento foram obtidos experimentalmente, em duplicata, com auxílio de reômetro passível de aplicação de campo magnético, os dados foram inseridos no programa MATLAB e uma programação foi realizada para gerar a média aritmética entre os dados e os gráficos que revelam a variação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação por cisalhamento, conforme a Fig. 9.

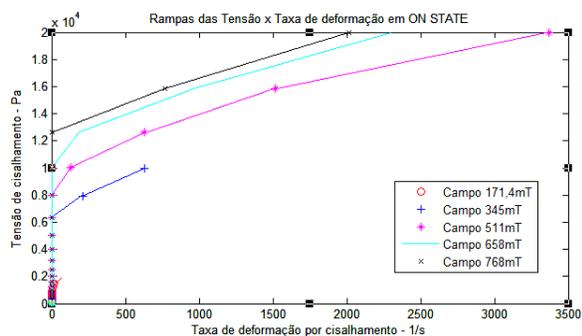


Fig. 9. Tensão de cisalhamento x taxa de deformação por cisalhamento.

De acordo com este gráfico mostrado na Fig.9 é possível encontrar a constante de amortecimento plástico –  $C_o$  que é dada pelo coeficiente angular dos seguimentos de reta para cada campo aplicado, a partir de  $\gamma = 100/s$  (taxa de deformação por cisalhamento). E podem ser observadas na tabela IV.

TABELA IV. CONSTANTE DE AMORTECIMENTO PLÁSTICO -  $C_o$

Campo magnético - mT	$C_o$ - Pa.s
0,7	0.0702
171,4	51,2554
345	17.8991
511	10.0507
658	15.7850
768	19.8665

Os valores de  $C_o$  encontrados para o o campo magnético a 171,4mT e 345mT apresentaram valores mais elevados do que os valores que deveriam apresentar, pela falta de dados que possibilitassem um cálculo mais coerente do coeficiente angular das retas, mas também são campos magnéticos de baixa intensidade os quais não geram interação entre as partículas suficiente para gerar a força máxima requerida pelo projeto, ficando então responsáveis pela geração intermediária da força (entre 0 e 2,5kN).

Simulando os dados encontrados e “chutando” um valor inicial para o Raio ótimo do êmbolo que fosse suficientemente grande para que fosse possível acoplar a haste e as bobinas de forma a obter uma geometria que possibilitasse o correto funcionamento do mecanismo, conforme a Fig. 10 e o suficientemente pequeno para evitar desperdício de material e gerar a força requisitada pelo projeto, obteve-se, por meio de análise numérica (iterações) que: com campo magnético de 511mT (3A) a força máxima requerida já é obtida, com raio de tamanho favorável. Os resultados finais estão presentes na Tabela V.

TABELA V. PARÂMETROS FINAIS DE PROJETO.

Propriedade	Símbolo	Valor
Força máxima	F	2472,2 N
Corrente máx. necessária	i	3 A
Campo magnético máx necessário	H	511mT
Contante de amortecimento plástico máx. necessário	$C_o$	10,0507 Pa.s
Tensão de cisalhamento máx.	$\tau_o$	20 kPa
RAIO ÓTIMO DO ÊMBOLO	R	0,040 m
MASSA DO ÊMBOLO	m	2,5kg
Força elástica para retorno	Fel	28N

Como a força elástica auxilia na resistência ao movimento na puxada e é elemento mecânico necessário para realizar o movimento de volta, tem-se que sua intensidade foi estipulada como sendo 28 N que é a força necessária para completar os 2500 N de força máxima na ida, requisito pré estipulado pelo projeto.

Para verificar se esses 28 N de força elástica são suficientes para fazer o mecanismo voltar à posição inicial em no máximo 1s ( $v = 0,7m/s$  em um percurso de 0,7m), é preciso substituir os dados encontrados em (8) e (10), sendo  $\tau_{OFF}(H)$  dada pela Fig. 11.

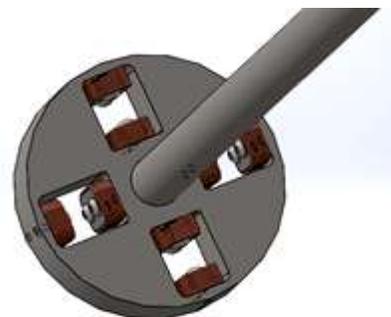


Fig. 10. Design do êmbolo do mecanismo.

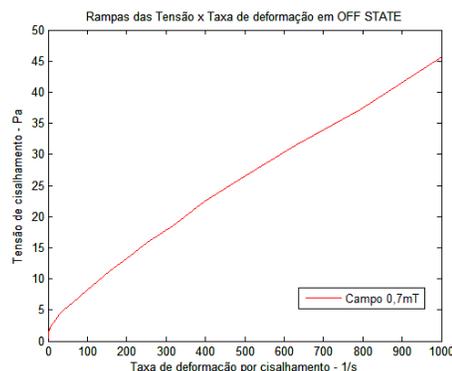


Fig. 11. Tensão de cisalhamento x taxa de deformação por cisalhamento em OFF State.

Substituindo os valores de tensão de cisalhamento em off state em (8), tem-se que a aceleração do mecanismo é cerca de  $11\text{m/s}^2$  o que garante a volta do êmbolo à posição inicial em menos de 1s, o que revela que  $F_{el} = 28\text{N}$  é força suficiente para fazer o dispositivo operar conforme as necessidades do projeto.

## V. CONCLUSÃO

Esta pesquisa foi de fundamental importância para o dimensionamento dos componentes principais de um pistão magnético reológico, pois permitiu por meio da análise numérica a obtenção das dimensões ótimas do dispositivo estudado, o que na engenharia é peça essencial para o desenvolvimento de um projeto funcional e de custos reduzidos, capaz de gerar lucros sem gastos desnecessários e com dimensões que corroborem com a expectativa do projeto.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Antônio José Faria Bombard da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEL, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e a CAPES pelo subsídio a mim concedido.

## REFERÊNCIAS

- [1] SPENCER, B. F. et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, n. 3, p. 230-238, 1997.
- [2] SPAGGIARI, A. Properties and applications of Magnetorheological fluids. *Frattura ed Integrità Strutturale*, n. 23, p. 48, 2013.
- [3] BLACK, T.; CARLSON, J. D. **Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] SIDPARA, A. **Magnetorheological finishing: a perfect solution to nanofinishing requirements**. *Opt. Eng.* 53(9), 092002 (Mar 31, 2014).
- [5] KCIUK, M.; TURCZYN, R. Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 18, n. 1-2, p. 127-130, 2006.
- [6] Lord Corporation, [www.lord.com](http://www.lord.com)
- [7] SHAMES, Irving H. **Elastic and inelastic stress analysis**. CRC Press, 1997.
- [8] LIMA, A. S. de. **Identificação experimental de um Sistema magneto-reológico**. Rio de Janeiro: COPPE, 2011.
- [9] CARLSON, J.D. e JOLLY, M.R. **MR-fluid - Foam and Elastomer Devices**. *Mechatronics* 10, p. 555.569, 2000.
- [10] STANWAY, R. SPROSTON, J.L. and STEVENS, N.G. **Non-linear Identification of an Electrorheological Vibration Damper**. *IFAC Identification and System Parameter Estimation*, pp. 195–200, 1985.