DOI: 10.48011/asba.v2i1.1532

Plataforma de ensaios dinâmicos com amortecedor magneto-reológico: identificação em modelo de histerese ⋆

João G. Raminelli * **Elmer Lévano** *
Marcio A. F. Montezuma * **Ricardo Breganon** **
Alessandro N. Vargas *

* *Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Av. Alberto Carazzai 1640, Cornélio Procópio, PR, Brasil.*
avargas@utfpr.edu.br
** *Instituto Federal do Paraná – IFPR, Av. Dr. Tito, 801, Jacarezinho, PR, Brasil.*

Abstract: The magnetorheological damper is a device that has internal fluid that can be controlled through electrical current. The electrical current then controls the device's toughness, a feature that allows users to control the rigidness of the damper against movements. This paper presents an identification procedure for a magnetorheological damper. The identification was performed using experimental data: the data indicate that the Dahl model shows promising results.

Resumo: O amortecedor magneto-reológico é um dispositivo que possui um fluido interno capaz de ser controlado através da corrente elétrica. A corrente elétrica controla a resistência do dispositivo, um recurso que permite aos usuários controlar a rigidez do amortecedor contra movimentos. Este artigo apresenta um procedimento de identificação para um amortecedor magneto-reológico. A identificação foi realizada com dados experimentais: os dados indicam que o modelo Dahl mostra resultados promissores.

Keywords: hysteresis; Dahl model; magnetorheological damper; identification.

Palavras-chaves: histerese; modelo de Dahl; amortecedor magneto-reológico; identificação.

1. INTRODUÇÃO

Na literatura, um fluido com capacidade de modificar sua estrutura sob condições operacionais diversas é chamado de fluido controlável Yang et al. (2002). Uma classe de fluidos controláveis que atraíram bastante interesse pelas aplicações é denominado fluido magneto-reológico. O fluido magneto-reológico é usado em amortecedores para sistemas semi-ativos no controle de vibrações Hassani et al. (2014), em suspensões automotivas Sassi et al. (2005), em sistemas de amortecimento sísmicos, próteses inteligentes Lima (2011) e estabilizar instrumentos de precisão Meng et al. (2019). Esses fluidos possuem menor resistência ao cisalhamento, uma temperatura de trabalho mais baixa e alta capacidade de dissipação de energia Yarali et al. (2019).

Em relação aos amortecedores tradicionais, sabemos que estes possuem um desempenho limitado, dependendo fortemente das condições do ambiente externo. O desempenho do amortecedor pode ser melhorado quando em sua estrutura interna utiliza-se fluido magneto-reológico, veja Luong et al. (2020).

Os amortecedores magneto-reológico (MR) são promissores dispositivos de controle de vibrações, que combinam confiabilidade e estabilidade de sistemas passivos, mantendo a versatilidade de dispositivos ativos, com baixo consumo de energia, Aguirre et al. (2012).

A característica fundamental do amortecedor MR é que suas propriedades reológicas e magnéticas podem ser modificadas via corrente elétrica. Por isso dizemos que estes amortecedores são dispositivos controláveis: ao controlar a corrente elétrica consumida, controlamos então a propriedade magneto-reológica do dispositivo.

Entretanto a modelagem de amortecedores magneto-reológicos é um problema desafiador devido ao seu comportamento histerético Zamani et al. (2019). Neste trabalho, o objetivo é determinar o comportamento dinâmico do amortecedor MR, ou seja, é considerado a dinâmica não-linear (histerese) inerente do fluido MR, Stutz (2005).

A principal contribuição desse trabalho é mostrar a identificação de um modelo de histerese para um dispositivo mecatrônico acoplado a amortecedor MR. Na literatura, há varios modelos para representar histerese. Dentre eles, destaca-se o modelo de Dahl: tal modelo já foi usado para descrever a relação entre deslocamento e força restauradora do amortecedor MR, veja Spencer et al. (1997). Neste trabalho, a identificação do modelo de Dahl foi realizada através de dados experimentais obtidos em laboratório.

⋆ Agradecemos à CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

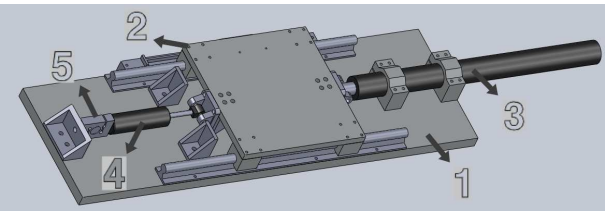

Figura 1. Desenho 3D do dispositivo mecatrônico acoplado a amortecedor magneto-reológico.

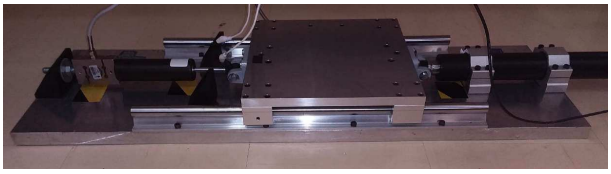

Figura 2. Aparato mecatrônico contendo amortecedor MR.

Para obter os dados experimentais, foi construída uma plataforma de ensaios inédita no Paraná. A plataforma contém uma mesa (semelhante ao *shaking table* unidirecional) acoplada a um amortecedor MR. Nos experimentos, o amortecedor foi excitado sob diferentes combinações de frequência e deslocamento. Com os dados colhidos e arquivados, foi possível determinar os parâmetros para o modelo de histerese (i.e., modelo de Dahl). Comparativo entre os dados experimentais e dados gerados no modelo de Dahl corroboram os benefícios do uso do modelo proposto aqui.

Este trabalho possui forte contribuição tecnológica, pois apresenta uma plataforma mecatrônica para ensaios de amortecedor MR. A teoria é usada em apoio ao trabalho tecnológico. De fato, a teoria de sistemas com histerese é utilizada na identificação de modelo não-linear, que objetiva descrever o comportamento dinâmico do amortecedor MR. A próxima seção apresenta mais detalhes sobre a plataforma de ensaios dinâmicos.

2. PLATAFORMA DE ENSAIOS DINÂMICOS

Uma plataforma de testes foi construída para verificar o comportamento do amortecedor magneto-reológico, modelo RD-8041-1, fabricado pela LORD Corporation USA. Na sequência, apresentamos as características da montagem.

Figura 1 mostra o dispositivo principal composto por: uma base sólida de metal [1], e na parte superior, uma mesa deslizante [2]. Na extremidade direita, o atuador [3] anexado à mesa deslizante para realizar as vibrações. Na extremidade esquerda, o amortecedor MR [4] é acoplado a célula de carga [5]. Essa configuração permite capturar informações como o deslocamento e a força, que são essenciais para o cálculo dos valores dos parâmetros no modelo de histerese a ser apresentado adiante. Figura 2 mostra imagem real da plataforma de teste.

2.1 Amortecedor magneto-reológico

Consideramos a seguir as propriedades intrínsecas do amortecedor MR.

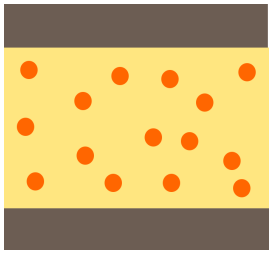

Figura 3. Fluido MR na ausência de um campo magnético.

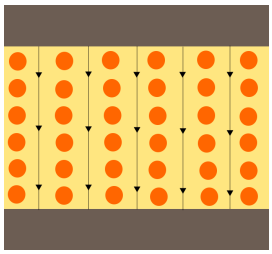

Figura 4. Fluido MR na presença de um campo magnético.

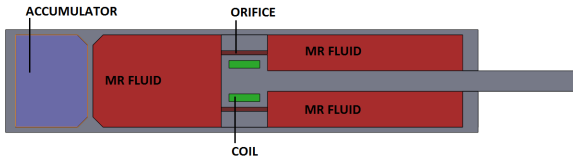

Figura 5. Diagrama do amortecedor MR.

Propriedades estruturais: Os amortecedores MR usam fluidos que contêm grandes quantidades de partículas facilmente magnetizáveis Vicente et al. (2011). As propriedades do fluido MR dependerão da redistribuição e concentração das partículas, assim como as propriedades do fluido transportador, temperatura e intensidade do campo magnético, Jolly et al. (2012).

Na aplicação de um campo magnético no fluido MR, as partículas no interior se alinham devido ao momento dipolar paralelo à direção das linhas de fluxo do campo. O alinhamento dessas partículas configuram uma estrutura semelhante à corrente, conforme Figuras 3 e 4.

As partículas alinhadas tornam-se resistentes a qualquer força externa que tente movê-las, essa resistência é proporcional à intensidade do campo magnético Lima (2011). Os principais componentes de um amortecedor de MR são mostrados na Figura 5 (vide Stutz (2005)), tais como:

- cilindro principal,
- o pistão,
- circuito magnético (bobina),
- o acumulador,
- fluido magneto-reológico.

No momento em que o amortecedor estende o pistão, contido no cilindro principal, o fluido MR passa através de uma válvula, fazendo que o fluido se movimente de uma cavidade para outra. Controlar a intensidade do campo magnético, em realidade, é regular a resistência do fluido atraves da válvula, e por sua vez resulta no controle da fricção do pistão aos movimentos, Carlson and Jolly (2000).

2.2 Configuração experimental: detalhes eletrônicos

A plataforma de testes é capaz de excitar o amortecedor com distintos valores de deslocamento e frequência. Um circuito eletrônico foi projetado para mensurar e registrar tais valores obtidos experimentalmente.

Uma placa Arduino Uno é usada para gerar um sinal PWM que alimenta um módulo de acionamento de motor IBT-3. Esse módulo fornece a energia consumida pelo atuador, e este move sua haste de modo unidirecional, seguindo a frequência e a distância programados no Arduino Uno.

As forças exercidas no amortecedor MR são geradas de acordo com o ciclo de carregamento e descarregamento do amortecedor. Essas forças foram capturadas pela célula de carga, fabricada por IWM modelo ZLS-500 Kg, acoplada ao amortecedor, e enviadas à placa de aquisição de dados, fabricada por National Instruments modelo NI PCI-6221, trabalhando em conjunto com MATLAB. Deslocamentos da haste foram capturados por um encoder linear, fabricada por Sino modelo KA-300. Os dados experimentais foram arquivados e analisados posteriormente.

3. MODELO DE HISTERESE

A histerese é um fenômeno não-linear encontrado em vários sistemas físicos, por exemplo em direção e suspensão veiculares Dutta and Choi (2018), em monitoramento de saúde estrutural Inman and Carneiro (2020), em sistemas acústicos Sarno and Franke (1994), em transdutores híbridos Ge and Jouaneh (1995), entre outras aplicações Ismail et al. (2009); Ikhouane et al. (2020).

Em particular, para sistemas mecânicos e estruturais, a histerese denota a memória do comportamento inelástico, no qual a força restauradora age contra a força imposta pela energia dissipadora. Deve-se notar que a força restauradora não apenas depende da deformação instantânea, também depende da deformação prévia Ismail et al. (2009).

A modelagem de sistemas atraves de leis físicas para processos não-lineares sob histerese torna-se bastante complicada, mesmo para aplicações simples: modelagem de sistemas que contêm histerese é tarefa desafiadora Ismail et al. (2009); Noël et al. (2016); Aguirre et al. (2010).

Na tentativa de promover a modelagem do processo, alguns autores usam modelos de histerese na forma 'caixa preta', veja Ismail et al. (2009) para mais detalhes. Na seguinte seção, apresentamos alguns aspectos do modelo caixa preta nomeado de Dahl.

3.1 Modelo de Dahl

De acordo com Haines et al (2007), o modelo de Dahl segue a forma

$$\begin{cases} F(t) = k_x[v(t)]\dot{x}(t) + k_w[v(t)]w(t), \\ \dot{w}(t) = \rho(\dot{x}(t) - |\dot{x}(t)|w(t)), \end{cases} \tag{1}$$

no qual $\dot{x}(t)$ representa a velocidade do pistão do amortecedor, $v(t)$ denota a tensão de entrada do amortecedor, $F(t)$ representa a força de saída do amortecedor e $w(t)$ denota a variável histerética do amortecedor. Os elementos k_x e k_w representam os coeficientes de atrito viscoso e seco, respectivamento, e junto com o parâmetro $\rho > 0$, que é um parametro auxiliar da variável histerética $w(t)$, podem depender da tensão elétrica do amortecedor, veja Aguirre et al. (2010).

3.2 Identificação de parâmetros do modelo de Dahl

A metodologia de identificação utilizada é baseada nos resultados da monografia (Haines et al, 2007, pag. 154 a 156). O procedimento pressupõe o conhecimento do ciclo de histerese $(\bar{F}(\tau),\ x(\tau))$ parametrizado com o intervalo $\tau \in [0,\ T^+]$, τ representa a faixa de deslocamento, $x(t)$, entre o deslocamento mínimo, 0, e máximo, T^+, feito pelo amortecedor. Assim, a constante k_x, conforme Aguirre et al. (2010), pode ser determinada da seguinte forma

$$k_x = \frac{\bar{F}(0) + \bar{F}(T^+)}{\dot{x}(0) + \dot{x}(T^+)}. \tag{2}$$

Os termos $\bar{F}(0)$, $\bar{F}(T^+)$, $\dot{x}(0)$ e $\dot{x}(T^+)$ correspondem à força e velocidade de amortecimento quando o amortecedor atinge o deslocamento mínimo de $x(0)$ e máximo de $x(T^+)$, respectivamente.

Na prática, o sinal de entrada será escolhido para evitar uma divisão por zero em (2). Após calculado k_x, a quantidade $k_w\bar{w}(\tau)$, nomeada de função auxiliar $\theta(\tau)$, conforme Aguirre et al. (2010), pode ser calculada a partir de

$$k_w\bar{w}(\tau) = \theta(\tau) = F(\tau) - k_x\dot{x}(\tau). \tag{3}$$

O parâmetro a, conforme Aguirre et al. (2010), é determinado como:

$$a = \left[\frac{d\theta(x)}{dx}\right]_{x=x_*}, \tag{4}$$

no qual x_* satisfaz a relação $\theta(x_*) = 0$.

conforme Aguirre et al. (2010), é considerado um valor da forma $x_{*1} > x_*$ e, em seguida, o parâmetro ρ pode ser determinado a partir de

$$\rho = \frac{a - \left[\frac{d\theta(x)}{dx}\right]_{x=x_{*1}}}{\theta(x_{*1})}. \tag{5}$$

O parâmetro k_w, conforme Aguirre et al. (2010), é definido da seguinte forma:

$$k_w = \frac{a}{\rho}. \tag{6}$$

3.3 Alteração na metodologia de identificação

De acordo com Aguirre et al. (2010), o parâmetro k_x em (2) pode apresentar um erro notável se o atrito viscoso for muito menor que o atrito seco. Nesta situação, os autores Aguirre et al. (2010) sugerem um método alternativo para determinar este parâmetro.

Conforme Aguirre et al. (2010), para deslocamentos suficientemente grandes, o ciclo de histerese forma uma região linear nomeada de plástica i.e; $\bar{w}(\tau) \simeq 1$. Portanto, a expressão em (1) pode ser escrita da forma

$$F(t) = k_x[v(t)]\dot{x}(t) + k_w[v(t)]. \tag{7}$$

Essa equação é aproximadamente linear com respeito a $\dot{x}(t)$, para tensão constante, de modo que os parâmetros k_x e k_w podem ser determinados por uma regressão linear

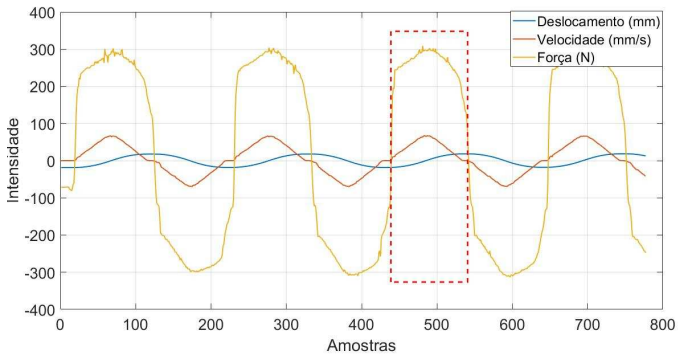

Figura 6. Ciclos do comportamento do amortecedor MR.

para cada tensão constante (procedimento que difere de (2) e (6)). Conforme Aguirre et al. (2010), o parâmetro ρ permanece inalterado, calculado através de (6), ou seja,

$$\rho = \frac{a}{k_w}. \tag{8}$$

Além disso, conforme Aguirre et al. (2010), os coeficientes k_x e k_w podem depender da tensão seguindo o formato

$$k_x(v(t)) = k_{xa} + k_{xb}v(t), \tag{9}$$

e

$$k_w(v(t)) = k_{wa} + k_{wb}v(t). \tag{10}$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, mostramos dados experimentais e a aplicação da metodologia de identificação dos parâmetros do modelo de Dahl.

4.1 Idenficação do modelo de histerese de Dahl

Inicialmente, o atuador promoveu deslocamentos periódicos da haste do amortecedor MR, com amplitude máxima de deslocamento de 35.89 mm e frequência 0.481 Hz, com aquisição de amostras a cada 0.01 segundos (Figura 6).

Comentário. O líquido magneto-reológico dentro do amortecedor MR permeneceu "desligado" neste experimento, ou seja, o amortecedor MR não teve tensão elétrica aplicada em seus terminais.

A metodologia de identificação indica que para a geração da curva de histerese deve ser escolhido o momento em que o amortecedor é comprimido (ciclo de carregamento). O ciclo escolhido aqui se iniciou no instante 4.4 segundos e terminou em 5.4 segundos, compreendendo o tempo que ocorreu a amostra 440 até a amostra 540, vide região pontilhada em Figura 6, que mostra a intensidade da força, velocidade e deslocamento gerados experimentamente pelo amortecedor MR.

O próximo passo, de acordo com a metodologia, deve ser gerar o gráfico da força versus velocidade. Tal gráfico deve apresentar a curva de histerese. A Figura 7 mostra o gráfico, enfatizando somente a região de interesse: seguindo a metodologia apresentada na seção 4.1, dois pontos são escolhidos na região plástica, veja os pontos "1" e "2" na Figura 7. Este ponto "1" nos permite escrever a equação (7) da seguinte forma

$$238.5 = 14.5\ k_x + k_w. \tag{11}$$

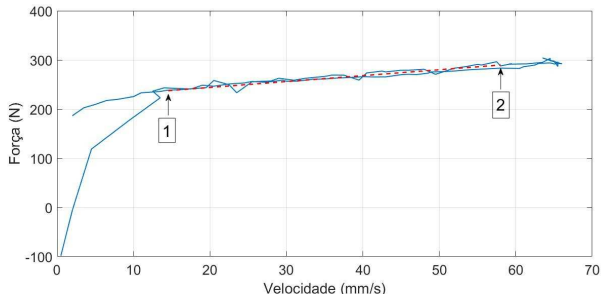

Figura 7. Curva de histerese do ciclo selecionado.

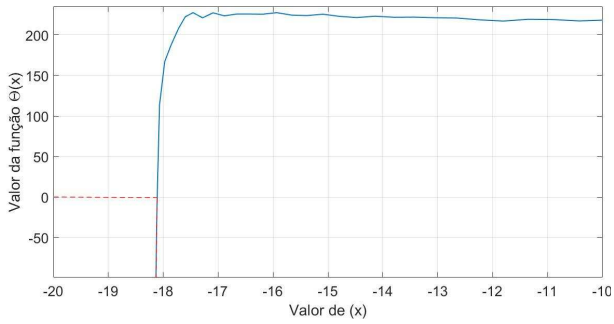

Figura 8. Gráfico da função $\theta(x)$.

De modo análogo em relação ao ponto "2",

$$287.5 = 58\ k_x + k_w. \tag{12}$$

Usando (11) e (12), obtemos $k_w = 222,166\ N.s.mm^{-1}$ e $k_x = 1,12643\ N$

Para o cálculo do parâmetro ρ, primeiramente precisamos gerar a função $\theta(x)$ e depois obter o valor x_* que satisfaz $\theta(x_*) = 0$, vide (3). Conforme apontado na Figura 8, o valor desejado é $x_* = -18.1094\ mm$.

De (4), obtemos $a = 4407.86\ Nmm^{-1}$, e de (6) obtemos $\rho = 19.84\ mm^{-1}$.

Em resumo, esta seção mostrou como obter os parâmetros do modelo de Dahl quando o dispositivo foi excitado sob deslocamento de 35.89 mm e frequência 0.481 Hz. Na próxima seção, mostraremos os parâmetros do modelo de Dahl para distintos deslocamentos e frequências.

4.2 Idenficação do modelo de Dahl: experimentos adicionais

Na Seção 4.1, apresentamos o procedimento completo de identificação do modelo de Dahl para o amortecedor MR quando excitado sob determinado deslocamento e frequência.

Agora, apresentamos dados adicionais. Na Tabela 1 são apresentados os coeficientes obtidos aplicando tensão nula ao amortecedor MR quando estimulado com diferentes freqüências e deslocamentos. Observou-se experimentalmente que os coeficientes k_{xa}, k_{wa} e ρ são distintos para cada par de frequência e deslocamento. A Figura 9 apresenta a resposta experimental do modelo de amortecedor MR com tensão nula.

Para validar os coeficientes obtidos experimentalmente, estes são inseridos no modelo de Dahl, devidamente programado em MATLAB-Simulink. O modelo é animado

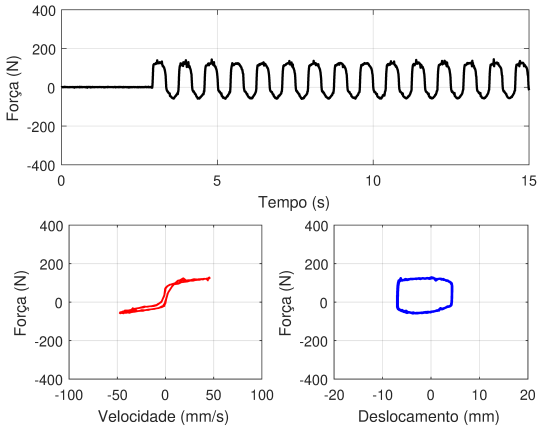

Figura 9. Dados experimentais: amortecedor MR sob tensão nula.

Tabela 1. Resultados com tensão zero.

Desl. (mm)	**Freq.** (Hz)	k_x $(N.s.mm^{-1})$	k_w (N)	ρ (mm^{-1})
24.75	0.8403	0.7682	57.4210	27.4527
22.81	0.8696	0.6835	59.4608	30.5753
21.72	0.8932	0.7144	56.5586	34.1413
19.96	0.9434	0.7040	53.4880	39.2073
18.26	0.9709	0.8836	48.8004	66.0383
16.63	1.0100	0.7409	49.1823	44.0407
15.16	1.0530	0.7716	50.2659	40.0764
13.65	1.0990	0.9868	38.0126	57.5001
12.28	1.1490	0.8451	46.1595	45.6716
11.24	1.2200	0.9223	43.0192	40.6709

Tabela 2. Coeficientes calculados.

Parâmetros	**Média**	**Desv. Pad.**
k_{xa} $(N.s.mm^{-1})$	0.8020	0.1023
k_{wa} (N)	50.2368	6.7375
ρ (mm^{-1})	42.7448	17.9213

com a mesma entrada usada nos testes experimentais. A força gerada pelo modelo foi comparada à força capturada nos experimentos e o erro foi calculado usando a norma L^1

$$\varepsilon = \frac{\|F_e - F\|_1}{\|F_e\|_1}, \tag{13}$$

no qual, F_e é a força experimental e F é a força simulada. A simulação foi feita usando os parâmetros da Tabela 4, que por sua vez gerou erro médio de 14.8%.

4.3 Dados experimentais: Amortecedor MR com tensão $0.88\,V$

Neste cenário, o amortecedor MR foi avaliado sob tensão 0.88V em seus terminais. Para esta tensão, o amortecedor teve consumo aproximado de 0.2A. Tabela 3 mostra os coeficientes obtidos neste cenário.

Na Figura 10, é mostrado o comportamento do amortecedor MR com tensão 0.88V. Observe na Figura 10 que a força exercida pelo amortecedor MR sob tensão 0.88V foi maior que a força exercida sob tensão nula (Figura 9).

De modo a calcular o erro em (13), será adotado um procedimento ligeiramente diferente. Juntamos os dados da média descritos nas Tabela 2 e 4 para gerar

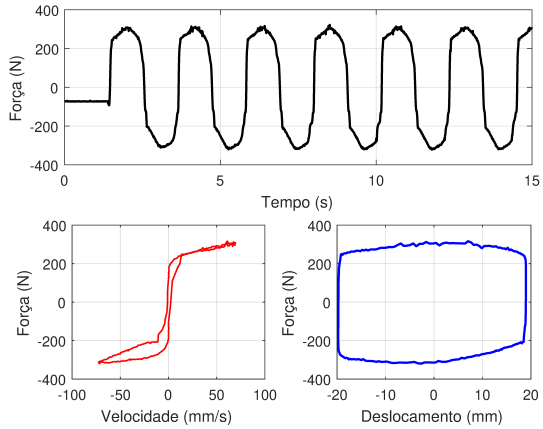

Figura 10. Dados experimentais: amortecedor MR sob tensão 0.88V.

Tabela 3. Resultados com tensão 0.88V.

Desl. (mm)	**Freq.** (Hz)	k_x $(N.s.mm^{-1})$	k_w (N)	ρ (mm^{-1})
38.77	0.4629	1.0640	236.6360	19.4264
35.89	0.4808	1.2243	219.6317	20.0219
32.86	0.4926	1.2442	224.2597	19.1666
26.90	0.5525	1.5333	200.2333	18.9063
29.77	0.5236	1.2591	210.3341	20.8018
19.71	0.6250	0.8947	225.6158	19.5472
24.68	0.5682	1.4875	197.9437	22.2421
22.10	0.5988	1.3647	203.5118	19.5472
17.57	0.6667	1.4000	193.9000	22.6884
22.41	0.8474	1.6689	184.5655	21.9603

Tabela 4. Coeficientes calculados.

Parâmetros	**Média**	**Desv. Pad.**
k_{xb} $(N.s.mm^{-1})$	0.5877	0.2281
k_{wb} (N)	182.9962	16.4566
ρ (mm^{-1})	31.5878	14.1850

$$k_x(v) = 0.8020 + 0.58774\, v(t),$$
$$k_w(v) = 50.2368 + 182.9962\, v(t).$$

Note que k_x e k_w representam uma aproximação, incapaz de representar os desvios-padrão observados nos experimentos. Adotamos $\rho = 31.5878\ mm^{-1}$ (Tabela (4)).

O erro em (13) foi novamente calculado: usamos a força simulada via modelo de Dahl e a força obtida experimentalmente. O valor obtido de erro é de 23.64%. Tal valor encontra-se próximo ao valor de 22% obtido pelos autores em Aguirre et al. (2010). Os autores em Aguirre et al. (2010) afirmam que erro próximo a 22% é satisfatório para aplicações de controle.

Figura 11 ilustra a semelhança entre a força obtida experimentalmente e a força calculada pelo modelo de Dahl, sob uma tensão de 0.88V, com frequência de oscilação de 0.847Hz, que resultou em um deslocamento de amplitude máximo 23.5mm.

Figura 12 demonstra a semelhança entre a curva de histerese obtida experimentalmente e a curva de histerese calculada pelo modelo de Dahl.

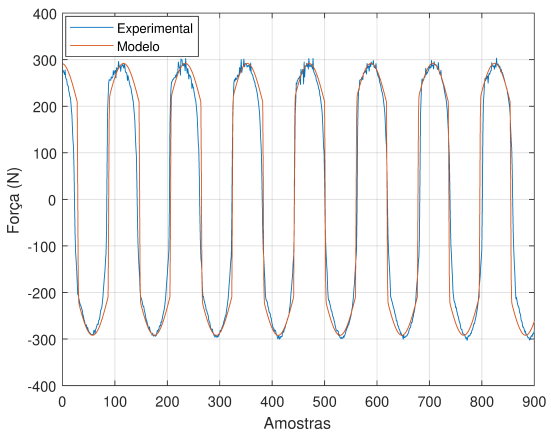

Figura 11. Força experimental e a força gerada pelo modelo de Dahl quando amortecedor MR sob tensão 0.88V.

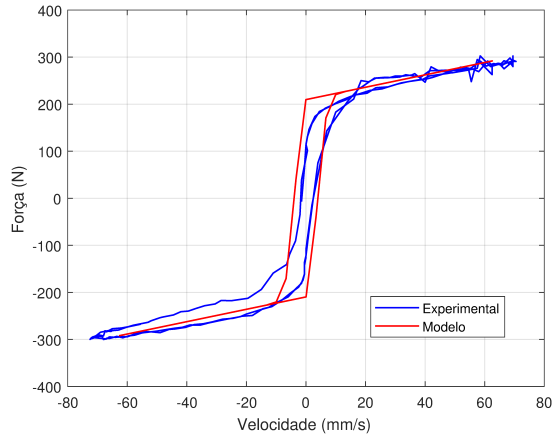

Figura 12. Curvas de histerese. Dado experimental para amortecedor MR sob tensão 0.88V e dado de simulação correspondente gerado pelo modelo de Dahl.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou identificação de um modelo de histerese para uma plataforma mecatrônica. Tal plataforma tem como elemento principal um amortecedor magneto-reológico.

A plataforma permitiu mensurar a força sob diferentes deslocamentos e frequências. Isto permitiu um cálculo aproximado dos parâmetros k_x, k_w e ρ, parâmetros que definem o modelo Dahl.

O trabalho tem forte viés tecnológico. O dispositivo experimental possibilita estudar o comportamento de amortecedor magneto-reológico, visando futuras aplicações de controle.

REFERÊNCIAS

Aguirre, N., Ikhouane, F., Rodellar, J., and Christenson, R. (2012). Parametric identification of the Dahl model for large scale MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 23, 742–760.

Aguirre, N., Ikhouane, F., Rodellar, J., Wagg, D., and Neild, S. (2010). Modeling and identification of a small scale magnetorheological damper. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(10), 19–24.

Carlson, J.D. and Jolly, M.R. (2000). MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*, 10, 555–569.

Dutta, S. and Choi, S.B. (2018). Control of a shimmy vibration in vehicle steering system using a magnetorheological damper. *Journal of Vibration and Control*, 24, 797–807.

Ge, P. and Jouaneh, M. (1995). Modeling hysteresis in piezoceramic actuators. *Precision Engineering*, 17(3), 211–221.

Haines et al, . (2007). *Systems with Hysteresis*, volume 53. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Hassani, V., Tjahjowidodo, T., and Do, T.N. (2014). A survey on hysteresis modeling, identification and control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49(1-2), 209–233.

Ikhouane, F., Mañosa, V., and Pujol, G. (2020). Minor loops of the Dahl and LuGre models. *Applied Mathematical Modelling*, 77, 1679–1690.

Inman, D.J. and Carneiro, S.H.S. (2020). *7. Smart Structures, Structural Health Monitoring and Crack Detection*, 169–186. doi:10.1137/1.9780898717525.ch7.

Ismail, M., Ikhouane, F., and Rodellar, J. (2009). The hysteresis Bouc-Wen model, a survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 16(2), 161–188.

Jolly, M.R., Bender, J.W., and Carlson, J.D. (2012). Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 23, 57–61.

Lima, A.S.D. (2011). *Identificação experimental de um sistema magneto-reológico*. Ph.D. thesis, COPPE-UFRJ.

Luong, V., Jang, D.S., and Hwang, J.H. (2020). Robust adaptive control for an aircraft landing gear equipped with a magnetorheological damper. *Applied Sciences*, 10, 1–16.

Meng, F., Zhou, J., Jin, C., and Ji, W. (2019). Modeling and experimental verification of a squeeze mode magnetorheological damper using a novel hysteresis model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233.

Noël, J.P., Esfahani, A.F., Kerschen, G., and Schoukens, J. (2016). Hysteresis identification using nonlinear state-space models. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 1, 323–338.

Sarno, R.L. and Franke, M.E. (1994). Suppression of flow-induced pressure oscillations in cavities. *Journal of Aircraft*, 31(1), 90–96.

Sassi, S., Cherif, K., Mezghani, L., Thomas, M., and Kotrane, A. (2005). An innovative magnetorheological damper for automotive suspension: from design to experimental characterization. *Smart Materials and Structures*, 14(4), 811–822.

Spencer, J.B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D.f. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *J. Engineering Mechanics*, 123(3), 230–238.

Stutz, L.T. (2005). *Síntese e Análise de uma Suspensão Semi-ativa Magneto Reológica Baseada na Abordagem de Controle com Estrutura Variável*. Ph.D. thesis, COPPE-UFRJ.

Vicente, J., Klingenberg, D.J., and Hidalgo-Alvarez, R. (2011). Magnetorheological fluids: A review. *Soft Matter*, 7(8), 3701–3710.

Yang, G., Spencer, B., Carlson, J., and Sain, M. (2002). Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations. *Eng. Struct.*, 24, 309–323.

Yarali, E., Mohammadi, A., Mafakheri, S., Baghani, M., and Adibi, H. (2019). Mathematical modeling and experimental evaluation of a prototype double-tube magnetorheological damper. *SN Applied Sciences*, 1.

Zamani, A.A., Tavakoli, S., Etedali, S., and Sadeghi, J. (2019). Modeling of a magneto-rheological damper: An improved multi-state-dependent parameter estimation approach. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30.