



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"



FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE PROJETO MECÂNICO

FRANSBER SANTADE

**ANÁLISE DINÂMICA DE AMORTECEDORES NÃO  
LINEARES ASSIMÉTRICOS, COM HISTERESE E SUJEITOS  
A FOLGA E AVALIAÇÃO DO EFEITO TEMPERATURA**

Bauru, SP

2017

FRANSBER SANTADE

**ANÁLISE DINÂMICA DE AMORTECEDORES NÃO  
LINEARES ASSIMÉTRICOS, COM HISTERESE E SUJEITOS  
A FOLGA E AVALIAÇÃO DO EFEITO TEMPERATURA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru,  
programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na  
Área de Projeto Mecânico, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Edson Antônio Capello Sousa

Bauru, SP

2017

Santade, Fransber.

Análise dinâmica de amortecedores não lineares assimétricos, com histerese e sujeitos a folga e avaliação do efeito temperatura / Fransber Santade, 2017

183 f. : il.

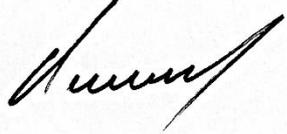
Orientador: Paulo José Paupitz Gonçalves  
Coorientador: Edson Antônio Capello Sousa

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Amortecedores. 2. Não linearidades. 3. Assimetria. 4. Histerese. 5. Folga. 6. Análise de temperatura. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

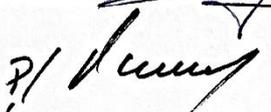
**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE FRANSBER SANTADE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 28 dias do mês de julho do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação/ videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO JOSÉ PAUPITZ GONÇALVES - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA do(a) Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã, Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Prof. Dr. LAERCIO JAVAREZ JUNIOR do(a) Departamento de Engenharias / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPr Ponta Grossa, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de FRANSBER SANTADE, intitulada **ANÁLISE DINÂMICA DE AMORTECEDORES NÃO LINEARES, ASSIMÉTRICOS, COM HISTERESE E SUJEITOS A FOLGA E AVALIAÇÃO DO EFEITO TEMPERATURA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprova do. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO JOSÉ PAUPITZ GONÇALVES 

Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA 

Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA 

Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO 

Prof. Dr. LAERCIO JAVAREZ JUNIOR 

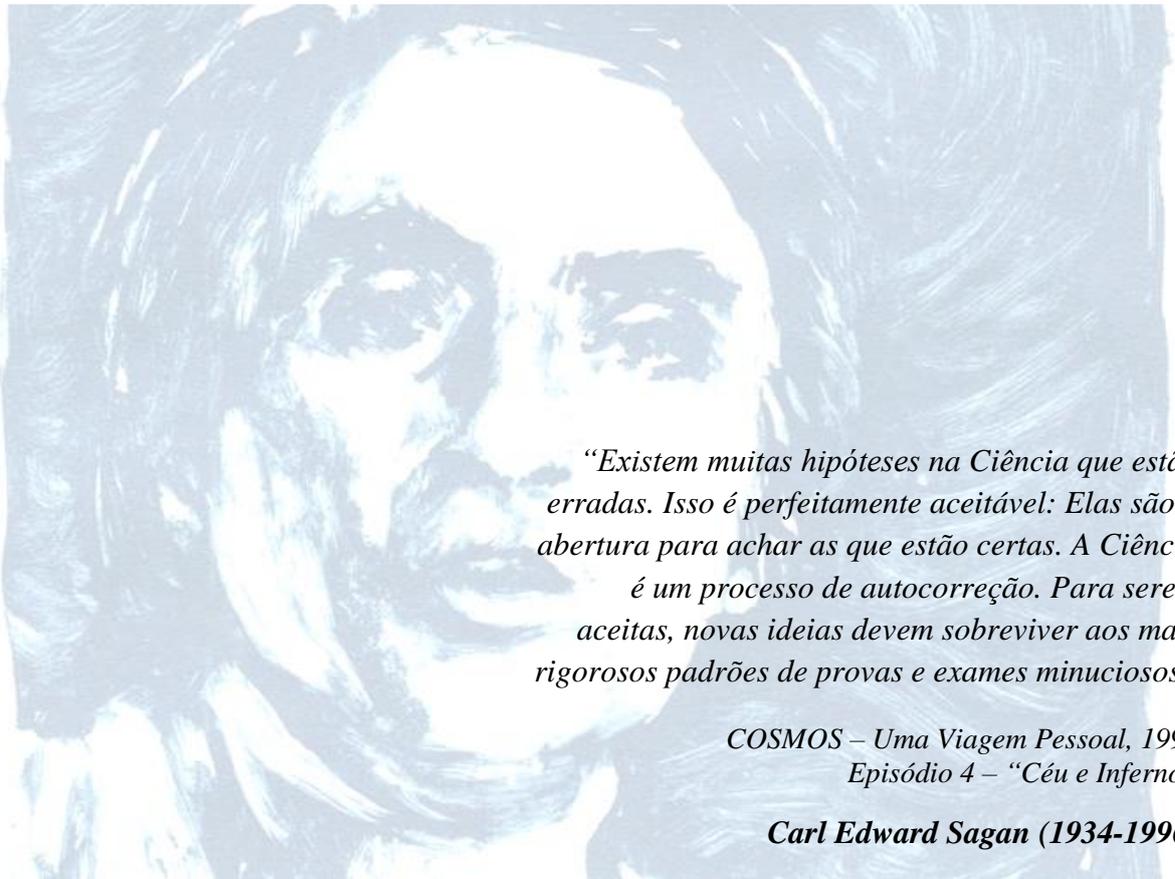
*Dedico esta tese a meus pais, Francisco O. do A. Santade e Juvenil B. Santade, e namorada, Patrícia M. M. Nalin, pelo incentivo, apoio e compreensão na busca do saber.*

*Após quatro anos de aprendizado, muitos são aqueles aos quais tenho a agradecer. De modo sinóptico:*

- Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, capacidade para vencer barreiras e alcançar objetivos;*
- Agradeço ao meu orientador, ilmo. prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, pela imensa confiança depositada em minha pessoa e pela grande oportunidade de trabalhar junto a si, compartilhando de vossos vastos conhecimentos e experiências, ao longo do caminho do “orientar”. Deveras grande pessoa, grande profissional, grande professor e grande orientador;*
- Agradeço à minha família, em especial a meus pais e irmãs, M.Sc. Silmara S. Masiero e M.Sc. Susimara Santade pelo apoio incondicional em todas as horas;*
- Agradeço aos ilmos. prof. Dr. Marcos Silveira e Dr. Bento Rodrigues de Pontes Júnior, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, pelas valiosas e esclarecedoras aulas dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FEB de Bauru, bem como as valiosas sugestões apresentadas na qualificação desta tese. Grande honra em poder dizer que os tive como catedráticos;*
- Agradeço à empresa EMBRAER, representada pelos ilmos. Dr. Breno M. Castro e M.Sc. Wellington L. P. Júnior pela grande parceria firmada com a UNESP-FEB, apoio financeiro e oportunidade de desenvolver pesquisa junto a eles. Grande empresa, grandes pessoas e grandes profissionais;*
- Agradeço ao ilmo. prof. Dr. Douglas D. Bueno, do Departamento de Matemática da UNESP de Ilha Solteira, inicialmente pertencente à EMBRAER, pela oportunidade de desenvolver pesquisa junto a ele. Igualmente grande pessoa e grande profissional;*
- Agradeço a profa. Dra. Núbia S. Saad, do Laboratório de Mecânica e Estruturas da UFU de Uberlândia, e aos Técnicos Mecânicos Jonas P. Borges e Reinaldo*

*T. Paulino, também da UFU, pela colaboração na realização dos ensaios experimentais. Prestatividade e colaboração sem as quais a parte experimental desta tese não teria sido desenvolvida;*

- *Agradeço ao amigo doutorando M.Sc. Eduardo A. Petrocínio, da UNESP de Bauru, pelo auxílio na execução e montagem do cabeamento da fonte do amortecedor MR. Grande pessoa, profissional “à moda antiga” e grande amigo;*
- *Agradeço aos amigos doutorandos M.Sc. Silvia M. Nasser, M.Sc. Andréia Archangelo e M.Sc. José A. Massabki, da UNESP de Bauru, e ao M.Sc. Hanilton M. Nasser, da UTFPR de Cornélio Procopio, pelos conhecimentos e experiências discutidas e compartilhadas ao longo de nossas jornadas como docentes da Etec Jacinto Ferreira de Sá de Ourinhos; Discussões sempre com grande embasamento e diversidade de pontos de vista; Grandes pessoas, grandes profissionais “à moda antiga” e amigos para todas as horas;*
- *Agradeço ao amigo e Técnico Mecânico Marcos A. Roque, da Etec Jacinto Ferreira de Sá de Ourinhos, pelo auxílio na confecção dos suportes de fixação dos amortecedores AP, AH e MR e também na desmontagem do amortecedor AH. Grande pessoa, grande profissional e grande amigo;*
- *Agradeço aos colegas doutorandos da FEB - Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica – Área de Projetos Mecânicos, que caminharam junto à minha jornada, cada um a seu horizonte: M.Sc. Lucas de H. Silva, M.Sc. Willian M. Kuhnert, M.Sc. Júlio C. de M. Fernandes, M.Sc. Fernando de H. Moraes pelos muitos conhecimentos discutidos e compartilhados durante os dias e madrugadas de aulas e estudo e a todos os demais pelo apoio e troca de experiências;*
- *Agradeço aos ilmos. Doutores membros da banca pelas importantes contribuições a este simplório trabalho.*



*“Existem muitas hipóteses na Ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável: Elas são a abertura para achar as que estão certas. A Ciência é um processo de autocorreção. Para serem aceitas, novas ideias devem sobreviver aos mais rigorosos padrões de provas e exames minuciosos”*

*COSMOS – Uma Viagem Pessoal, 1990  
Episódio 4 – “Céu e Inferno”*

***Carl Edward Sagan (1934-1996)***

Fonte: <http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2015/03/12-reflexoes-que-vaao-te-introduzir-ao-pensamento-de-carl-sagan.html>

## **Análise Dinâmica de Amortecedores Não Lineares Assimétricos, com Histerese e Sujeitos a Folga e Avaliação do Efeito Temperatura**

O objetivo principal desta tese é a análise de amortecedores não lineares, incluindo os efeitos da folga, assimetria e histerese. A tese também apresenta um estudo sobre a influência da temperatura sobre esses efeitos. O estudo baseia-se em testes experimentais realizados em três diferentes amortecedores, incluindo um de atrito seco, um hidráulico e um do tipo magnetoreológico. Esses amortecedores foram testados em uma máquina de teste universal utilizando excitação cíclica para diferentes condições de amplitude, frequência e corrente elétrica no caso do amortecedor magnetoreológico. Três modelos paramétricos foram utilizados para representar as forças de amortecimento que foram medidas durante os ensaios experimentais, onde os parâmetros que definem esses modelos foram ajustados utilizando um algoritmo de otimização. A tese propõe uma contribuição para o campo de engenharia ao representar fenômenos não lineares típicos de amortecedores através de testes experimentais e descrevendo uma metodologia para representar as forças de amortecimento não linear e os efeitos da temperatura nestes modelos.

**Palavras-Chaves:** Amortecedores. Não linearidades. Assimetria. Histerese. Folga. Análise de temperatura.

# **Dynamic Analysis of Nonlinear Asymmetrical Dampers with Hysteresis and Subject to Clearance and Temperature Effect Evaluation**

The main objective of this thesis is the analysis of nonlinear dampers including the effects of clearance, asymmetry and hysteresis. The thesis also presents a study on the temperature influence over these effects. The study is based on experimental tests performed on three different damping devices (dashpots), including a dry friction, a hydraulic and a magnetorheological dashpots. These dampers were tested on an universal testing machine using cyclic excitation for different conditions of amplitude, frequency and current in the case of the magnetorheological damper. Three parametric models have been used to represent the damping forces that were measured during the experimental tests, where the parameters defining these models were adjusted using an optimization algorithm. The thesis proposes a contribution to the engineering field by representing typical nonlinear phenomena of dampers through experimental tests and describing a methodology to represent the nonlinear damping forces and the effects of temperature on these models.

**Keywords:** Dampers. Nonlinearities. Asymmetry. Hysteresis. Clearance. Temperature analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – EXEMPLOS DE OCORRÊNCIA DE FOLGA EM AMORTECEDORES DIANTEIROS DE AUTOMÓVEIS EM SUSPENSÕES TIPO McPHERSON: A) FIXAÇÃO NOS BATENTES E COXINS E B) FIXAÇÃO NO BATENTE E COXIM E FIXAÇÃO NO PORTA-CUBO DA RODA.....                      | 1  |
| FIGURA 2 – EXEMPLO DE POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE FOLGA EM AMORTECEDORES EM MOTOCICLETAS: FIXAÇÃO DO CONJUNTO PARAFUSO-PORCA DA SUSPENSÃO TRASEIRA.....  | 2  |
| FIGURA 3 – MODELO DE AMORTECIMENTO VISCOZO: A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AMORTECEDOR; B) COMPORTAMENTO DINÂMICO E C) HISTÓRICOS DE DESLOCAMENTO E FORÇA NO TEMPO. ....   | 16 |
| FIGURA 4 – MODELO DE AMORTECIMENTO VISCOZO PARA ATUADOR DESCRITO POR RAO (1990). ....   | 17 |
| FIGURA 5 – MODELO DE AMORTECIMENTO DE COULOMB: A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AMORTECEDOR; B) COMPORTAMENTO DINÂMICO E C) HISTÓRICOS DE DESLOCAMENTO E FORÇA NO TEMPO. ....  | 18 |
| FIGURA 6 – MODELO DE AMORTECIMENTO QUADRÁTICO: A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AMORTECEDOR; B) COMPORTAMENTO DINÂMICO E C) HISTÓRICOS DE DESLOCAMENTO E FORÇA NO TEMPO. ....  | 20 |
| FIGURA 7 – MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE: COMPORTAMENTOS PARA DIVERSOS VALORES DE ÍNDICES DE POTÊNCIA N: A) FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO; B) FORÇA EM FUNÇÃO DO TEMPO E C) FORÇA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE. .... | 21 |
| FIGURA 8 – MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE: A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AMORTECEDOR; B) COMPORTAMENTO DINÂMICO E C) HISTÓRICOS DE DESLOCAMENTO E FORÇA NO TEMPO. ....   | 22 |
| FIGURA 9 – EXEMPLO DE CICLO DE FORÇA POR VELOCIDADE DE UM ELEMENTO AMORTECEDOR: A) COMPORTAMENTO NÃO-HISTERÉTICO E B) COMPORTAMENTO HISTERÉTICO. ....   | 23 |
| FIGURA 10 – MODELO DE AMORTECIMENTO HISTERÉTICO: A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AMORTECEDOR; B) COMPORTAMENTO DINÂMICO E C) HISTÓRICOS DE DESLOCAMENTO E FORÇA NO TEMPO. ....  | 24 |
| FIGURA 11 – EXEMPLO DE RESPOSTA DE VELOCIDADE POR TEMPO COM OCORRÊNCIA DO EFEITO STRIBECK NO MODELO DE AMORTECIMENTO DE COULOMB.....  | 25 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO GLOBAL DOS EFEITOS DA FORÇA DE ATRITO PELA VELOCIDADE:<br>A) MODELO VISCOZO; B) MODELO DE COULOMB; C) MODELO DE ATRITO STRIBECK; D)<br>MODELO COMBINADO DE COULOMB MAIS AMORTECIMENTO VISCOZO E EFEITO STRIBECK.<br>.....  | 26 |
| FIGURA 13 – MODELO DE BINGHAM: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....   | 29 |
| FIGURA 14 – MODELO DE CORPO DE BINGHAM: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....  | 30 |
| FIGURA 15 – MODELO MODIFICADO DE BINGHAM: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....  | 31 |
| FIGURA 16 – MODELO DE TRÊS ELEMENTOS: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....  | 31 |
| FIGURA 17 – MODELO DE BINGMAX: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....   | 32 |
| FIGURA 18 – MODELO VISCOELÁSTICO-PLÁSTICO NÃO LINEAR: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM<br>AMR. A) MECANISMO VISCOELÁSTICO; B) MECANISMO VISCOZO. ....   | 33 |
| FIGURA 19 – MODELO VISCOELÁSTICO-PLÁSTICO NÃO LINEAR ESTENDIDO: ESTRUTURA<br>REOLÓGICA DE UM AMR. A) MECANISMO VISCOELÁSTICO COM ATRITO DE COULOMB<br>PONDERADO POR UMA FUNÇÃO DE FORMA; B) MECANISMO INERCIAL. ....   | 34 |
| FIGURA 20 – MODELO DE BOUC-WEN: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....  | 36 |
| FIGURA 21 – MODELO MODIFICADO DE BOUC-WEN: ESTRUTURA REOLÓGICA DE UM AMR. ....   | 38 |
| FIGURA 22 – CARACTERÍSTICA DA FORÇA DE AMORTECIMENTO SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO PARA<br>A EXTENSÃO E COMPRESSÃO DE UM AMORTECEDOR TÍPICO. ....  | 40 |
| FIGURA 23 – MODELO DE AMORTECIMENTO COM ASSIMETRIA BILINEAR: A) FORÇA POR TEMPO;<br>B) FORÇA POR VELOCIDADE E C) FORÇA POR DESLOCAMENTO. ....  | 40 |
| FIGURA 24 – MODELO BÁSICO DE FOLGA DE FIXAÇÃO NO AMORTECIMENTO. ....   | 41 |
| FIGURA 25 – EXEMPLO DE CICLO DE FORÇA POR DESLOCAMENTO DE UM ELEMENTO<br>AMORTECEDOR COM FOLGA DE FIXAÇÃO: A) PONTO DE INÍCIO (FOLGA TOTAL A<br>PERCORRER); B) PRIMEIRO ESTADO (FOLGA SENDO PERCORRIDA); C) SEGUNDO ESTADO<br>(FOLGA TODA PERCORRIDA E INÍCIO DO CONTATO E DA AÇÃO DE FORÇA) E<br>POSTERIORMENTE TERCEIRO ESTADO; D) PONTO DE REVERSÃO (FOLGA TOTAL A<br>PERCORRER); E) QUARTO ESTADO (FOLGA SENDO PERCORRIDA) E F) QUINTO ESTADO<br>(FOLGA TODA PERCORRIDA E INÍCIO DO CONTATO E DA AÇÃO DE FORÇA) E<br>POSTERIORMENTE SEXTO ESTADO. .... | 42 |
| FIGURA 26 – CARACTERÍSTICA NÃO LINEAR DO MODELO BÁSICO DE UM ELEMENTO TIPO<br>AMORTECEDOR COM FOLGA DE FIXAÇÃO. ....   | 43 |
| FIGURA 27 – CARACTERÍSTICA NÃO LINEAR DE UM ELEMENTO TIPO AMORTECEDOR COM FOLGA<br>DE FIXAÇÃO PELO MODELO EM DESENVOLVIMENTO DE CASTRO ET AL. ....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO GENERALIZADA DE ASSIMETRIAS E HISTERESE NO DIAGRAMA FORÇA-VELOCIDADE PELO MODELO DE WANG ET AL. (2004). .....  | 47 |
| FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO GENERALIZADA DE ASSIMETRIA EM FORÇA E FOLGA DE FIXAÇÃO NO DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO.....   | 49 |
| FIGURA 30 – AMORTECEDORES UTILIZADOS: A) AMORTECEDOR AP (LU JIN MOD. LJ400AX); B) AMORTECEDOR AH (SCUD MOD. 10010006) E C) AMORTECEDOR MR (©LORD MOD. RD-8040-1 CURSO CURTO). .....  | 51 |
| FIGURA 31 – A) AMORTECEDOR AP: FABRICANTE LU JIN MOD. LJ400AX; B) APLICAÇÃO ORIGINAL DO AMORTECEDOR AP: BICICLETAS DO TIPO <i>MOUNTAIN BIKE</i> . .....  | 52 |
| FIGURA 32 – A) AMORTECEDOR AH: FABRICANTE SCUD MOD. 10010006; B) APLICAÇÃO ORIGINAL DO AMORTECEDOR AH: MOTOCICLETAS FABRICANTE ©HONDA MODELOS TITAN/FAN FABRICADAS ENTRE OS ANOS DE 2000 A 2009. ....  | 52 |
| FIGURA 33 – A) AMORTECEDOR MR: FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO CURTO); B) EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO AMORTECEDOR MR: APLICAÇÕES DIVERSAS AUTOMOTIVAS, INCLUINDO EM SUSPENSÃO DE VEÍCULOS MILITARES.....  | 53 |
| FIGURA 34 – SUPORTES DE FIXAÇÃO PARA OS AMORTECEDORES UTILIZADOS: A) PARA O AMORTECEDOR AP; B) PARA O AMORTECEDOR AH E C) PARA O AMORTECEDOR MR.....   | 54 |
| FIGURA 35 – ESQUEMA DE REGULAGEM DE FOLGA NOS SUPORTES SUPERIORES. ....  | 55 |
| FIGURA 36 - POSIÇÕES DE REFERÊNCIA DE FIXAÇÃO DOS TERMOPARES AOS AMORTECEDORES. MEDIDAS EM [MM]. .....   | 56 |
| FIGURA 37 – EXEMPLO DE MONTAGEM EXPERIMENTAL REALIZADO: ENSAIO E62 (AMORTECEDOR MR). .....   | 58 |
| FIGURA 38 – A) MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647 HYDRAULIC WEDGE GRIP #661.20H-03 BY 79, COM TRANSDUTOR DE FORÇA MTS MOD. 661.20H-03 SN 379538 CAP. 100kN; B) MICROCOMPUTADOR COM SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS MTS FLEXTTEST® 40 INSTALADO E OPERACIONAL E C) MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS SWITCH PARA TEMPERATURA AGILENT MOD. 34970A ..... | 58 |
| FIGURA 39 – MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA O AMORTECEDOR AP.....   | 59 |
| FIGURA 40 – MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA O AMORTECEDOR AH. ....  | 59 |
| FIGURA 41 – MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA O AMORTECEDOR MR.....   | 59 |
| FIGURA 42 – EXEMPLO DE ARQUIVO .DAT GERADO EXPERIMENTALMENTE: A PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA TEMPO, A SEGUNDA REPRESENTA DESLOCAMENTO E A TERCEIRA REPRESENTA FORÇA. ....  | 60 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 43 – EXEMPLO DE ARQUIVO .CSV GERADO EXPERIMENTALMENTE: A PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA TEMPO, A SEGUNDA REPRESENTA TEMPERATURA DO TERMOPAR 1, A TERCEIRA REPRESENTA TEMPERATURA DO TERMOPAR 2, A QUARTA REPRESENTA TEMPERATURA DO TERMOPAR 3 E A QUINTA REPRESENTA TEMPERATURA DO TERMOPAR 4.....                            | 60 |
| FIGURA 44 – EXEMPLO: RESULTADOS DE MODELAGEM COM OS MODELOS UTILIZADOS; A) CURVAS DE RESPOSTA EXPERIMENTAL, POR MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE E POR MODELO DE WANG ET AL. (2004) E B) CURVAS DE RESPOSTA EXPERIMENTAL E POR NOVO MODELO PROPOSTO DE ASSIMETRIA E FOLGA DE FIXAÇÃO.....                                | 66 |
| FIGURA 45 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PARÂMETROS DO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $C_{N1}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $C_{N2}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $N_{N1}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $N_{N2}$ E E) EVOLUÇÃO DE $ERRO_F$ . .....   | 68 |
| FIGURA 46 – PRIMEIRO RESULTADO (EXEMPLO) PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE FIXAÇÃO, AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO DE $\pm 1$ MM E FREQUÊNCIA 1HZ: A) FORÇA E DESLOCAMENTO, B) FORÇA E TEMPO E C) FORÇA E VELOCIDADE.....  | 70 |
| FIGURA 47 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE.....   | 71 |
| FIGURA 48 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA DE FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 0,35MM): PARÂMETROS DO NOVO MODELO PROPOSTO: A) EVOLUÇÃO DE $C_{N3}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $N_{N3}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $F_{N3}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $F_{DN}$ ; E) EVOLUÇÃO DE $F_{DP}$ E F) EVOLUÇÃO DA DIFERENÇA PERCENTUAL DE ENERGIA (TRABALHO)..... | 73 |
| FIGURA 49 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA DE FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 1,35MM): PARÂMETROS DO NOVO MODELO PROPOSTO: A) EVOLUÇÃO DE $C_{N3}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $N_{N3}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $F_{N3}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $F_{DN}$ ; E) EVOLUÇÃO DE $F_{DP}$ E F) EVOLUÇÃO DA DIFERENÇA PERCENTUAL DE ENERGIA (TRABALHO)..... | 74 |
| FIGURA 50 – PRIMEIRO RESULTADO (EXEMPLO) PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA DE FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 0,35MM), AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 1$ MM E FREQUÊNCIA 1HZ: A) FORÇA E DESLOCAMENTO, B) FORÇA E TEMPO E C) FORÇA E VELOCIDADE. ....   | 77 |
| FIGURA 51 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA (APROXIMADAMENTE 0,35MM): PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE.....   | 78 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 52 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA (APROXIMADAMENTE 1,35MM): PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE.....   | 80 |
| FIGURA 53 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PARÂMETROS DO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $C_{N1}$ E $C_{N2}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $N_{N1}$ E $N_{N2}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $ERRO_F$ E $F_{D_{MAX}}$ . ....  | 81 |
| FIGURA 54 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: EVOLUÇÃO DE $F_{D_{MAX}}$ EM TERMOS DE TEMPO PELO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE.....   | 83 |
| FIGURA 55 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO PARA FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 4$ MM, SEM FOLGA DE FIXAÇÃO PARA OS CICLOS ADOTADOS COMO REFERÊNCIAS DE ANÁLISE 300, 600, 900. 1200, 1500 E 1800: A) RESULTADO EXPERIMENTAL DE FORÇA POR DESLOCAMENTO E B) MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE DE FORÇA POR DESLOCAMENTO; C) RESULTADO EXPERIMENTAL DE FORÇA POR VELOCIDADE E D) MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE DE FORÇA POR VELOCIDADE. .... | 84 |
| FIGURA 56 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA DO CORPO PARA FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 4$ MM, SEM FOLGA DE FIXAÇÃO. A) MEDIÇÃO DE CADA TERMOPAR E B) MÉDIA ARITMÉTICA DOS QUATRO TERMOPARES E TENDÊNCIA LINEAR AJUSTADA. ....   | 85 |
| FIGURA 57 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AP EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO SEM FOLGA: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA DO CORPO PARA FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 4$ MM. CICLOS ADOTADOS COMO REFERÊNCIAS DE ANÁLISE 300, 600, 900. 1200, 1500 E 1800.....   | 86 |
| FIGURA 58 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PARÂMETROS DO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $C_{N1}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $C_{N2}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $N_{N1}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $N_{N2}$ E E) EVOLUÇÃO DE $ERRO_F$ . ....  | 87 |
| FIGURA 59 – PRIMEIRO RESULTADO (EXEMPLO) PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO, AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO DE $\pm 2,5$ MM E FREQUÊNCIA 1HZ: A) FORÇA E DESLOCAMENTO, B) FORÇA E TEMPO E C) FORÇA E VELOCIDADE. ....   | 89 |
| FIGURA 60 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE. ....  | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 61 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA DE FIXAÇÃO<br>(APROXIMADAMENTE 1,1MM): PARÂMETROS DO NOVO MODELO PROPOSTO: A) EVOLUÇÃO<br>DE $C_{N3}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $N_{N3}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $F_{N3}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $F_{DN}$ ; E) EVOLUÇÃO DE<br>$F_{DP}$ E F) EVOLUÇÃO DA DIFERENÇA PERCENTUAL DE ENERGIA (TRABALHO).....   | 92  |
| FIGURA 62 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA DE FIXAÇÃO<br>(APROXIMADAMENTE 2,4MM): PARÂMETROS DO NOVO MODELO PROPOSTO: A) EVOLUÇÃO<br>DE $C_{N3}$ ; B) EVOLUÇÃO DE $N_{N3}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $F_{N3}$ ; D) EVOLUÇÃO DE $F_{DN}$ ; E) EVOLUÇÃO DE<br>$F_{DP}$ E F) EVOLUÇÃO DA DIFERENÇA PERCENTUAL DE ENERGIA (TRABALHO).....   | 93  |
| FIGURA 63 – PRIMEIRO RESULTADO (EXEMPLO) PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 1,1MM): AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 2,5$ MM E<br>FREQUÊNCIA 1HZ. ....   | 96  |
| FIGURA 64 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA (APROXIMADAMENTE<br>1,1MM): PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA<br>POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE.....  | 97  |
| FIGURA 65 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA (APROXIMADAMENTE<br>2,4MM): PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA<br>POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE.....  | 98  |
| FIGURA 66 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PARÂMETROS<br>DO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $C_{N1}$ E $C_{N2}$ ;<br>B) EVOLUÇÃO DE $N_{N1}$ E $N_{N2}$ ; C) EVOLUÇÃO DE $ERRO_F$ E $F_{D_{MAX}}$ . ....  | 101 |
| FIGURA 67 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: EVOLUÇÃO DE<br>$F_{D_{MAX}}$ EM TERMOS DE TEMPO PELO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE.....  | 102 |
| FIGURA 68 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO PARA<br>FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 7,5$ MM, SEM FOLGA DE FIXAÇÃO<br>PARA OS CICLOS ADOTADOS COMO REFERÊNCIAS DE ANÁLISE 300, 600, 900. 1200, 1500 E<br>1740: A) RESULTADO EXPERIMENTAL DE FORÇA POR DESLOCAMENTO; B) MODELO DE N-<br>ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE DE FORÇA POR DESLOCAMENTO; C) RESULTADO<br>EXPERIMENTAL DE FORÇA POR VELOCIDADE E D) MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA<br>VELOCIDADE DE FORÇA POR VELOCIDADE. .... | 103 |
| FIGURA 69 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO:<br>EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA DO CORPO PARA FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE<br>DE DESLOCAMENTO $\pm 7,5$ MM, SEM FOLGA DE FIXAÇÃO. A) MEDIÇÃO DE CADA TERMOPAR E<br>B) MÉDIA ARITMÉTICA DOS QUATRO TERMOPARES E TENDÊNCIA LINEAR AJUSTADA. ....  | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 70 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR AH EM ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO SEM FOLGA: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA DO CORPO PARA FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 7,5$ MM. CICLOS ADOTADOS COMO REFERÊNCIAS DE ANÁLISE 300, 600, 900, 1200, 1500 E 1740.....   | 105 |
| FIGURA 71 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PARÂMETROS DO MODELO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $C_{N1}$ EM FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO; B) EVOLUÇÃO DE $C_{N2}$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; C) EVOLUÇÃO DE $N_{N1}$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; D) EVOLUÇÃO DE $N_{N2}$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO E E) EVOLUÇÃO DE $ERRO_F$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO. ....  | 109 |
| FIGURA 72 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PRINCIPAIS PARÂMETROS DO MODELO DE WANG ET AL. (2004) OBTIDOS. A) EVOLUÇÃO DE $A_3$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; B) EVOLUÇÃO DE $K_0$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; C) EVOLUÇÃO DE $K_{1c}$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; D) EVOLUÇÃO DE $K_{1e}$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; E) EVOLUÇÃO DE $K_2$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO; F) EVOLUÇÃO DE $K_3$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO E G) EVOLUÇÃO DE $K_5$ EM FREQUÊNCIA E DESLOCAMENTO. .... | 112 |
| FIGURA 73 – PRIMEIRO RESULTADO (EXEMPLO) PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO DE $\pm 2,5$ MM E FREQUÊNCIA 1HZ. ....  | 115 |
| FIGURA 74 – RESULTADOS PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO: PRIMEIRA COLUNA REPRESENTA FORÇA POR DESLOCAMENTO, A SEGUNDA FORÇA POR TEMPO E A TERCEIRA FORÇA POR VELOCIDADE. ....  | 116 |
| FIGURA 75 – ASPECTOS BÁSICOS DO MRF: A) SEM EXPOSIÇÃO A CAMPO MAGNÉTICO H; B) COM EXPOSIÇÃO A CAMPO MAGNÉTICO H. ....  | 144 |
| FIGURA 76 – NORMA ISO 3448:1992 PARA ÓLEO LUBRIFICANTES PADRÃO: RELAÇÃO DE ENQUADRAMENTO DE VISCOSIDADE CINEMÁTICA POR TEMPERATURA. ....   | 146 |
| FIGURA 77 – RESPOSTAS DE FORÇA POR VELOCIDADE DO AMORTECEDOR MR ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO CURTO). ....   | 148 |
| FIGURA 78 – AMORTECEDOR AP DESMONTADO. ....  | 149 |
| FIGURA 79 – AMORTECEDOR AH DESMONTADO. ....  | 150 |
| FIGURA 80 – DESIGN BÁSICO DE UM AMR MONOTUBO. ....   | 151 |
| FIGURA 81 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR AP EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE INFERIOR (COM FURO RETO). ....  | 152 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 82 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR AP EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE SUPERIOR (COM FURO OBLONGO). ..... | 153 |
| FIGURA 83 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR AH EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE INFERIOR (COM FURO RETO). .....    | 154 |
| FIGURA 84 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR AH EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE SUPERIOR (COM FURO OBLONGO). ..... | 155 |
| FIGURA 85 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR MR EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE INFERIOR (COM FURO RETO). .....    | 156 |
| FIGURA 86 – SUPORTES DE ADAPTAÇÃO PARA FIXAÇÃO DO AMORTECEDOR MR EM MÁQUINA DE ENSAIOS MTS MOD. 647: SUPORTE SUPERIOR (COM FURO OBLONGO). ..... | 157 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 – RELAÇÕES ALTERNATIVAS AO MODELO EXPONENCIAL APRESENTADO PELA EQ. 23<br>CONTEMPLANDO VELOCIDADE STRIBECK: .....   | 26 |
| TABELA 2 - AMORTECEDORES COMERCIAIS UTILIZADOS EXPERIMENTALMENTE. ....  | 51 |
| TABELA 3 - EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS NECESSÁRIOS PARA OS ENSAIOS. ....  | 54 |
| TABELA 4 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS NECESSÁRIOS PARA OS ENSAIOS. ....  | 56 |
| TABELA 5 - AMPLITUDES DE DESLOCAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS. ....   | 57 |
| TABELA 6 – EXEMPLO: RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O MODELO DE<br>AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE. ....   | 64 |
| TABELA 7 – EXEMPLO: RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O MODELO DE<br>AMORTECIMENTO DE WANG ET AL. (2004). ....   | 65 |
| TABELA 8 – EXEMPLO: RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O NOVO MODELO DE<br>AMORTECIMENTO COM ASSIMETRIA E FOLGA. ....   | 66 |
| TABELA 9 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE. ....  | 67 |
| TABELA 10 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 0,35MM), PARA O NOVO MODELO DE AMORTECIMENTO COM<br>ASSIMETRIA E FOLGA. ....   | 73 |
| TABELA 11 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AP COM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 1,35MM), PARA O NOVO MODELO DE AMORTECIMENTO COM<br>ASSIMETRIA E FOLGA. ....   | 73 |
| TABELA 12 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AP SEM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO NO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE<br>DESLOCAMENTO $\pm 4$ MM, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA<br>VELOCIDADE. .... | 81 |
| TABELA 13 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE. ....   | 87 |
| TABELA 14 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 1,1MM), PARA O NOVO MODELO DE AMORTECIMENTO COM<br>ASSIMETRIA E FOLGA. ....  | 92 |
| TABELA 15 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AH COM FOLGA DE<br>FIXAÇÃO (APROXIMADAMENTE 2,4MM), PARA O NOVO MODELO DE AMORTECIMENTO COM<br>ASSIMETRIA E FOLGA. ....  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 16 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AH SEM FOLGA DE FIXAÇÃO NO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 3HZ E AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO $\pm 7,5$ MM, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE. .... | 100 |
| TABELA 17 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE. ....   | 106 |
| TABELA 18 – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR MR SEM FOLGA DE FIXAÇÃO, PARA O MODELO DE AMORTECIMENTO DE WANG ET AL. (2004). ....   | 107 |
| TABELA 19 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E10. ....  | 140 |
| TABELA 20 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E12. ....  | 141 |
| TABELA 21 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E13. ....  | 141 |
| TABELA 22 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E22. ....  | 141 |
| TABELA 23 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E23. ....  | 141 |
| TABELA 24 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E24. ....  | 141 |
| TABELA 25 - ARQUIVOS DIGITAIS GERADOS NO ENSAIO E61. ....  | 142 |
| TABELA 26 – PROPRIEDADES TÍPICAS DOS ÓLEOS UTILIZADOS EM AMORTECEDORES. ....   | 143 |
| TABELA 27 – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS (MRF) DO FABRICANTE ©LORD CORPORATION. ....   | 145 |
| TABELA 28 – PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO AMORTECEDOR MR FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO CURTO). ....   | 147 |
| TABELA 29 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AMORTECEDOR MR FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO CURTO). ....   | 147 |
| TABELA 30 – PROPRIEDADES TÉCNICAS DO KIT CONTROLADOR ©LORD MOD. “WONDER BOX”. ....   | 148 |
| TABELA 31 – RESUMO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AP. ....  | 149 |
| TABELA 32 – RESUMO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR AH. ....  | 150 |
| TABELA 33 – RESUMO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E ASPECTOS CONSTRUTIVOS OBTIDOS PARA O AMORTECEDOR MR. ....  | 151 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |   |
|-----------|---|
| .CSV      | Extensão de arquivo digital gerado pelo software BenchLink Data Logger 3®<br>v. 4.3   |
| .DAT      | Extensão de arquivo digital gerado pelo software FLEXTEST® 40   |
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| AER       | Amortecedor(s) eletroreológico(s)   |
| AF        | Amortecedor(s) fluídico(s)  |
| AFNL      | Amortecedor(es) fluídico(s) não linear(es)  |
| AGILENT   | Fabricante de equipamentos para aplicações em ciências e química envolvendo diagnósticos  |
| AH        | Amortecedor do fabricante SCUD mod. 10010006  |
| AMR       | Amortecedor(es) magnetoreológico(es)  |
| AP        | Amortecedor do fabricante LU JIN mod. LJ400AX   |
| ASTM      | <i>(American Society for Testing and Materials)</i> : Sociedade Americana de Testes e Materiais   |
| CONJ      | Conjunto (quantidade)   |
| DIN       | <i>(German Institute for Standardization)</i> : Instituto Alemão de Padronização  |
| DNIT      | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  |
| Eq.       | Equação   |
| ER        | <i>(Electrorheological)</i> : Eletroreológico   |
| ERF       | <i>(Electrorheological Fluid)</i> : Fluido(s) eletroreológico(s)  |
| Freq.     | Frequência  |
| IHM       | Interface Homem-Máquina   |
| ISO       | <i>(International Organization for Standardization)</i> : Organização Internacional de Padronização   |
| ©LORD     | <i>(©LORD Corporation)</i> : Empresa americana diversificada de tecnologia e fabricação de adesivos, revestimentos e dispositivos de gerenciamento de movimento de alta tecnologia e confiabilidade |
| LU JIN    | Empresa chinesa fabricante de amortecedores para bicicletas   |
| ME1 a ME8 | Equipamentos e/ou instrumentos utilizados nos ensaios   |
| MR        | Amortecedor do fabricante ©LORD mod. RD-8040-1 (curso curto) ou   |
| MRF       | <i>(Magnetorheological Fluid)</i> : Fluido(s) magnetoreológico(s)   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| MTS                | ( <i>MTS Systems Corporation</i> ): Fabricante de equipamentos para testes e detecção |
| NBR                | Norma Brasileira Regulamentadora  |
| <i>Nelder-Mead</i> | Algoritmo de busca simplex para otimização de erro                                    |
| PM1 a PM6          | Procedimentos metodológicos utilizados nos ensaios                                    |
| SAE                | ( <i>Society of Automotive Engineers</i> ): Sociedade dos Engenheiros Automotivos     |
| SCUD               | Empresa brasileira importadora de peças chinesas para o segmento de motocicletas      |
| UNID               | Unidade (quantidade)  |
| VG                 | ( <i>Viscosity Grade</i> ): Índice de Viscosidade                                     |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|  |  |
|--|--|
| $\alpha, \alpha_1, \varepsilon_y, \alpha_y, \alpha_2,$<br>$\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \gamma,$<br>$\gamma_1, \gamma_2, \beta, \lambda, m,$<br>$z_1, v_1, \Phi, \varepsilon_c, a, b,$<br>$C_2, C_3, C_4, C_{esp},$<br>$C_{bw1}, C_{bw2}, C_{bw3},$<br>$C_n, C_{n1}, C_{n2}, C_{n3},$ | Parâmetros de ajuste de modelos de amortecimento           |
| $I_0, f_{0w}, I_0, I_1, a_0,$<br>$a_1, a_2, a_3, a_4, k_0,$<br>$k_{1c}, k_{1e}, k_2, k_3,$<br>$k_4, k_5$ e $k_6, h, n,$<br>$n_1, n_2, n_{n1}, n_{n2},$<br>$n_{n3}$   |  |
| $\delta, \delta_1$   | Folgas (distância), [m]                                    |
| $\omega$   | Frequência, [rad/s]  |
| $\rho$   | Massa específica (densidade), [kg/m <sup>3</sup> ]         |
| $\nu$  | Viscosidade cinemática, [m <sup>2</sup> /s]                |
| $\varphi$  | Ângulo de fase   |
| $\tau, \tau_0$   | Coefficientes constantes (constantes elásticas), [N/m]     |
| $\tau_1, \tau_2$   | Coefficientes constantes (termos de amortecimento), [kg/s] |
| $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  | Ângulos de simetria/assimetria                             |
| $\Delta t_c$   | Intervalo de amostragem de tempo para ciclagem, [s]        |
| $\Delta t_T$   | Intervalo de amostragem de tempo para temperatura, [s]     |
| $\dot{F}, \dot{F}_{ve}$  | Derivadas de força, [N/s]                                  |
| $u, u_1, u_2, u_3,$<br>$u_{modelo}, u_f, u_0,$<br>$u_2^*, u_{max}, A, u_m,$<br>$z$   | Deslocamentos, [m]   |
| $\dot{u}, \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3, \dot{u}_s,$<br>$\dot{u}^*, v_d$   | Velocidades escalares, [m/s]                               |
| $\ddot{u}$   | Aceleração escalar, [m/s <sup>2</sup> ]                    |
| $\Delta u$   | Varição do deslocamento, [m]                               |
| $\Delta \dot{u}$   | Varição da velocidade, [m/s]                               |
| $\dot{\gamma}$   | Taxa de cisalhamento, [s <sup>-1</sup> ]                   |

|   |  |
|---|--|
| $\mu$ ou $\eta$   | Viscosidade dinâmica (absoluta), [Pa.s]  |
| $\mu_{atrd}$ , $\mu_{atre}$   | Coefficientes de atrito, [adimensional]  |
| $C$ , $C_0$ , $C_1$ , $C_C$ ,<br>$C_E$ , $C_{eq}$ , $C_v$   | Coefficientes de amortecimento viscoso, [N.s/m]  |
| $D$   | Diâmetro do pistão, [m]  |
| $d$   | Distância entre o pistão e a parede interna do corpo, [m]                              |
| $D_{ext}$ , $D_{ext1}$ , $D_{ext2}$   | Diâmetros externos, [m]  |
| $e_D$   | Fator de transferência de força, [adimensional]  |
| $F$ , $f_c$ ou $F_f$ , $f_{cd}$<br>ou $F_{fd}$ , $f_{cs}$ ou $F_{fe}$ ,<br>$F_C$ , $F_D$ , $F_D^*$ , $F_E$ ,<br>$f_{dn}$ , $f_{dp}$ , $f_d$ , $f_0$ ,<br>$F_{fmax}$ , $F_{Dmax}$ ,<br>$f_{max}$ , $f_{dma}$ , $f_{dmi}$ ,<br>$F_{ine}$ , $f_k$ , $F_m$ , $f_{max}$ ,<br>$F_N$ , $f_{n3}$ , $F_{ve}$ , $F_{veC}$ ,<br>$F_{vi}$ | Forças de amortecimento, [N]   |
| $f_h$ , $f_i$   | Funções do Modelo de TUSSET (2008)   |
| $H$   | Campo magnético induzido, [T]  |
| $I$ , $I_{max}$   | Correntes elétricas, [A]   |
| $K$ , $K_0$ , $K_1$ , $K_2$ ,<br>$K_{ap}$   | Constantes elásticas (rigidez elástica), [N/m]   |
| $L$   | Espessura do embolo do pistão ou altura do pistão (ou válvula), [m]                    |
| $R$   | Coefficiente de massa aparente, [kg]   |
| $S_C$ , $S_{ve}$ , $S_{vi}$   | Função de forma, [adimensional], do Modelo Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido |
| $T$   | Temperatura, [°C]  |
| $t$   | Tempo, [s]   |
| $u_{fen}$ , $u_{fit}$   | Funções de ajuste paramétrico de erro  |
| $V$   | Tensão elétrica, [V]   |
| $z_1$   | Componente histerético do Modelo de Bouc-Wen   |
| $\Gamma$ , $P$  | Tensões, [Pa]  |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1.2. OBJETIVOS.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1.3. CONTEÚDO ORGANIZACIONAL .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>2. REVISÃO TEÓRICA DE MODELOS DE AMORTECIMENTO .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>2.1. MODELO DE AMORTECIMENTO VISCOSO .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>2.2. MODELO DE AMORTECIMENTO CLÁSSICO DE COULOMB .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.3. MODELO DE AMORTECIMENTO QUADRÁTICO.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>2.4. MODELO DE AMORTECIMENTO DE N-ÉSIMA POTÊNCIA DA VELOCIDADE .....</b>                                | <b>20</b> |
| <b>2.5. MODELO DE AMORTECIMENTO HISTERÉTICO .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.6. MODELO DE AMORTECIMENTO DE COULOMB COM EFEITO STRIBECK .....</b>                                   | <b>24</b> |
| <b>2.7. MODELO DE AMORTECIMENTO DE DAHL .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>2.8. MODELO DE AMORTECIMENTO DE LUGRE COM EFEITO STRIBECK .....</b>                                     | <b>27</b> |
| <b>2.9. MODELOS TÍPICOS DE AMORTECIMENTO MAGNETOREOLÓGICO.....</b>   | <b>28</b> |
| 2.9.1. Modelo Paramétrico Plástico de Bingham.....   | 29        |
| 2.9.2. Modelo Paramétrico de Corpo de Bingham.....   | 30        |
| 2.9.3. Modelo Paramétrico Modificado de Bingham (Modelo de Gamota-Filisko).....                            | 31        |
| 2.9.4. Modelo Paramétrico de Três Elementos .....  | 31        |
| 2.9.5. Modelo Paramétrico de BingMax .....   | 32        |
| 2.9.6. Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear .....  | 33        |
| 2.9.7. Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido .....                                | 34        |
| 2.9.8. Modelo Paramétrico de Bouc-Wen.....   | 35        |
| 2.9.9. Modelo Paramétrico Modificado de Bouc-Wen (Modelo de Spencer) .....                                 | 37        |
| <b>2.10. MODELOS DE AMORTECIMENTO COM ASSIMETRIA .....</b>   | <b>39</b> |
| <b>2.11. MODELO DE AMORTECIMENTO COM FOLGA DE FIXAÇÃO.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>3. SOBREPOSIÇÃO DE MODELOS DE AMORTECIMENTO E NOVA PROPOSIÇÃO .....</b>                                 | <b>46</b> |
| <b>3.1. MODELO DE HISTERESE E PROPRIEDADES MR COM DEPENDÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA .....</b>               | <b>46</b> |
| <b>3.2. MODELO DE ASSIMETRIAS, HISTERESE E PROPRIEDADES MR COM DEPENDÊNCIA DE CORRENTE ELÉTRICA .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>3.3. PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MODELO DE AMORTECIMENTO COM ASSIMETRIA EM FORÇA E FOLGA DE FIXAÇÃO .....</b> | <b>48</b> |
| <b>4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>4.1. AMORTECEDORES UTILIZADOS .....</b>   | <b>51</b> |
| 4.1.1. Amortecedor AP.....   | 52        |
| 4.1.2. Amortecedor AH.....   | 52        |
| 4.1.3. Amortecedor MR .....  | 53        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2. EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....   | 53         |
| 4.3. METODOLOGIA DE ENSAIOS .....   | 55         |
| <b>5. IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA .....</b>   | <b>60</b>  |
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>67</b>  |
| 6.1. AMORTECEDOR SECO (AP).....   | 67         |
| 6.1.1. Sem Folga de Fixação .....   | 67         |
| 6.1.2. Com Folga de Fixação .....   | 72         |
| 6.1.3. Ensaio de Longa Duração .....  | 81         |
| 6.2. AMORTECEDOR HIDROPNEUMÁTICO (AH).....  | 86         |
| 6.2.1. Sem Folga de Fixação .....   | 86         |
| 6.2.2. Com Folga de Fixação .....   | 91         |
| 6.2.3. Ensaio de Longa Duração .....  | 100        |
| 6.3. AMORTECEDOR MAGNETOREOLÓGICO (MR).....   | 105        |
| 6.3.1. Sem Folga de Fixação .....   | 106        |
| <b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....</b>   | <b>127</b> |
| 7.1. AMORTECEDOR AP E SUA MODELAGEM.....  | 128        |
| 7.2. AMORTECEDOR AH E SUA MODELAGEM .....   | 129        |
| 7.3. AMORTECEDOR MR E SUA MODELAGEM .....   | 131        |
| 7.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....   | 132        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>133</b> |
| <b>APÊNDICE A. CODIFICAÇÃO DOS ENSAIOS .....</b>  | <b>140</b> |
| AP.A1. ENSAIO E10: AMORTECEDOR AP (LU JIN MODELO LJ400AX) .....   | 140        |
| AP.A2. ENSAIO E12: AMORTECEDOR AP (LU JIN MODELO LJ400AX) .....   | 140        |
| AP.A3. ENSAIO E13: AMORTECEDOR AP (LU JIN MODELO LJ400AX) .....   | 141        |
| AP.A4. ENSAIO E22: AMORTECEDOR AH (SCUD MODELO 10010006 COM MOLA<br>RETIRADA).....  | 141        |
| AP.A5. ENSAIO E23: AMORTECEDOR AH (SCUD MODELO 10010006 COM MOLA<br>RETIRADA).....  | 141        |
| AP.A6. ENSAIO E24: AMORTECEDOR AH (SCUD MODELO 10010006 COM MOLA<br>RETIRADA).....  | 141        |
| AP.A7. ENSAIO E61: AMORTECEDOR MR (©LORD MOD. RD-8040-1 CURSO CURTO).....   | 142        |
| AP.A8. ENSAIO E65: AMORTECEDOR AH (SCUD MODELO 10010006 COM MOLA<br>RETIRADA).....  | 142        |
| AP.A9. ENSAIO E66: AMORTECEDOR AP (LU JIN MODELO LJ400AX) .....   | 142        |
| <b>APÊNDICE B. PROPRIEDADES DE FLUIDOS LÍQUIDOS TÍPICOS<br/>PARA AMORTECEDORES: REFERÊNCIA AOS AMORTECEDORES<br/>AH E MR.....</b> | <b>143</b> |
| AP.B1. AMORTECEDOR AH.....  | 143        |
| AP.B2. AMORTECEDOR MR.....  | 144        |

|  |            |
|--|------------|
| AP.B3. NORMA ISO 3448:1992 .....   | 145        |
| <b>APÊNDICE C. PROPRIEDADES COMPLEMENTARES DO<br/>AMORTECEDOR MR FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO<br/>CURTO) .....</b> | <b>147</b> |
| <b>APÊNDICE D. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS PARA AP, AH E MR<br/>.....</b>   | <b>149</b> |
| AP.D1. AMORTECEDOR AP .....  | 149        |
| AP.D2. AMORTECEDOR AH .....  | 150        |
| AP.D3. AMORTECEDOR MR.....   | 151        |
| <b>APÊNDICE E. DESENHOS DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO DOS<br/>AMORTECEDORES AP, AH E MR.....</b>                                   | <b>152</b> |

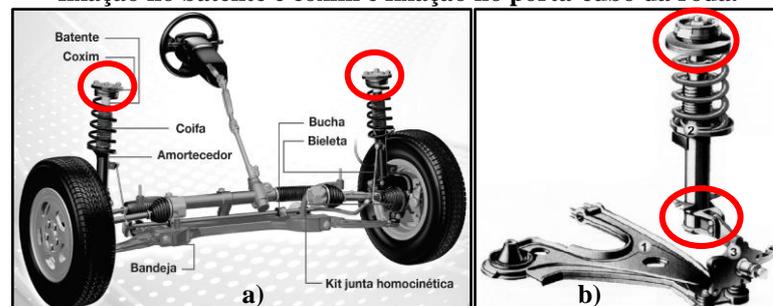
## 1. INTRODUÇÃO

Uma máquina ou equipamento pode ser entendido, sob aspecto de projeto, como sendo o resultado da interação de vários conjuntos, cada um dos quais reunindo subconjuntos que, por sua vez, se compõem de vários elementos (KAMINSKI, 2000). Este conceito é válido para máquinas ou equipamentos em qualquer segmento industrial da área de engenharia, desde a indústria automobilística, bens de consumo, aeronáutica, aeroespacial, naval e muitas outras.

Em geral, máquinas são equipamentos sujeitos a esforços dinâmicos dos mais diversos tipos e por este motivo estão sujeitas ao fenômeno de vibração. O estudo da vibração diz respeito ao estudo dos movimentos oscilatórios de corpos e as forças que lhes são associadas (THOMSON, 1993) e o grande desafio de engenharia é manter os níveis de vibração em faixas toleráveis de operação do sistema, de modo que não interfiram no funcionamento adequado do equipamento. Ao longo do tempo de operação da máquina alguns fenômenos podem acarretar o aumento da vibração: desbalanceamento rotativo, turbulência do filme de óleo lubrificante, desalinhamento (paralelo e/ou angular) de eixos rotativos, presença de eixos defletidos e excesso de folgas entre elementos.

Todo e qualquer sistema mecânico, mesmo que construído dentro de padrões rigorosos de tolerâncias de fabricação, ajuste e montagem, vai apresentar um determinado nível de folga entre seus elementos. Este fato também é o responsável pela possibilidade de conexão dos mesmos, pois afinal, sem folga seria limitado o encaixe e conexão de elementos (parafusos e porcas, pinos em furos e outros). Desta forma, sob o ponto de vista mecânico-geométrico, entende-se pelo termo “folga” afastamento entre as partes que compõem os elementos de um sistema de modo a respeitar a tolerância de ajuste entre eles.

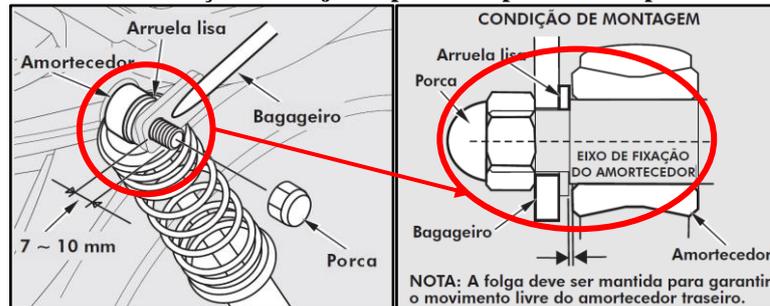
**Figura 1 – Exemplos de ocorrência de folga em amortecedores dianteiros de automóveis em suspensões tipo McPherson: a) fixação nos batentes e coxins e b) fixação no batente e coxim e fixação no porta-cubo da roda.**



Fonte: a) Catálogo de Produtos 2015 ©TENNECO de Amortecedores MONROE® OESpectrum e b) Treinamento Assistência Técnica VOLKS: Conceitos de Suspensão.

Certamente equipamentos de menor responsabilidade estarão relacionados a folgas maiores e maior tolerância de vibração presentes em sua operação e, equipamentos de responsabilidade merecerão maior cuidado de operação para que trabalhem em folgas mais reduzidas e níveis de vibração mais baixo (caso de rolamentos, por exemplo).

**Figura 2 – Exemplo de possibilidade de ocorrência de folga em amortecedores em motocicletas: fixação do conjunto parafuso-porca da suspensão traseira.**



Fonte: Manual do Proprietário ©HONDA nº D2203-MAN-0986-2015.

Nos sistemas dinâmicos as folgas podem induzir ao aumento de ruídos e de vibrações. No caso de motocicletas ou bicicletas, por exemplo, quando é detectado ruído excessivo na suspensão dianteira ou na traseira, uma das possíveis causas são as fixações dos amortecedores soltas (folga de fixação).

A modelagem de folga nos sistemas e elementos mecânicos têm sido objeto de estudo da comunidade científica e já foram dedicados esforços a esses problemas, principalmente no contexto de modelos lineares (aqueles que obedecem ao princípio da sobreposição de efeitos). Tratam-se de modelos simplificados, mas que em muitos casos permitem obter resultados próximos às respostas reais sendo, portanto, considerados como satisfatórios em muitos casos.

No entanto, alguns fenômenos vibratórios que surgem em determinadas condições de operação são associados a comportamentos ou características complexas que não podem ser descritos pelos modelos lineares de modo satisfatório. Uma das possibilidades de representar a característica não linear é a consideração de folga em uma mola ou em um conjunto mola-amortecedor. Novamente citando o caso da indústria aeronáutica, um exemplo prático válido para exemplificar este caso é a questão das folgas em sistemas de trem de pouso, folga em atuadores de superfície de comando e em pilones de fixação de motores em asas de aeronaves.

Num contexto mais recente, os problemas não lineares ganharam mais destaque entre pesquisadores e engenheiros em virtude da otimização de máquinas e equipamentos modernos (aeronaves, por exemplo), numa tentativa constante de redução de massa dos sistemas para

obter-se benefícios de redução de potência necessária e, por consequência, a redução de consumo de combustível.

Entre os amortecedores do tipo não lineares, os do tipo fluídicos (AFNL) estão presentes atualmente em inúmeras aplicações industriais, na forma de amortecedores eletroreológicos (AER) e também de amortecedores magnetoreológicos (AMR). Fluidos magnetoreológicos (MRF, do inglês *Magnetorheological Fluids*) são substâncias que apresentam mudanças nas propriedades reológicas (viscosidade, escoamento de matéria, fluxo de material e outras) quando submetidos a um campo magnético induzido “H”. Segundo CHOI & HAN (2012), a descoberta e o desenvolvimento dos fluidos magnetoreológicos é atribuída a Jacob Rabinow na década de 1940, nos Estados Unidos. Segundo BUTZ & VON STRYK (1999) os MRF apresentam vantagens sobre os fluidos ER tais como maior faixa de temperatura de operação e máxima tensão de escoamento vinte vezes maior. Como desvantagem em peso, em termos de massa específica os MRF apresentam o dobro de magnitude em relação aos ERF.

Em essência, as características do fluxo do MRF se modificam. Tais características são ditas como “viscosidade aparente”. Sem aplicação de campo magnético, os MRF comportam-se como fluidos newtonianos (tensão diretamente proporcional à taxa de deformação), mas com aplicação de um campo magnético externo ativa-se os MRF, fazendo com que as micropartículas formem dipolos magnéticos ao longo das linhas de fluxo magnético, alterando assim seus parâmetros reológicos, principalmente viscosidade. A importância de tais mudanças se reflete na gama de utilização destes fluidos nos problemas da engenharia moderna, principalmente relativo às indústrias automobilística e aeroespacial e também com grandes aplicações na área de biomecânica, onde se busca economia energética, redução de desgastes, possibilidade de controle fino, eficiência, rápidas respostas e supressão de vibração.

Em termos de complexidade, KWOK et al. (2007) salienta exatamente que esta é justamente uma das principais desvantagens no emprego deste tipo de fluido aplicado em amortecimento: sua relação não linear na resposta de força e deslocamento, bem como na resposta de força e velocidade.

É importante lembrar que o amortecimento magnetoreológico é um caso de amortecimento eletromagnético, sendo que este é causado pela interrupção ou passagem de campos magnéticos em sistemas que são passíveis de serem influenciados por magnetismo e do ponto de vista de aplicabilidade, os AMR são uma possibilidade bastante promissora para utilização na indústria aeroespacial, seguindo o mesmo princípio da aplicabilidade na indústria automobilística: ótima relação custo/benefício e possibilidade de se desenvolver formas de controle do mesmo para os mais diversos problemas dinâmicos do segmento.

Outro aspecto inerente aos sistemas dinâmicos é a questão do atrito e seus efeitos. Dinamicamente o atrito resulta em dissipação de energia do sistema através da transmissão de calor e/ou trabalho à vizinhança do volume de controle adotado. A transmissão de calor se dá basicamente por mecanismos de condução e de convecção. A transferência por condução está relacionada ao contato entre meios (físicos) envolvendo diferencial de temperatura e é uma forma bastante cotidiana. É o caso, por exemplo, da transmissão de calor em uma barra metálica aquecida em uma de suas extremidades. A extremidade oposta receberá calor após um determinado intervalo de tempo. A transferência por convecção está relacionada a fluxo (movimento) entre os meios (físicos). É o caso, por exemplo, de climatização de ambientes fechados onde há circulação de ar forçado por exaustores ou ventiladores.

Amortecedores são exemplos típicos de elementos onde as duas formas de transferência citadas são atuantes: a condução ocorre entre o corpo externo do atuador, fluido de trabalho e demais elementos fixados a ele e a convecção ocorre entre o corpo externo do atuador, fluido interno em escoamento e ambiente (ar em movimento ao redor). Este fato salienta também a importância do estudo deste mecanismo e qual a influência dessa dissipação térmica no comportamento do elemento.

### **1.1. Revisão Bibliográfica**

Inúmeros estudos importantes já foram e têm sido desenvolvidos no contexto de amortecimento e seus aspectos correlacionais, onde muitos deles representam estudos analíticos e computacionais, e o presente trabalho propõe também uma contribuição à engenharia, mas através de realização de procedimentos experimentais em sistemas físicos reais (elementos mecânicos tipo amortecedores comerciais de uso originalmente veicular, mas passíveis de inúmeras outras aplicações industriais) e possibilidade de verificação e estudo dos fenômenos que ocorrem ao longo de sua condição dinâmica, como por exemplo, condição de folga, assimetria e histerese de forma concomitante.

Inserido nas temáticas propostas no presente trabalho, como breve justificativa ao seu estudo e abordagem, em termos de cronologia não se pode deixar de citar autores e seus respectivos estudos que representaram relevância ao desenvolvimento, tais como:

RUZICKA & DERBY (1971) apresentam diversos tipos de amortecimento linear e não linear, incluindo viscoso, de Coulomb, quadrático e de n-ésima potência, considerando

principalmente aplicações de isolamento de vibrações devido a excitação harmônica. As informações são concisas em termos conceituais de efeitos entre estes modelos.

DEGENER (1979) abordou em seu estudo os efeitos do amortecimento estrutural na resposta dinâmica em espaçonaves, dentre outros aspectos, a resposta dinâmica e já mencionava a ocorrência do caso de amortecimento não linear influente em estruturas aeroespaciais e a importância de sua investigação. Neste mesmo ano, OTTENS (1979) desenvolveu uma formulação matemática para amortecimento através de análise estrutural. O autor aborda os modelos viscoso e histerético, dentre outros. Como conclusões, o autor comenta que existem diversos modelos disponíveis para representar os mecanismos de amortecimento estrutural, mas o sucesso dependerá da escolha conveniente e adequada dos parâmetros envolvidos.

SPENCER et al. (1997) apresentou seu modelo para amortecedores magnetoreológicos, abordando o comportamento típico harmônico de força por tempo e deslocamentos e forças características e proporcionais à variação da tensão elétrica de excitação. Como resultados do estudo os autores apresentaram comparações entre outros modelos (Bingham, Gamota e Filisko e Bouc-Wen) em termos de erro, demonstrando que, para o sistema proposto, o modelo próprio mostrou-se mais eficaz.

BUTZ & VON STRYK (1999), em seu trabalho de modelagem e simulação envolvendo configurações de fluidos reológicos, abordaram uma gama substancial de modelos para amortecimento para fluidos reológicos (eletroreológicos e principalmente abordagem em magnetoreológicos), paramétricos e não paramétricos, bem como simulações numéricas para um modelo de 1/4 de veículo. Como parte de suas conclusões os autores concluem positivamente sobre a aplicabilidade destes fluidos devido às propriedades básicas dos mesmos, mas são precavidos ao lembrar que muito ainda há de se investigar, estudar e entender sobre o assunto.

YANG et al. (2002) estudaram amortecedores magnetoreológicos em grande escala, incluindo considerações de modelagem e comportamento dinâmico. Os autores apresentaram a característica típica deste tipo de amortecedor (variação das curvas de força por deslocamento e força por velocidade em função da corrente elétrica aplicada) e a modelagem foi baseada no modelo de Bouc-Wen modificado. Como conclusão os mesmos deixam claro a efetividade da realização de controle neste tipo de amortecedor e a provisoriedade de aplicação deste tipo de tecnologia também na construção civil.

WANG et al. (2004) também prosseguiram na investigação de amortecedores magnetoreológicos e em seu trabalho realizaram a modelagem das propriedades em termos de assimetria e histerese deste tipo de amortecedor. Apresentaram uma representação generalizada

de assimetria e características de histerese em termos de força por velocidade e concluíram que a formulação desenvolvida pode representar tanto sistemas simétricos como assimétricos com boa precisão, principalmente no que diz respeito a problemas envolvendo suspensões veiculares e seu controle.

SAVARESI, BITTANTI & MONTIGLIO (2005) realizaram a identificação de modelos não lineares envolvendo aplicação de amortecedores magnetoreológicos em veículos. Foi utilizado um amortecedor fabricante ©LORD modelo RD-1094-09, similar a um dos amortecedores adotados nesta tese (mesmo fabricante e mesma faixa de força). Os modelos abordados pelos autores foram os de Bingham, Bouc-Wen modificado e outro não linear denominado modelo “caixa-preta”. Os autores deixam observado que, em corrente elétrica constante, ambos os modelos são passíveis de representar o elemento físico proposto, mas o modelo “caixa-preta” apresentou-se ligeiramente mais eficaz. Já em corrente elétrica variável o modelo “caixa-preta” supera significativamente o modelo de Bouc-Wen modificado.

KWOK et al. (2006) desenvolveram um modelo histerético para amortecedores com fluido magnetoreológicos e um sistema de identificação paramétrica por otimização. Os autores abordaram os modelos padrão de Bingham, Bouc-Wen, Bouc-Wen modificado e também propuseram seu modelo e como conclusão observaram que há grande complexidade em muitos dos parâmetros dos modelos que descrevem o comportamento de amortecedores magnetoreológicos e a otimização é sempre uma opção viável.

PRETI (2007) desenvolveu estudo sobre modelagem e simulação de um sistema hidráulico para funcionar como elemento amortecedor em pequenas amplitudes. Neste trabalho o autor aborda, dentre outros aspectos, a questão da diferenciação entre um elemento amortecedor ideal (linear) e os elementos amortecedores reais (com não linearidades). A publicação de DIXON (2007) envolve também a questão de elementos amortecedores, especificamente sobre os elementos deste tipo em aplicações veiculares, abordando sistematicamente vários aspectos relacionados, desde a teoria clássica sobre vibrações mecânicas passando posteriormente a conceitos mais complexos de modelagem de suspensões de automóveis e motocicletas, incluindo observações bastante relevantes sobre a composição e especificação dos fluidos destinados à confecção de amortecedores (até mesmo fluidos magnetoreológicos) e muitos outros aspectos. WOJEWODA et al. (2007) realizaram estudos experimentais e modelaram analiticamente o amortecimento em termos de efeitos histeréticos de atrito seco. Em seus resultados os autores demonstraram uma comparação concisa entre dados experimentais e numéricos obtidos, contudo, uma descrição mais precisa dos fenômenos em escala microscópica ainda necessitava de desenvolvimento. KWOK et al. (2007) abordaram

novamente a identificação paramétrica do amortecimento magnetoreológico no modelo de Bouc-Wen, mas agora através de otimização utilizando algoritmos genéticos. Neste estudo houve ocorrência de assimetria presente no amortecedor e em suas conclusões os autores deixam claro a vantagem e eficiência da aplicação correta de identificação paramétrica através de algoritmos genéticos em termos de ganho de precisão através da minimização do erro envolvido.

ASTROM & WIT (2008) abordaram o modelo de amortecimento de LuGre e o efeito comportamental das mudanças nos parâmetros do mesmo e como conclusão principal apresentam que este modelo apresenta propriedades atrativas, passível de representar muitas propriedades de sistemas reais, mas com uma severa limitação de não possuir representatividade muito vasta em pontos de reversão de movimento. TUSSET (2008) realizou um estudo sobre controle ótimo aplicado em suspensão veicular não linear e para tanto, também utilizou como base as propriedades atrativas do fluido magnetoreológico para tais fins.

COSTA & BRANCO (2009) realizaram estudo igualmente importante sobre fluidos magnetoreológicos incluindo efeitos de atrito entre o fluido e a parede. Tal estudo contemplou modelagem analítica e validação experimental e neste é possível observar a variação da velocidade do fluido à medida que o campo magnético sofre variação e também a variação de pressão com a variação também do campo magnético. Ainda em termos de fluidos magnetoreológicos e sua aplicabilidade, AVRAAM (2009) desenvolveu um estudo em biomecânica sobre a aplicação deste tipo de fluido em termos de dispositivos destinados a fins de reabilitação muscular. A capacidade de controle dos parâmetros deste tipo de fluido foi de suma importância e decisiva para sua seleção à finalidade proposta pelo autor. Seu estudo contemplou, dentre outros aspectos, modelos básicos de amortecimento magnetoreológico, composição e propriedades dos fluidos e também aplicabilidade em mecatrônica. Também no estudo de GEFFEN (2009) é abordado o estudo dos modelos de amortecimento envolvendo atrito. Dentre eles, o modelo de Coulomb, o modelo viscoso, o modelo Stribeck e os modelos de Dahl e LuGre e, em suas conclusões, o autor observa que os modelos dinâmicos são mais efetivos que os modelos estáticos mas envolvem maior complexidade e mais parâmetros e, portanto, maiores esforços computacionais, mas são muito úteis.

ZEILMANN et al. (2010) realizaram estudo sobre teoria e experimentação de atrito em atuadores robóticos e, em seu trabalho, modelaram o atrito por modelo linear, modelo de Coulomb, modelo de Dahl, modelo de LuGre e um outro modelo denominado modelo de Gomes. Para cada modelo apresentado foi realizada a identificação paramétrica e, como conclusão, para o sistema físico proposto, segundo os autores a maior robustez nas simulações

foram o modelo de LuGre e o de Gomes sendo este último o mais significativo e ideal para amortecedores atuando a baixas velocidades. O trabalho destes autores permite a observação do efeito localizado Stribeck no modelo de Coulomb, tanto na condição experimental quanto na condição de simulação, mas não abordaram a questão de folga nem influência de temperatura.

DE LIMA (2011) também seguiu a linha de estudo sobre fluidos magnetoreológicos. Detectada a importância do assunto o autor realizou a identificação experimental de um amortecedor comercial magnetoreológico, abordando os modelos matemáticos para tanto e dispositivos de controle associados a ele. O elemento comercial objeto de estudo deste autor foi um amortecedor ©LORD MR RD 1005-3, similar ao desta tese. Outro estudo relevante a citar é o realizado por WANG (2011) onde o autor desenvolveu a temática também de controle em um amortecedor uniaxial do tipo magnetoreológico para fins veiculares e industriais. Aspectos de controle, modelagem de amortecimento magnetoreológico foram seus objetivos e a execução experimental realizada confirmaram a aplicabilidade do fluido e suas possibilidades de emprego. HVOLDAL & OLESEN (2011) também estudaram os modelos de amortecimento envolvendo atrito e sua estimativa de parâmetros para cilindros hidráulicos assimétricos: modelo de Coulomb, efeito Stribeck, histerese, modelo de LuGre, entre outros. Em seu trabalho não foi possível verificar a condição do efeito Stribeck devido a uma resposta instável resultante do modelo dos autores, mas os demais modelos foram implementados.

FILHO (2013) realizou seu estudo também identificada a importância envolvendo fluidos magnetoreológicos, tendo este desenvolvido controle semiativo de vibrações através da implementação de Lógica Fuzzy otimizada. YANG, LI & CHEN (2013) desenvolveram um novo e simples modelo histerético não linear para amortecedor magnetoreológico. Os autores utilizaram experimentalmente um amortecedor ©LORD RD 1097 e, para modelagem abordaram modelos de Bingham, bi viscoso histerético não linear, dentre outros, além da proposição de seu modelo próprio. Como resultados, na faixa de trabalho utilizada (frequências de 1 a 4Hz, amplitudes de deslocamento de -7,5 a 7,5mm e correntes de excitação de 0 a 0,4A) o erro em frequência demonstrou que o modelo proposto foi superior aos demais sendo, portanto, um modelo alternativo para representação de amortecedores magnetoreológicos, mas a grande vantagem de redução da complexidade em relação aos demais modelos.

LIU et al. (2015) realizaram uma comparação experimental de modelos de amortecimento por atrito: modelo de Coulomb, modelo viscoso, modelo integrado de Coulomb e viscoso, modelo Stribeck, modelo de Dahl, modelo de LuGre e modelo elastoplástico. Através da implementação dos modelos e detecção paramétrica os autores obtiveram um perfil de

identificação de todos os parâmetros dos modelos de Coulomb, Stribeck, Dahl, LuGre e elastoplástico citados. Como conclusão os autores observam que o modelo de Coulomb não representou de forma adequada o sistema real, mas os demais modelos sim, onde o modelo de LuGre foi o mais eficaz. DO et al. (2015) realizou um estudo de biomecânica envolvendo uma abordagem de um modelo não linear de atrito em tendões e identificação paramétrica. O modelo-base do estudo foi o de LuGre com efeito Stribeck. O estudo abordou histerese e assimetria, bem como validação experimental para identificação paramétrica. Os ensaios foram realizados em baixa frequência de oscilação (abaixo de 0,5Hz) e os autores utilizaram uma função erro quadrática na identificação paramétrica. Não houve uma abordagem em termos de magnetoreologismo, folga ou influência de temperatura na dinâmica do sistema proposto. CAO et al. (2015) estudaram um dispositivo de controle estrutural baseado no mecanismo de freio veicular tipo duo-servo (tipo tambor e mola, com sapata e atuador hidráulico). Os autores realizaram a modelagem baseado no modelo de LuGre e realizaram também a validação experimental do dispositivo proposto. Pela análise da resposta dinâmica do sistema é possível observar a presença de um efeito com característica similar à de folga nas curvas de força por deslocamento e de força por velocidade. O estudo do modelo contemplou a identificação paramétrica (treze parâmetros) utilizando a função `fminsearch` no MATLAB® e estes parâmetros foram abordados em termos de dependência de pressão e frequência, mas os autores não abordaram efeitos em termos de temperatura nem efeitos localizados como efeito Stribeck.

SUN et al. (2016) em seu trabalho intitulado “Uma configuração experimental abrangente para identificação de parâmetros do modelo de atrito” abordaram o atrito em termos de modelos clássico, de Dahl, de LuGre com efeito Stribeck, dentre outro e realizaram um procedimento experimental para validar estes modelos para representar a força de atrito. O modelo de atrito clássico foi verificado em relação ao comportamento experimental em seus resultados no mapa de força por velocidade, e os modelos de Dahl e LuGre com efeito Stribeck foram representativos nos mapas de velocidade por tempo e força por deslocamento. No estudo a velocidade Stribeck determinada foi de 0,00194m/s na expansão e 0,0003365m/s na compressão, valores que denotam a região de ocorrência do efeito (região onde a velocidade igual a zero). Não houve uma abordagem em termos de magnetoreologismo, folga ou influência de temperatura na dinâmica do sistema proposto.

CASTRO et al. (2016) abordam o modelamento de amortecedor com folga em sua conexão, de modo a representar este tipo de elemento nesta situação como possuindo uma parcela de amortecimento equivalente e uma parcela de rigidez aparente associada. A abordagem dos autores permite apenas uma análise quantitativa da força desenvolvida pelo

amortecedor com folga e não leva em consideração, por exemplo, a análise de temperatura externa do corpo do elemento, bem como os aspectos de não linearidades de assimetria e de histerese no elemento.

KHAN, CHACKO & NAZIR (2017) abordaram a questão da folga, dentre outros aspectos. Em seu trabalho os autores focaram na modelagem de atrito correlacionada ao desenvolvimento de sistemas onde há interação de várias áreas de conhecimento (dinâmica, computação, design, controle, Tribologia e interação homem-máquina, IHM) de modo a almejar durabilidade e confiabilidade adequadas onde os modelos clássicos de mecanismos dinâmicos (articulados) não incorporavam a questão das não linearidades relacionadas ao efeito do atrito e contato (incluindo condição de impacto). O objeto de estudo foi o caso de um braço articulado (manipulador mecânico tipo pá carregadeira) com rotação horizontal na base e rotação vertical em três pontos articulados da estrutura do braço. Sua revisão de literatura englobou atrito de Coulomb, atrito viscoso, efeito Stribeck, atrito de Dahl, atrito de LuGre e outros. A questão da ocorrência da folga foi focada nas articulações, juntamente com outros efeitos nestas (penetração, impacto, contato contínuo e movimento livre). Dentre suas conclusões os autores apresentam que os modelos de atrito atuais e ainda em desenvolvimento foram desenvolvidos, em sua maioria, a partir dos modelos básicos (Coulomb, viscoso e Stribeck) e ainda há muitas lacunas de compreensão entre as relações de atrito-dinâmica-desgaste-lubrificação que governam os mecanismos e que requerem estudos. A quantificação e modelagem de folga não foi abordada pelos autores, bem como a de influência de temperatura do corpo dos elementos de articulação. WANG et al. (2017) realizaram a modelagem e investigação experimental de um novo amortecedor de atrito em seu trabalho. O amortecedor objeto de estudo foi um amortecedor seco (pneumático) com geometria construtiva interna em forma de arco que permitiu o estudo dos efeitos de atrito seco ao longo da condição dinâmica. Neste estudo o comportamento histerético do amortecedor foi observado e também pode-se observar um efeito com característica similar à de folga nas curvas de força por deslocamento e em termos de energia dissipada do sistema (trabalho absorvido pelo amortecedor). Os autores não abordaram análise em termos de força e velocidade para observação de eventual efeito localizado, como Stribeck por exemplo, tampouco em termos de variação de temperatura externa do corpo do atuador e sua influência no comportamento dinâmico do sistema.

Esta tese vem a contribuir de modo a explorar não linearidades simultâneas em amortecedores seco, viscoso e magnetoreológico em termos de folga de fixação, histerese, magnetoreologismo e efeito de temperatura no corpo externo do atuador.

## 1.2. Objetivos

Os objetivos desta tese são:

- Desenvolver uma metodologia para identificação paramétrica de amortecedores com comportamento não linear incluindo histerese, assimetria e folga de fixação;
- Implementar modelos paramétricos que descrevam o comportamento dinâmico dos amortecedores com comportamento não linear adotados (seco, viscoso e magnetoreológico);
- Desenvolver um novo modelo paramétrico simplificado para representar as não linearidades de folga e assimetria de amortecedores;
- Identificar e modelar o efeito da variável temperatura externa do corpo de amortecedor em relação ao seu comportamento dinâmico;

## 1.3. Conteúdo Organizacional

O presente trabalho foi dividido em capítulos para uma melhor compreensão dos conteúdos abordados, conforme os seguintes tópicos:

- **CAPÍTULO 2 – REVISÃO TEÓRICA DE MODELOS DE AMORTECIMENTO:** Este capítulo aborda uma contextualização do amortecimento e os principais modelos de dissipação de energia atuantes no elemento físico conhecido como amortecedor, presente na grande maioria dos sistemas físicos da engenharia mecânica. Alguns destes modelos apresentam características particulares convenientes para utilização em amortecedores específicos (seco, viscoso, magnetoreológico e outros) e alguns deles contemplam também a ideia de representação do efeito de folga de fixação;
- **CAPÍTULO 3 – SOBREPOSIÇÃO DE MODELOS DE AMORTECIMENTO E NOVA PROPOSIÇÃO:** Este capítulo apresenta modelos já existentes de sobreposição de efeitos, como o caso do modelo de histerese e propriedades magnetoreológicas em função da corrente de excitação e modelo proposto por WANG et al. (2004) de assimetrias, histerese e também propriedades magnetoreológicas em função da corrente e apresenta também um novo modelo

paramétrico simplificado com seis elementos para representar assimetria em força e folga de fixação;

- **CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL:** Este capítulo apresenta uma breve contextualização dos amortecedores objetos de estudo desta tese (um seco, um viscoso e um magnetoreológico), bem como a relação de equipamentos e procedimentos utilizados (metodologia de ensaios) no processo experimental realizado, para validação de alguns dos modelos matemáticos abordados nos CAPÍTULOS 2 e 3 (modelo de n-ésima potência da velocidade, modelo de Wang et al. (2004) e novo modelo proposto);
- **CAPÍTULO 5 – IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA:** Este capítulo aborda aspectos da identificação paramétrica dos modelos utilizados, incluindo os computacionais envolvidos;
- **CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES:** Este capítulo aborda os resultados analíticos e experimentais para os amortecedores estudados, levando-se em consideração os parâmetros identificados nos modelos propostos e suas tendências de comportamento (crescimento ou decaimento) ao longo da variação das condições de frequência de excitação, deslocamento, corrente elétrica e folga de fixação, incluindo ensaios de ciclos longos e evolução da temperatura de corpo externa e seus efeitos na força e parâmetros dos modelos;
- **CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:** Este capítulo apresenta as conclusões finais quanto aos objetivos propostos da tese, em termos de modelagem do amortecimento não linear envolvendo não linearidades de histerese, assimetria, folga de fixação e efeito de temperatura, bem como sugestões para complementação dos trabalhos realizados;
- **APÊNDICE A - CODIFICAÇÃO DOS ENSAIOS:** Este apêndice relaciona informações sobre a codificação criada para os ensaios experimentais, que serviu de base para toda a estrutura organizacional dos dados utilizados;
- **APÊNDICE B – PROPRIEDADES TÍPICAS DE FLUIDOS LÍQUIDOS PARA AMORTECEDORES: REFERÊNCIA AOS AMORTECEDORES AH E MR:** Apresenta informações complementares referentes aos fluidos típicos empregados em amortecedores como alguns dos utilizados nesta tese (amortecedor viscoso);
- **APÊNDICE C – PROPRIEDADES COMPLEMENTARES DO AMORTECEDOR MR FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO**

CURTO): Apresenta dados técnicos construtivos adicionais referentes ao amortecedor magnetoreológico utilizado nesta tese (dados elétricos e dados mecânicos);

- APÊNDICE D – PARÂMETROS GEOMÉTRICOS PARA AP, AH E MR: Apresenta basicamente informações construtivas internas sobre o amortecedor seco (AH) e viscoso (AH) obtidas por desmontagem e medição para fins de verificação de seus mecanismos internos de funcionamento;
- APÊNDICE E - DESENHOS DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES AP, AH E MR: Este apêndice relaciona os desenhos técnicos dos suportes de fixação idealizados e fabricados para os amortecedores utilizados.

## 2. REVISÃO TEÓRICA DE MODELOS DE AMORTECIMENTO

O amortecimento é a dissipação de energia do sistema vibratório sob a forma de calor e/ou som (formas mais comuns) e é comumente associado ao elemento mecânico conhecido por amortecedor. Contudo, deve-se ter em mente que este não é característica exclusiva de um único elemento mecânico pois na prática qualquer elemento físico em estado dinâmico ou que interaja com sua vizinhança, pode dissipar ou receber energia do meio, sendo que a dissipação é mais comum, principalmente na forma de calor.

Vários são os critérios possíveis de classificação do amortecimento. PUTHANPURAYIL et al. (2011) comentam que existem inúmeros mecanismos capazes de dissipar energia e receber a designação de amortecimento (Coulomb, deslizamento, atrito estrutural, viscoso, histerético e muitos outros), podendo ser representados por modelos lineares ou não lineares. Uma classificação conveniente seria primariamente agrupá-los nestas duas grandes classes: linear e não linear. Ainda, é possível considerar três subclasses: interno, estrutural e viscoso (PUTHANPURAYIL et al., 2011; WOODHOUSE, 1998; RODRÍGUEZ, 2006; SILVA, 2007; COSSOLINO & PEREIRA, 2010).

Sob o aspecto de modelagem, existem inúmeros modelos de amortecimento (tipos de amortecedores). Pode-se destacar como principais (RUZICKA & DERBY, 1971):

- Amortecimento Viscoso (não linear);
- Amortecimento Clássico de Coulomb (não linear);
- Amortecimento Quadrático (não linear);
- Amortecimento de N-ésima Potência da Velocidade (não linear);
- Amortecimento Histerético (não linear).

Além dos modelos citados, pode-se também complementar as descrições com os principais modelos de amortecimento:

- Amortecimento de Coulomb com Efeito Stribeck (não linear);
- Amortecimento de Dahl (não linear);
- Amortecimento de LuGre com Efeito Stribeck (não linear);
- Amortecimento Magnetoreológico (não linear);
- Amortecimento com Assimetria (não linear);

- Amortecimento com Folga (não linear);
- Amortecimento com Influência de Temperatura (não linear);
- Amortecimento com Sobreposição de Modelos (não linear).

## 2.1. Modelo de Amortecimento Viscoso

O amortecimento viscoso é o tipo mais comum de ocorrência (RUZICKA & DERBY, 1971; ZEILMANN et al., 2010). Este provém da dissipação de energia associada com forças de atrito e está envolvido principalmente com o movimento do sistema mecânico em fluidos.

No amortecimento viscoso ideal (aquele onde a força de amortecimento é função apenas da velocidade), a equação que rege o movimento oscilatório do sistema tem a relação entre a força de amortecimento e a velocidade de forma linear e é dada por (PRETI, 2007; GEFFEN, 2009; CHOPRA, 2012; LIU et al., 2015):

$$F_D = C\dot{u} \quad \text{Eq. 1}$$

sendo  $F_D$  a força de amortecimento,  $C$  o coeficiente de amortecimento e  $\dot{u}$  a velocidade.

Graficamente analisando-se a resposta deste modelo dado pela **Eq. 1** em termos da força  $F_D$  e deslocamento  $u$ , a curva característica é de uma elipse, figura geométrica que pode ser matematicamente parametrizada pela **Eq. 2** (RUZICKA & DERBY, 1971).

$$\frac{F_D^2}{F_{D\max}^2} + \frac{u^2}{u_{\max}^2} = 1 \quad \text{Eq. 2}$$

sendo  $F_{D\max}$  um valor máximo de força ( $-F_{D\max} \leq F_D \leq F_{D\max}$ ),  $u$  o deslocamento e  $u_{\max}$  um valor de máximo de deslocamento ( $-u_{\max} \leq u \leq u_{\max}$ ).

Os valores de forças  $F_D$  e  $F_{D\max}$ , por sua vez, também podem ser calculados adotando-se, por exemplo, um comportamento harmônico. Neste caso tem-se que (RUZICKA & DERBY, 1971):

$$F_D = F_{D\max}\cos(\omega t) \quad \text{Eq. 3}$$

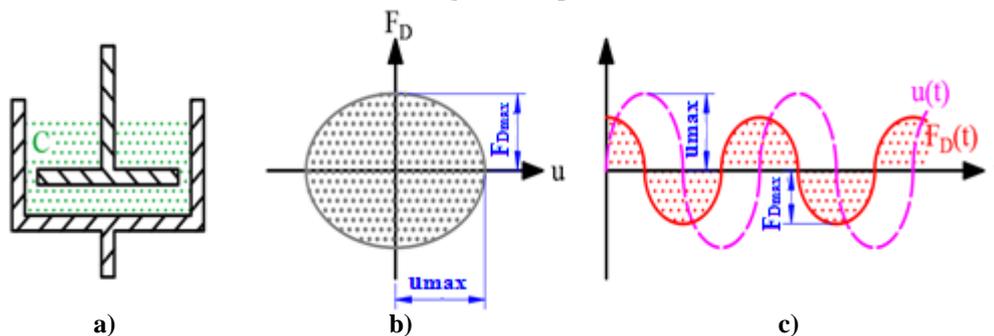
e,

$$F_{D\max} = C\omega u_{\max} \quad \text{Eq. 4}$$

sendo  $F_D$  a força de amortecimento,  $F_{D\max}$  o valor máximo de força,  $\omega$  a frequência de movimento,  $t$  o tempo,  $C$  o coeficiente de amortecimento e  $u_{\max}$  um valor de máximo de deslocamento.

Esta suposição de comportamento harmônico é conveniente pois proporciona uma condição inicial  $u(0) = 0$  e  $F_D(0) = F_{D\max}$  e nos instantes de tempo onde  $u = |u_{\max}|$  a força  $F_D$  é nula. A **Figura 3** apresenta o modelo de amortecimento viscoso em termos de idealização, comportamento dinâmico de força por deslocamento e históricos de deslocamento e força no tempo.

**Figura 3 – Modelo de amortecimento viscoso: a) Representação esquemática do amortecedor; b) Comportamento dinâmico e c) Históricos de deslocamento e força no tempo.**



Fonte: Baseado em RUZICKA & DERBY, 1971.

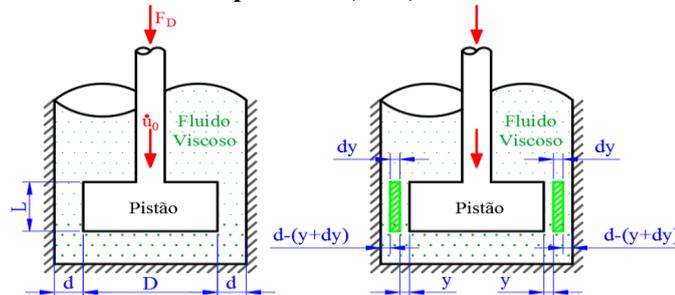
Esta forma de amortecimento ocorre em situações de baixa velocidade de escoamento do fluido e, segundo WU et al. (2007), o amortecimento viscoso é normalmente não linear nos sistemas mecânicos.

Ainda envolvendo amortecimento viscoso linear, RAO (1990) apresenta uma forma de calcular o coeficiente de amortecimento  $C$ : segundo este autor, a **Eq. 5** apresenta a modelagem para um atuador idealizado pela **Figura 4** de modo a fornecer sua constante de amortecimento em termos de parâmetros geométricos e parâmetro de viscosidade dinâmica do fluido de trabalho.

$$C = \mu \left[ \frac{3\pi D^3 L}{4d^3} \left( 1 + \frac{2d}{D} \right) \right] \quad \text{Eq. 5}$$

sendo  $C$  a constante de amortecimento,  $\mu$  a viscosidade dinâmica (absoluta) do fluido, e  $D$ ,  $L$  e  $d$  parâmetros dimensionais construtivos do amortecedor (conforme **Figura 4**).

**Figura 4 – Modelo de amortecimento viscoso para atuador descrito por RAO (1990).**



Fonte: Baseado em RAO, 1990.

Substituindo a **Eq. 5** na **Eq. 1** tem-se que:

$$F_D = \mu \left[ \frac{3\pi D^3 L}{4d^3} \left( 1 + \frac{2d}{D} \right) \right] \dot{u} \quad \text{Eq. 6}$$

Apesar de normalmente não lineares, os sistemas mecânicos reais muitas vezes são estudados com o emprego do modelo linear devido a menor complexidade envolvida de modelagem e, muitas vezes, esta adoção (modelagem simplificada) converge para resultados considerados satisfatórios ao sistema objeto de estudo, mas isto não pode ser tomado como regra: deve-se proceder análises de cada problema particular para se concluir se é ou não viável ao sistema a adoção de tal simplificação.

## 2.2. Modelo de Amortecimento Clássico de Coulomb

O amortecimento clássico de Coulomb é também outro exemplo de comum ocorrência nos sistemas dinâmicos de engenharia. Ele é um fenômeno não linear já que existem descontinuidades no histórico do tempo na força de amortecimento devido a mudanças na direção da velocidade relativa do sistema. Essas mudanças resultam numa equação não linear de movimento do sistema vibratório, segundo RUZICKA & DERBY (1971) e ZEILMANN et al. (2010).

No amortecimento de Coulomb a equação que rege o movimento oscilatório do sistema tem a relação entre a força de amortecimento e a velocidade dada por (WOJEWODA, 2007; GEFFEN, 2009; LIU et al. 2015):

$$F_D = F_f \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad \text{Eq. 7}$$

A força de amortecimento de Coulomb pode ser descrita como de magnitude constante e independente do deslocamento. Pelo coeficiente de atrito entre duas superfícies envolvendo um problema de movimento relativo entre elas a força de amortecimento de Coulomb pode ser calculada pela força normal atuante de modo que (DIXON, 2007; GEFFEN, 2009; LIU et al., 2015):

$$F_f = \mu_{\text{atrd}} F_N \quad \text{Eq. 8}$$

sendo  $\mu_{\text{atrd}}$  o coeficiente de atrito (dinâmico) e  $F_N$  a força normal atuante.

Analisando-se graficamente a resposta deste modelo em termos de força  $F_D$  e deslocamento  $u$  esta pode ser matematicamente parametrizada pela **Eq. 9**.

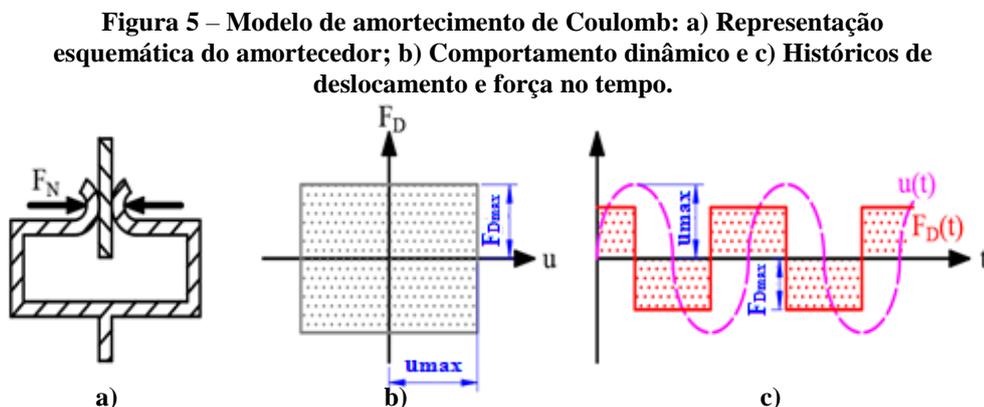
$$F_D = \begin{cases} -F_{f\max} & \text{se } \dot{u} < 0 \\ +F_{f\max} & \text{se } \dot{u} > 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 9}$$

sendo  $F_{f\max}$  um valor máximo de força ( $-F_{f\max} \leq F_D \leq F_{f\max}$ ) e ocorre em  $-u_{\max} \leq u \leq u_{\max}$ .

Pela **Eq. 9** é também correto afirmar que:

$$|F_{D\max}| = |\pm F_{f\max}| \quad \text{Eq. 10}$$

A **Figura 5** apresenta o modelo de amortecimento de Coulomb em termos de sua idealização, comportamento dinâmico de força por deslocamento e históricos de deslocamento e força no tempo:



Fonte: Baseado em RUZICKA & DERBY, 1971.

### 2.3. Modelo de Amortecimento Quadrático

O amortecimento quadrático é também outro exemplo de um modelo não linear onde a força de amortecimento é proporcional ao quadrado da velocidade relativa do sistema (RUZICKA & DERBY, 1971).

No amortecimento quadrático a equação que rege o movimento oscilatório do sistema tem a relação entre a força de amortecimento e a velocidade dada por (RUZICKA & DERBY, 1971; DIXON, 2007):

$$F_D = C_2 \dot{u}^2 \text{sgn}(\dot{u}) \quad \text{Eq. 11}$$

sendo  $F_D$  a força amortecimento,  $C_2$  uma constante de proporcionalidade e  $\dot{u}$  a velocidade.

Graficamente, analisando-se a resposta deste modelo dado pela **Eq. 11** em termos de força  $F_D$  e deslocamento  $u$ , nota-se que as extremidades em  $-u_{\max}$  e  $+u_{\max}$  convergem de forma mais abrupta do que numa geometria tipo elíptica (devido ao termo quadrático), figura geométrica que pode ser matematicamente parametrizada pela **Eq. 12** (RUZICKA & DERBY, 1971).

$$\pm \frac{F_D}{F_{D\max}} + \frac{u^2}{u_{\max}^2} = 1 \quad \text{Eq. 12}$$

Os valores de  $F_D$  e  $F_{D\max}$ , por sua vez, também podem ser calculados adotando-se a entrada do tipo harmônica no deslocamento onde, por exemplo, tem-se que (RUZICKA & DERBY, 1971):

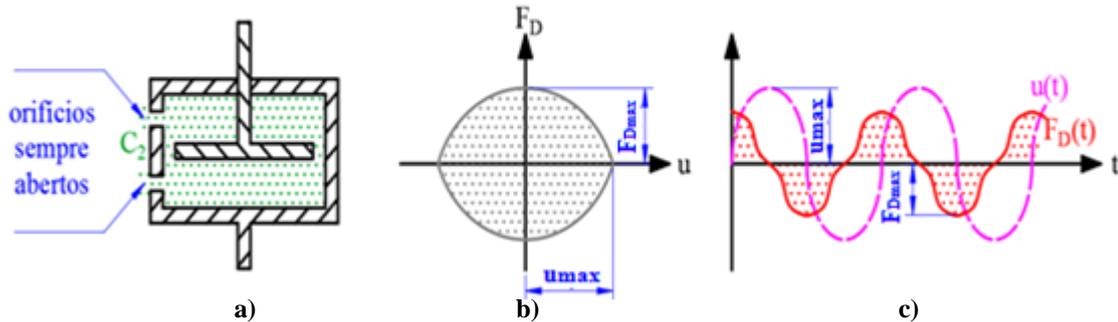
$$F_D = \pm F_{D\max} \cos^2(\omega t) \quad \text{Eq. 13}$$

e,

$$F_{D\max} = C_2 \omega^2 u_{\max}^2 \quad \text{Eq. 14}$$

A **Figura 6** apresenta o modelo de amortecimento quadrático em termos de representação esquemática do amortecedor, comportamento dinâmico de força por deslocamento e históricos de deslocamento e força no tempo.

**Figura 6 – Modelo de amortecimento quadrático: a) Representação esquemática do amortecedor; b) Comportamento dinâmico e c) Históricos de deslocamento e força no tempo.**



Fonte: Baseado em RUZICKA & DERBY, 1971.

#### 2.4. Modelo de Amortecimento de N-ésima Potência da Velocidade

O amortecimento de n-ésima potência da velocidade é um exemplo generalizado de um fenômeno não linear, onde a força de amortecimento é proporcional n-ésima potência da velocidade relativa do sistema. (RUZICKA & DERBY, 1971)

No amortecimento de n-ésima potência da velocidade a equação que rege o movimento oscilatório do sistema tem a relação entre a força de amortecimento e a velocidade dada por (RUZICKA & DERBY, 1971):

$$F_D = C_n |\dot{u}|^n \text{sgn}(\dot{u}) \quad \text{Eq. 15}$$

sendo  $F_D$  a força amortecimento,  $C_n$  uma constante de proporcionalidade,  $n$  um índice de potência e  $\dot{u}$  a velocidade.

O comportamento dinâmico relacionado à **Eq. 15** será altamente dependente do índice  $n$  de potência, mas não deixa de possuir um aspecto bem característico. Por exemplo, para alguns valores típicos de  $n$ :

- $n = 0$ : este modelo representará o amortecimento de Coulomb;
- $n = 1$ : este modelo representará o amortecimento viscoso;
- $n = 2$ : este modelo representará o amortecimento quadrático

Demais valores de  $n$  poderão representar outros modelos de amortecimento não lineares. Segundo RUZICKA & DERBY (1971), problemas de amortecimento não linear

envolvendo líquidos em tubos fechados e canais abertos em “U” já foram representados utilizando intervalo  $1 < n < 2$ .

Analisando-se graficamente a resposta deste modelo em termos de força  $F_D$  e deslocamento  $u$ , a curva característica é de uma geometria bem delimitada em termos de área (um retângulo de delimitação para ser mais preciso). A figura geométrica resultante só pode ser definida com o termo  $n$  de potência, mas, de forma generalizada, esta que pode ser matematicamente parametrizada pela **Eq. 16** (RUZICKA & DERBY, 1971).

$$\frac{F_D}{F_{Dmax}} = \pm \left( 1 - \frac{u^2}{u_{max}^2} \right)^{\frac{n}{2}} \quad \text{Eq. 16}$$

Os valores de  $F_D$  e  $F_{Dmax}$ , por sua vez, também podem ser quantizados sem maiores problemas. Adotando-se um comportamento de entrada tipo harmônica ao deslocamento, por exemplo, tem-se que (RUZICKA & DERBY, 1971):

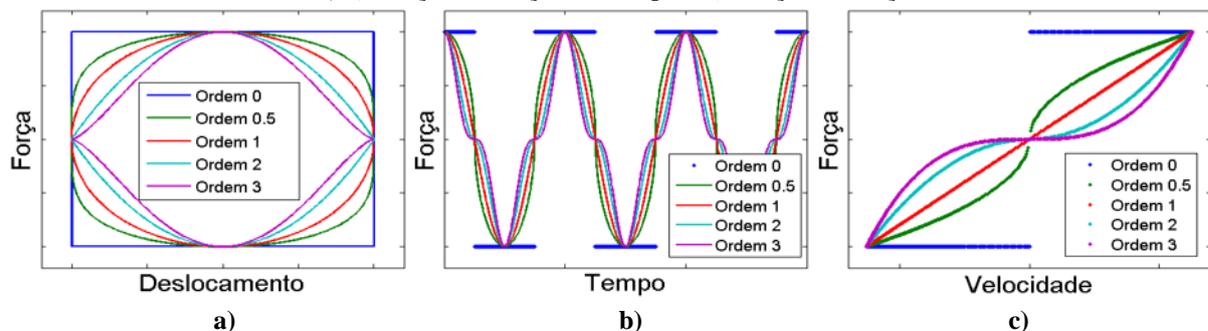
$$F_D = \pm F_{Dmax} \cos^n(\omega t) \quad \text{Eq. 17}$$

e,

$$F_{Dmax} = C_n \omega^n u_{max}^n \quad \text{Eq. 18}$$

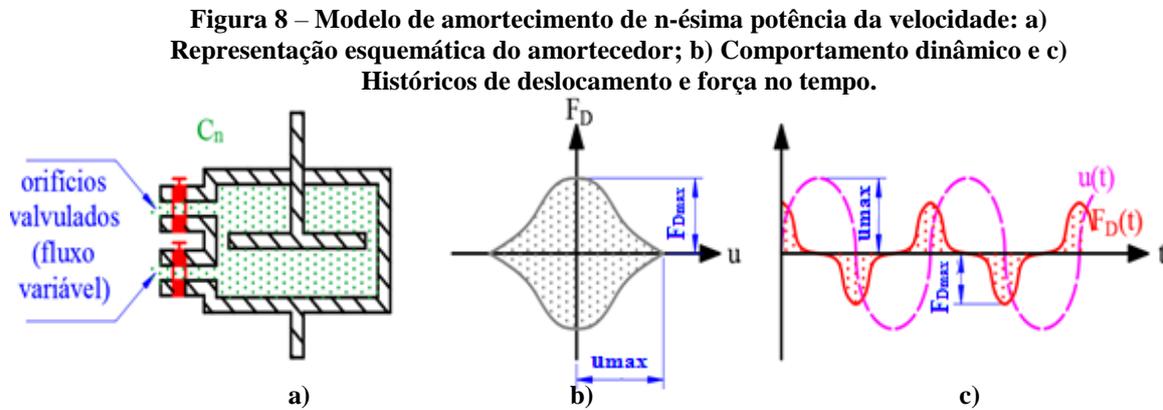
A **Figura 7** apresenta alguns comportamentos para diversos valores de  $n$  em termos de força em função do tempo, força em função da velocidade e força em função do deslocamento:

**Figura 7 – Modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência da velocidade: comportamentos para diversos valores de índices de potência  $n$ : a) Força em função do deslocamento; b) Força em função do tempo e c) Força em função da velocidade.**



Fonte: próprio autor.

A **Figura 8** apresenta o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade em termos de representação esquemática do amortecedor, comportamento dinâmico de força por deslocamento e históricos de deslocamento e força no tempo.



Fonte: Baseado em RUZICKA & DERBY, 1971.

## 2.5. Modelo de Amortecimento Histerético

O termo histerese, originalmente de origem grega, está relacionado com a ideia de “atraso”. Seu conceito está ligado a sistemas não lineares, onde o comportamento depende tanto do estado de solicitação atual quanto de sua história passada (ALMEIDA & COSTA, 2000).

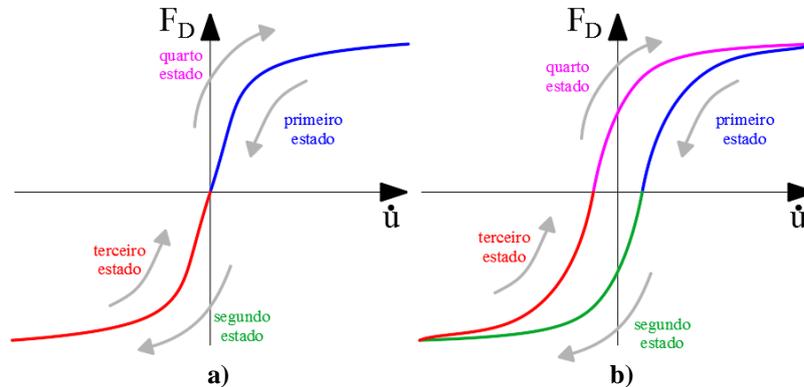
Na engenharia mecânica, área de dinâmica, ele representa a capacidade de preservar seu comportamento ao longo de ciclos de trabalho em termos de representação de força por velocidade. Se um elemento (amortecedor por exemplo) é submetido a um estímulo externo de força e seu comportamento (caminho) é o mesmo ao longo da extensão e também da compressão, então este é dito como não histerético.

CASALOTTI & LACARBONARA (2016) observam que os ciclos fechados apresentam uma divisão em quatro diferentes estados (dois na extensão e dois na compressão):

- Primeiro estado (compressão):  $\Delta \dot{u} \leq 0$  e  $F_D \geq 0$ ;
- Segundo estado (compressão):  $\Delta \dot{u} < 0$  e  $F_D < 0$ ;
- Terceiro estado (extensão):  $\Delta \dot{u} > 0$  e  $F_D < 0$ ;
- Quarto estado (extensão):  $\Delta \dot{u} > 0$  e  $F_D > 0$ .

Caso o elemento não possua característica histerética, o primeiro estado coincide com o quarto e o segundo coincide com o terceiro. A **Figura 9** apresenta um exemplo de ciclos de força por velocidade de um elemento amortecedor sem e com histerese.

**Figura 9 – Exemplo de ciclo de força por velocidade de um elemento amortecedor: a) Comportamento não-histerético e b) Comportamento histerético.**



Fonte: próprio autor.

O amortecimento histerético é um exemplo de fenômeno não linear, onde a força de amortecimento está em fase com a velocidade relativa do sistema e é proporcional ao deslocamento relativo.

Este tipo foi idealizado para servir de base para descrever propriedades de amortecimento interno de materiais sólidos e é bastante conveniente para estes fins, principalmente envolvendo vibrações harmônicas (RUZICKA & DERBY, 1971).

No amortecimento histerético a equação que rege o movimento oscilatório do sistema tem a relação entre a força de amortecimento e a velocidade dada por (RUZICKA & DERBY, 1971):

$$F_D = C(\omega)\dot{u} = \left(\frac{h}{\omega}\right)\dot{u} \quad \text{Eq. 19}$$

sendo  $C(\omega)$  um coeficiente de amortecimento viscoso que varia inversamente com a frequência  $\omega$  e  $h$  uma constante de proporcionalidade denominada coeficiente de amortecimento histerético.

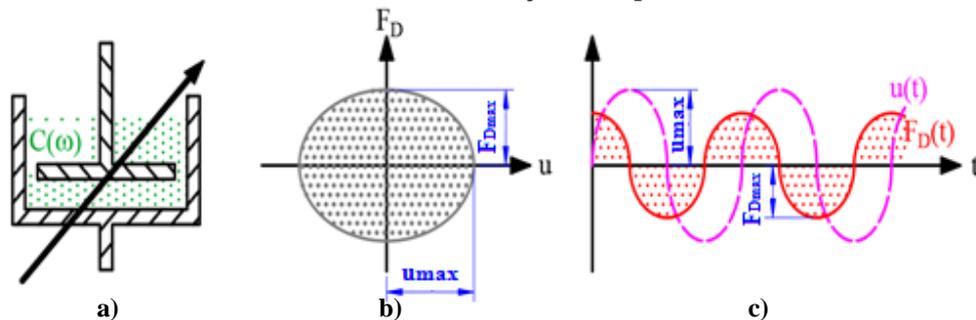
Analisando-se graficamente a resposta deste modelo em termos de  $F_D$  e deslocamento  $u$  a curva característica é também de uma elipse, figura geométrica esta que pode ser matematicamente parametrizada pela **Eq. 2** já descrita anteriormente.

O valor da força  $F_D$  pode ser calculado também pela **Eq. 3**. O valor da força  $F_{D0}$  pode ser também calculado pela **Eq. 4** e incorporando agora a relação entre  $C$ ,  $h$  e  $\omega$  da **Eq. 19** tem-se que (RUZICKA & DERBY, 1971):

$$F_{Dmax} = hu_{max} \quad \text{Eq. 20}$$

A **Figura 10** apresenta o modelo de amortecimento de histerético em termos de idealização, comportamento dinâmico de força por deslocamento e históricos de deslocamento e força no tempo.

**Figura 10 – Modelo de amortecimento histerético: a) Representação esquemática do amortecedor; b) Comportamento dinâmico e c) Históricos de deslocamento e força no tempo.**



Fonte: Baseado em RUZICKA & DERBY, 1971.

Em termos de modelos paramétricos para descrever o amortecimento histerético pode-se citar, como relevantes, o Modelo Paramétrico de Bouc-Wen e também o modelo proposto por WANG et al. (2004), originalmente utilizados para representação de amortecimento tipo magnetoreológico.

## 2.6. Modelo de Amortecimento de Coulomb com Efeito Stribeck

Sobre o modelo de amortecimento de Coulomb clássico pode-se considerar ainda que o coeficiente de atrito não é um valor constante, mas sim representa a existência de dois valores: um estático,  $\mu_{atre}$ , e um dinâmico (seco),  $\mu_{atrd}$ . O valor estático (válido apenas para o repouso) estaria associado a uma força de amortecimento de Coulomb que pode ser designada força de atrito seca e o valor dinâmico (válido apenas para a condição de movimento) estaria associado a uma força de amortecimento e Coulomb que pode ser designada força de atrito, de modo que a **Eq. 8** torna-se agora duas:

$$F_{fe} = \mu_{atre} F_N \quad \text{Eq. 21}$$

e,

$$F_{fd} = \mu_{atrd} F_N \quad \text{Eq. 22}$$

sendo  $\mu_{atre}$  o coeficiente de atrito estático e  $\mu_{atrd}$  o coeficiente de atrito dinâmico.

Sabe-se que o coeficiente de atrito estático supera o coeficiente de atrito dinâmico e, por isso, a magnitude das forças é de tal maneira que a força de amortecimento de Coulomb, para velocidades baixas, logo após o início do movimento diminui com o aumento da velocidade. Este fato é devido exatamente à questão da transição entre o atrito estático para a sua condição de atrito dinâmico (ZEILMANN et al., 2010). Esse fenômeno é conhecido como Efeito Stribeck.

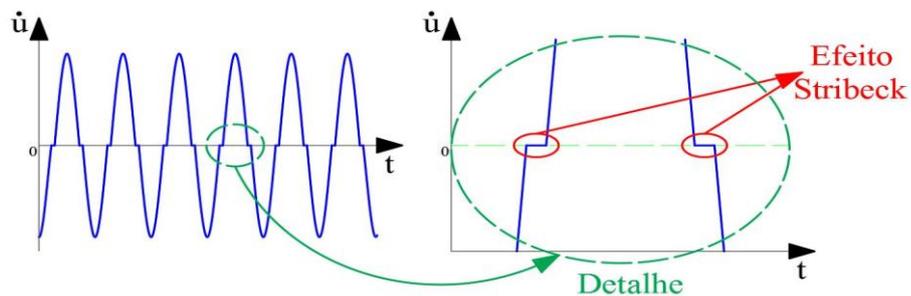
A adição do Efeito Stribeck ao modelo clássico de Coulomb dado pela **Eq. 9** resulta num modelo que apresenta como novidade a existência de uma velocidade limite, denominada Velocidade Stribeck,  $\dot{u}_s$ . Considerando-se a relação entre força de atrito e velocidade relativa por modelo exponencial tem-se (WOJEWODA, 2007; LIU et al., 2015):

$$F_D = \begin{cases} - \left[ F_{fd} + (F_{fe} - F_{fd}) e^{-\left(\frac{|\dot{u}|}{\dot{u}_s}\right)^\alpha} \right] & \text{se } \dot{u} < 0 \\ + \left[ F_{fd} + (F_{fe} - F_{fd}) e^{-\left(\frac{|\dot{u}|}{\dot{u}_s}\right)^\alpha} \right] & \text{se } \dot{u} > 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 23}$$

sendo  $\alpha$  um coeficiente constante de ajuste paramétrico.

Como o efeito Stribeck apenas ocorre na transição de  $\dot{u} = 0$ , uma possibilidade de sua detecção é a observação do comportamento de velocidade por tempo, por exemplo.

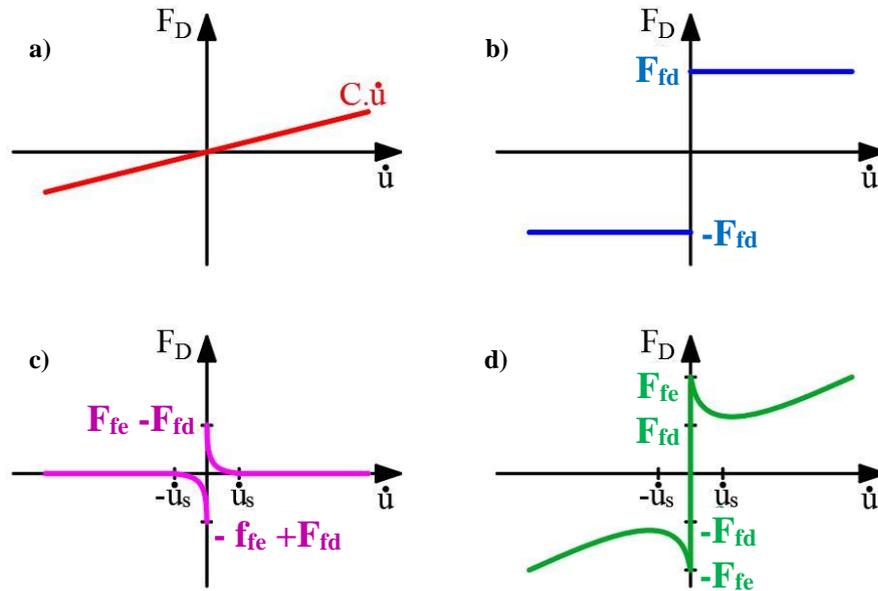
**Figura 11 – Exemplo de resposta de velocidade por tempo com ocorrência do efeito Stribeck no modelo de amortecimento de Coulomb.**



Fonte: Baseado em ZEILMANN et al., 2010.

Em termos de força, a **Figura 12** apresenta uma representação global dos efeitos da força de atrito por velocidade.

**Figura 12 – Representação global dos efeitos da força de atrito pela velocidade:**  
 a) Modelo viscoso; b) Modelo de Coulomb; c) Modelo de atrito Stribeck; d) Modelo combinado de Coulomb mais amortecimento viscoso e efeito Stribeck.



Fonte: Baseado em HVOLDAL & OLESEN, 2011.

Segundo WOJEWODA et al. (2007), além da relação por modelo exponencial  $e^{-\left(\frac{|\dot{u}|}{\dot{u}_s}\right)^\alpha}$  apresentada na Eq. 23, pode-se, ainda, utilizar outras relações conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Relações alternativas ao modelo exponencial apresentado pela Eq. 23 contemplando velocidade Stribeck:**

| Relação entre força de atrito e velocidade relativa contemplando velocidade Stribeck | Termo original da Eq. 23                               | Substituir por   | Fonte Bibliográfica                                 |
|--|--|--|---|
| Gaussiana  | $e^{-\left(\frac{ \dot{u} }{\dot{u}_s}\right)^\alpha}$ | $e^{-\left(\frac{ \dot{u} }{\dot{u}_s}\right)^2}$          | WOJEWODA et al., 2007 apud ARMSTRONG-HÉLOUVRY, 1991 |
| Laurenciana  |  | $\frac{1}{1 + \left(\frac{ \dot{u} }{\dot{u}_s}\right)^2}$ | WOJEWODA et al., 2007 apud HESS & SOOM, 1990        |

Fonte: WOJEWODA et al. (2007).

## 2.7. Modelo de Amortecimento de Dahl

Trata-se de um modelo originalmente idealizado através de dados experimentais onde o proponente, P. R. Dahl, notou que a transição do estado estático para a condição de estado dinâmico não era instantânea, mas sim envolvia um comportamento elástico antes do

deslizamento entre os materiais em contato. Esse movimento elástico antecede o deslizamento e, então, foi proposto que a força de atrito dependesse também da posição,  $u$ , de modo que (GEFFEN, 2009; ZEILMANN et al., 2010; LIU et al., 2015):

$$\frac{dF_D}{du} = \tau \left| 1 - \frac{F_D}{F_f} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right|^\alpha \operatorname{sgn} \left( 1 - \frac{F_D}{F_f} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right) = \tau \left[ 1 - \frac{F_D}{F_f} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right]^\alpha \quad \text{Eq. 24}$$

sendo  $\tau$  um coeficiente constante (constante elástica).

Lembrando a relação primária  $du = \dot{u}dt$  tem-se que:

$$\frac{dF_D}{dt} = \tau \dot{u} \left[ 1 - \frac{F_D}{F_f} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right]^\alpha \quad \text{Eq. 25}$$

Definindo-se  $z$  como deslocamento na zona de pré-deslizamento, pode-se definir a força de atrito como sendo:

$$F_D = \tau z \quad \text{Eq. 26}$$

Substituindo-se a **Eq. 26** na **Eq. 25** tem-se que:

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = \dot{u} \left[ 1 - \frac{\tau z}{F_f} \operatorname{sgn}(\dot{u}) \right]^\alpha \quad \text{Eq. 27}$$

Pela **Eq. 27** nota-se que a força de atrito  $F_f$  pode ser obtida através de integração diferencial do deslocamento na zona de pré-deslizamento  $z$ .

## 2.8. Modelo de Amortecimento de LuGre com Efeito Stribeck

O modelo proposto por Dahl abriu caminho para outros modelos e um deles é o modelo de amortecimento de LuGre com efeito Stribeck. Este modelo contempla as condições já citadas do fenômeno Stribeck, efeito do pré-deslizamento de Dahl e também o atrito viscoso, além da observância do contato entre superfícies dos corpos através de hastes elásticas opostas umas às outras e exercendo forças de atrito proporcionais às suas tensões atuantes (ASTROM & WIT, 2008; ZEILMANN et al, 2010):

Em termos equacionais (HVOLDAL & OLESEN, 2011; LIU et al., 2015):

$$g(\dot{u}) = F_{fd} + (F_{fe} - F_{fd})e^{-\left(\frac{|\dot{u}|}{\dot{u}_s}\right)^\Phi} \quad \text{Eq. 28}$$

sendo  $\Phi$  um parâmetro constante que altera a forma de passagem do atrito estático para o dinâmico e  $\dot{u}_s$  a velocidade Stribeck que é um parâmetro que determina o quão rapidamente  $g(\dot{u})$  se aproxima de  $F_{fd}$ .

Realizando-se a inclusão de duas novas variáveis,  $z$  e  $\tau_0$ , que representam, respectivamente, distância horizontal entre uma haste elástica superior e outra inferior oposta em contato e, constante elástica de relação atrito-deslocamento antes do deslizamento inicial da haste, pode-se descrever a equação diferencial da deflexão da haste como (ASTROM & WIT, 2008; GEFFEN, 2009; ZEILMANN et al, 2010; HVOLDAL & OLESEN, 2011):

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = \dot{u} - \left(\frac{\tau_0|\dot{u}|}{g(\dot{u})}\right)z = \dot{u} - h(\dot{u})z \quad \text{Eq. 29}$$

Segundo os mesmos autores, acrescentando-se mais dois novos parâmetros,  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , que representam, respectivamente, um termo de amortecimento no movimento de pré-deslizamento e um termo de atrito viscoso, o atrito de LuGre com efeito Stribeck é dado por:

$$F_D = \tau_0 z + \tau_1 \dot{z} + \tau_2 \dot{u} = \tau_0 z + \tau_1 \dot{z} + f(\dot{u}) \quad \text{Eq. 30}$$

O modelo original de LuGre é uma opção para descrever sistemas com atrito viscoso, porém não é recomendado para descrever sistemas envolvendo pequenos deslocamentos que mudam rapidamente (DO et al., 2015). No entanto a incorporação do efeito Stribeck amplia sua gama de representatividade para sistemas dinâmicos.

## 2.9. Modelos Típicos de Amortecimento Magnetoreológico

Vários são os modelos propostos para o amortecimento magnetoreológico: além do eventual emprego daqueles apresentados nos itens 2.1 a 2.8 do presente capítulo, estudos específicos de amortecimento envolvendo MRF destacam ainda os seguintes como mais

relevantes (BUTZ & VON STRYK, 1999; KOTINDA & JUNIOR, 2003; SAPINSKI & FILUS, 2003; WANG, 2011; NGUYEN & CHOI, 2012):

- Modelo Paramétrico Plástico de Bingham;
- Modelo Paramétrico de Corpo de Bingham;
- Modelo Paramétrico Modificado de Bingham (Modelo de Gamota-Filisko);
- Modelo Paramétrico de Três Elementos;
- Modelo Paramétrico de BingMax;
- Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear;
- Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido;
- Modelo Paramétrico de Bouc-Wen;
- Modelo Paramétrico Modificado de Bouc-Wen (Modelo de Spencer);

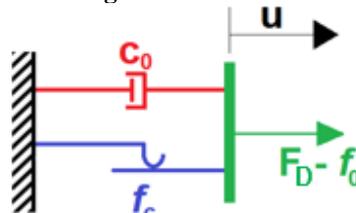
Do ponto de vista de aplicabilidade, os AMR são uma possibilidade bastante promissora para utilização na indústria aeroespacial, seguindo o mesmo princípio da aplicabilidade na indústria automobilística: ótima relação custo/benefício e possibilidade de se desenvolver formas de controle do mesmo para os mais diversos problemas dinâmicos do segmento. Os modelos aqui descritos são tipicamente empregados em AMR mas podem também eventualmente representar outros tipos de amortecedores

### 2.9.1. Modelo Paramétrico Plástico de Bingham

O Modelo de Bingham é utilizado para descrever o comportamento da curva tensão por deformação de um fluido magneto-reológico, relacionando o campo magnético aplicado ao sistema.

O modelo mecânico de Bingham idealiza um elemento representando o atrito de Coulomb em paralelo com um elemento representando amortecimento viscoso ideal, tal como mostrado na **Figura 13**.

**Figura 13 – Modelo de Bingham: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em SAPINSKI & FILUS, 2003.

Por este modelo, considerando-se velocidade inicial do pistão diferente de zero, a força  $F_D$  gerada pelo sistema é dada por (SPENCER et al., 1997; BUTZ & VON STRYK, 1999; SAPINSKI & FILUS, 2003; TUSSET, 2008; AVRAAM, 2009; DE LIMA, 2011; FILHO, 2013):

$$F_D = f_c \operatorname{sgn}(\dot{u}) + C_0 \dot{u} + f_0 \quad \text{Eq. 31}$$

Segundo citado em FILHO (2013), pode-se expressar a força de atrito de Coulomb  $f_c$  da **Eq. 31** em termos da corrente elétrica  $I$ , de modo que:

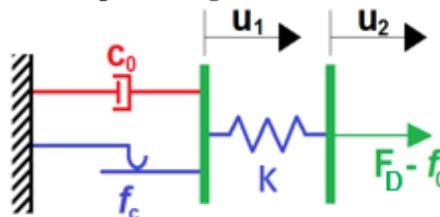
$$f_c(I) = f_{\max} \left( \frac{I}{I_{\max}} \right) \quad \text{Eq. 32}$$

sendo  $f_c(I)$  a força de atrito de Coulomb uma função da corrente elétrica  $I$ ,  $f_{\max}$  a força máxima atuante e  $I_{\max}$  a corrente máxima atuante.

### 2.9.2. Modelo Paramétrico de Corpo de Bingham

O Modelo de Corpo de Bingham difere do anterior pela introdução de uma mola com rigidez elástica  $K$ , conforme **Figura 14**.

**Figura 14 – Modelo de Corpo de Bingham: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em SAPINSKI & FILUS, 2003.

De acordo com este modelo, a força de amortecimento  $F_D$  é dada por (SAPINSKI & FILUS, 2003):

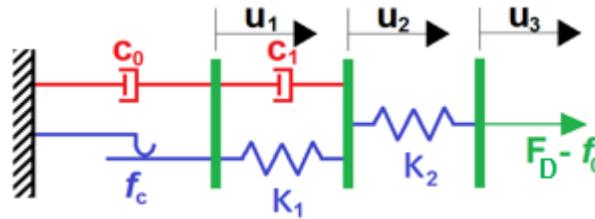
$$F_D = \begin{cases} f_c \operatorname{sgn}(\dot{u}_1) + C_0 \dot{u}_1 + f_0 & \text{para } |F_D| > f_c \\ K(u_2 - u_1) + f_0 & \text{para } |F_D| \leq f_c \end{cases} \quad \text{Eq. 33}$$

sendo  $\dot{u}_1$  e  $\dot{u}_2$  as velocidades,  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador e  $K$  a rigidez elástica da mola.

### 2.9.3. Modelo Paramétrico Modificado de Bingham (Modelo de Gamota-Filisko)

Baseado no Modelo de Bingham, Gamota e Filisko propuseram em 1991 uma complementação levando-se em conta adição de viscosidade plástica e tensão de escoamento, conforme **Figura 15**.

**Figura 15 – Modelo Modificado de Bingham: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em SAPINSKI & FILUS, 2003.

De acordo com este modelo, a força de amortecimento  $F_D$  é dada por (SAPINSKI & FILUS, 2003; TUSSET, 2008; AVRAAM, 2009; DE LIMA, 2011; FILHO, 2013):

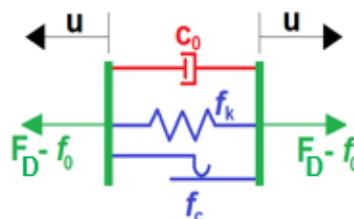
$$F_D = \begin{cases} K_1(u_2 - u_1) + C_1(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + f_0 = & \text{para } |F_D| > f_c \\ = C_0\dot{u}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{u}_1) + f_0 = K_2(u_3 - u_2) + f_0 & \\ K_1(u_2 - u_1) + C_1\dot{u}_2 + f_0 = K_2(u_3 - u_2) + f_0 & \text{para } |F_D| \leq f_c \end{cases} \quad \text{Eq. 34}$$

sendo  $F_D$  a força gerada pelo sistema MR,  $f_c$  a força de atrito de Coulomb,  $\dot{u}_1$ ,  $\dot{u}_2$  e  $\dot{u}_3$  as velocidades,  $C_0$  e  $C_1$  os coeficientes de amortecimento viscoso,  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador e  $K_1$  e  $K_2$  as rigidezes elásticas das molas.

### 2.9.4. Modelo Paramétrico de Três Elementos

O Modelo de Três Elementos foi proposto por Powell em 1994. Ele consiste da idealização de um sistema mecânico contendo um amortecedor viscoso, uma mola não linear e um elemento friccional em paralelo, conforme **Figura 16**. Neste modelo a força de atrito de Coulomb  $f_c$  é modelada como sendo uma combinação entre coeficientes estático e dinâmico,  $f_{cs}$  e  $f_{cd}$ , respectivamente.

**Figura 16 – Modelo de Três Elementos: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

De acordo com este modelo, a força de atrito de Coulomb  $f_c$  é dada por (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$f_c = \begin{cases} f_{cs} \left[ 1 + \left( \frac{f_{cd}}{f_{cs}} \right) e^{-a|\dot{u}|} \right] \cdot \tanh(e \cdot \dot{u}) & \text{para } \ddot{u} \geq 0 \\ f_{cd} [1 - e^{-b|\dot{u}|}] \cdot \tanh(e \cdot \dot{u}) & \text{para } \ddot{u} < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 35}$$

sendo  $f_c$  a força de atrito de Coulomb,  $f_{cs}$  a força de atrito estático,  $f_{cd}$  a força de atrito dinâmico,  $u$  o deslocamento transmitido,  $\dot{u}$  a velocidade,  $\ddot{u}$  a aceleração e  $a$  e  $b$  parâmetros de amortecimento.

A força de amortecimento  $F_D$  é dada por (BUTZ & VON STRYK, 1999):

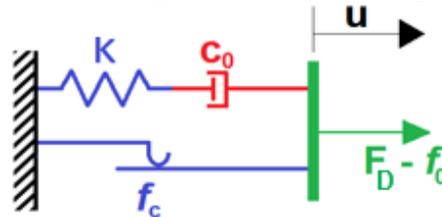
$$F_D - f_0 = f_c + f_k + C_0 \dot{u} \quad \text{Eq. 36}$$

sendo  $F_D$  a força gerada pelo sistema MR,  $f_c$  a força de atrito de Coulomb,  $f_k$  a força não linear da mola, dada por  $f_k = K \tanh(\dot{u})$ ,  $K$  a rigidez elástica da mola,  $u$  o deslocamento,  $\dot{u}$  a velocidade,  $C_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso e  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador.

### 2.9.5. Modelo Paramétrico de BingMax

O Modelo de BingMax consiste da idealização de um sistema mecânico contendo um amortecedor viscoso colocado em série a uma mola e com um elemento friccional em paralelo, conforme **Figura 17**.

**Figura 17 – Modelo de BingMax: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

De acordo com este modelo, a força de amortecimento  $F_D$  é dada por (BUTZ & VON STRYK, 1999):

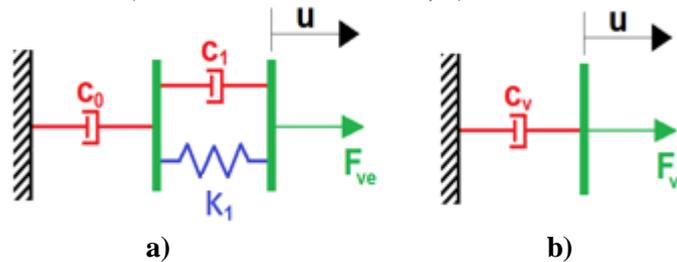
$$F_D + \frac{C_0}{K} \dot{F}_D - f_0 = C_0 \dot{u} + f_c \text{sgn}(\dot{u}) \quad \text{Eq. 37}$$

sendo  $F_D$  a força gerada pelo sistema MR,  $f_c$  a força de atrito de Coulomb,  $\dot{u}$  a velocidade,  $C_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso,  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador e  $K$  a rigidez elástica da mola.

### 2.9.6. Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear

O Modelo Viscoelástico-Plástico Não Linear combina dois mecanismos de fluxo lineares com funções de ponderação não lineares para caracterizar a resposta de um dispositivo de fluido reológico. A sua estrutura reológica é dada pela **Figura 18**.

**Figura 18 – Modelo Viscoelástico-Plástico Não Linear: Estrutura reológica de um AMR. a) Mecanismo viscoelástico; b) Mecanismo viscoso.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

A força viscoelástica,  $F_{ve}$ , do sistema é governada pela seguinte relação (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F_{ve} + \left( \frac{C_1 + C_0}{K_1} \right) \dot{F}_{ve} = C_0 \dot{u} + \left( \frac{C_1 C_0}{K_1} \right) \ddot{u} \quad \text{Eq. 38}$$

sendo  $F_{ve}$  a força viscoelástica,  $u$  o deslocamento,  $\dot{u}$  a velocidade,  $\ddot{u}$  a aceleração,  $C_0$  e  $C_1$  os coeficientes de amortecimento e  $K_1$  a rigidez elástica da mola.

A força viscosa,  $F_{vi}$ , do sistema é governada pela relação apresentada pela **Eq. 1** de modo que (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F_{vi} = C_v \dot{u} \quad \text{Eq. 39}$$

sendo  $F_{vi}$  a força viscosa,  $u$  o deslocamento,  $\dot{u}$  a velocidade e  $C_v$  o coeficiente de amortecimento relacionado com a viscosidade aparente do fluido.

De acordo com este modelo, a força de amortecimento  $F$  é dada por (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F = F_{ve}S_{ve} + F_{vi}S_{vi} \quad \text{Eq. 40}$$

onde  $F$  é a força gerada pelo sistema MR,  $F_{ve}$  é a força viscoelástica,  $F_{vi}$  é a força viscosa e  $S_{ve}$  e  $S_{vi}$  são funções de forma, dadas por:

$$S_{ve} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \tanh \left( \frac{\alpha_1 - \alpha_y}{4\varepsilon_y} \right) \right] \quad \text{Eq. 41}$$

e,

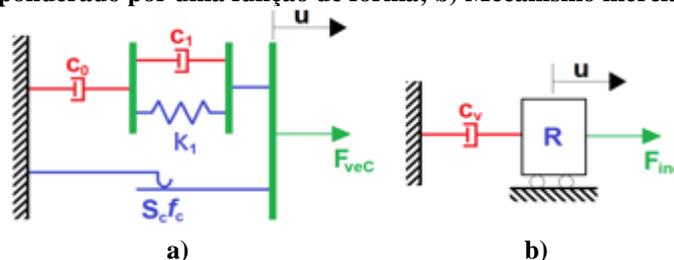
$$S_{vi} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{\alpha_1 - \alpha_y}{4\varepsilon_y} \right) \right] \quad \text{Eq. 42}$$

sendo  $\alpha_1$  a velocidade não dimensionalizada em relação à amplitude,  $\varepsilon_y$  um parâmetro de suavização e  $\alpha_y$  um parâmetro do produto entre o ponto de escoamento do fluido e o parâmetro de suavização.

### 2.9.7. Modelo Paramétrico Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido

O Modelo Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido é baseado no mecanismo viscoelástico do modelo anterior acoplado ao efeito do atrito de Coulomb e a um mecanismo inercial para caracterizar a resposta de um dispositivo de fluido reológico. Sua estrutura é apresentada na **Figura 19**.

**Figura 19 – Modelo Viscoelástico-Plástico Não Linear Estendido: Estrutura reológica de um AMR. a) Mecanismo viscoelástico com atrito de Coulomb ponderado por uma função de forma; b) Mecanismo inercial.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

A força viscoelástica com atrito de Coulomb ponderado por uma função de forma  $F_{veC}$  do sistema é governada pela seguinte relação (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F_{veC} = F_{ve} + S_c f_c \quad \text{Eq. 43}$$

sendo  $F_{veC}$  a força viscoelástica com atrito de Coulomb ponderado por uma função de forma,  $F_{ve}$  a força viscoelástica (Eq. 38),  $u$  o deslocamento,  $f_c$  a força de atrito de Coulomb e  $S_c$  uma função de forma, dada pela Eq. 44.

$$S_c = \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{\dot{u}}{4\varepsilon_c}\right) \quad \text{Eq. 44}$$

sendo  $\dot{u}$  a velocidade do sistema e  $\varepsilon_c$  um parâmetro de suavização.

A força inercial  $F_{ine}$  do sistema é governada pela seguinte relação (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F_{ine} = C_v \dot{u} + R \ddot{u} \quad \text{Eq. 45}$$

sendo  $F_{ine}$  a força inercial,  $u$  o deslocamento,  $\dot{u}$  a velocidade,  $\ddot{u}$  a aceleração,  $C_v$  o coeficiente de amortecimento relacionado com a viscosidade aparente do fluido e  $R$  o coeficiente de massa aparente do fluido.

De acordo com este modelo, a força de amortecimento  $F_D$  é dada por (BUTZ & VON STRYK, 1999):

$$F_D = F_{veC} S_{ve} + F_{ine} S_{vi} \quad \text{Eq. 46}$$

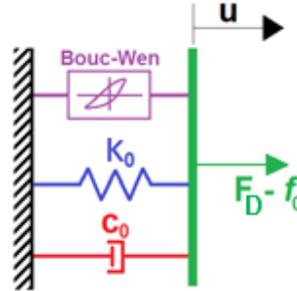
sendo  $F_D$  a força gerada pelo sistema MR,  $F_{veC}$  a força viscoelástica com atrito de Coulomb ponderado por uma função de forma,  $F_{ine}$  a força inercial e  $S_{ve}$  e  $S_{vi}$  funções de forma, dadas pelas Eq. 41 e Eq. 42, respectivamente.

### 2.9.8. Modelo Paramétrico de Bouc-Wen

O Modelo de Bouc-Wen é um modelo utilizado em muito para representar sistemas contendo histerese (principalmente histerese em sistemas envolvendo pressão dinâmica. (SAPINSKI & FILUS, 2003)

Trata-se de aproximação do modelo proposto por Y. Wen em 1976 (BUTZ & VON STRYK, 1999) e segundo os mesmos autores é bastante versátil podendo representar uma grande variedade de comportamentos histeréticos. A **Figura 20** apresenta sua estrutura reológica.

**Figura 20 – Modelo de Bouc-Wen: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

Por este modelo a força  $F_D$  de amortecimento gerada pelo sistema é dada por (SPENCER et al., 1997; BUTZ & VON STRYK, 1999; SAPINSKI & FILUS, 2003; WANG et al., 2004; KWOK et al., 2007; TUSSET, 2008; AVRAAM, 2009; DE LIMA, 2011; FILHO, 2013):

$$F_D = C_0 \dot{u} + K_0(u - u_0) + \alpha_2 z_1 + f_0 \quad \text{Eq. 47}$$

sendo  $F_D$  a força de amortecimento gerada pelo sistema MR,  $u$  o deslocamento,  $u_0$  o deslocamento inicial (condição inicial),  $\dot{u}$  a velocidade,  $C_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso,  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador,  $K_0$  a rigidez elástica da mola,  $\alpha_2$  um parâmetro de ajuste (coeficiente de rigidez associado à evolução da variável  $z$ ) e  $z_1$  um componente histerético que satisfaça a **Eq. 48**.

$$\dot{z}_1 = -\gamma |\dot{u}| z_1 |z_1|^{m-1} - \beta(\dot{u}) |z_1|^m + \lambda \dot{u} \quad \text{Eq. 48}$$

sendo  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  e  $m$  parâmetros de ajuste da linearidade (valores constantes).

Segundo consta em FILHO (2013) pode-se relacionar os parâmetros de ajuste de linearidade das **Eq. 47** e **Eq. 48** em termos da corrente elétrica  $I$ , de modo que:

$$C_0(I) = C_{bw1} + C_{bw2}(1 - e^{-C_{bw3}I}) \quad \text{Eq. 49}$$

$$K_0(I) = K_1 + K_2 \quad \text{Eq. 50}$$

$$\alpha_2(I) = \alpha_3 + \alpha_4 (1 - e^{-\alpha_5 I}) \quad \text{Eq. 51}$$

e,

$$\gamma(I) = -\gamma_1 + \gamma_2(I) \quad \text{Eq. 52}$$

sendo  $C_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso uma função da corrente  $I$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são parâmetros de ajuste de linearidade de amortecimento viscoso,  $K_0$  a rigidez elástica da mola uma função da corrente  $I$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  parâmetros de ajuste de linearidade de rigidez elástica,  $\alpha_2$  o coeficiente de rigidez associado à evolução da variável  $z$  uma função da corrente  $I$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  e  $\alpha_5$  parâmetros de ajuste de linearidade de rigidez associada,  $\gamma$  uma função de linearidade em termos da corrente  $I$ ,  $\gamma_1$  um parâmetro de ajuste da linearidade (valor constante) e  $\gamma_2$  uma função de parâmetro de ajuste da linearidade em termos da corrente  $I$ .

De acordo com o mesmo autor, a interpretação física do modelo e dos parâmetros  $z_1$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $\delta$  é:

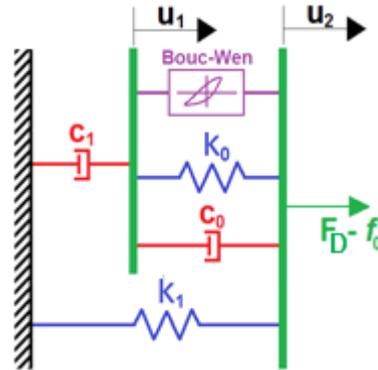
- O objetivo do modelo paramétrico de Bouc-Wen é modelar o laço histerético;
- $z_1 < 0$ : ocorrência do estágio de descarregamento-carregamento;
- $z_1 = 0$ : inclinação do laço histerético é igual a  $\delta$ ;
- $z_1 > 0$ : ocorrência do estágio de carregamento-descarregamento;
- $\beta + \gamma < 0$ : inclinação do laço aumenta com o aumento de  $z_1$ ;
- $\beta + \gamma = 0$ : inclinação do laço permanece constante com o aumento de  $z_1$ ;
- $\beta + \gamma > 0$ : inclinação do laço diminui com o aumento de  $z_1$ ;
- $\gamma - \beta < 0$ : inclinação do laço aumenta com o decréscimo de  $z_1$ ;
- $\gamma - \beta = 0$ : inclinação do laço permanece constante com o decréscimo de  $z_1$ ;
- $\gamma - \beta > 0$ : inclinação do laço diminui com o decréscimo de  $z_1$ ;

#### 2.9.9. Modelo Paramétrico Modificado de Bouc-Wen (Modelo de Spencer)

O Modelo Modificado de Bouc-Wen é um modelo proposto inicialmente em 1996 por B. F. Spencer e outros, com o intuito de modelar sistemas que apresentem uma acentuada redução da força quando a velocidade passe por zero. Consiste na introdução de um amortecedor viscoso em série ao modelo de Bouc-Wen e na introdução de uma mola linear em

paralelo a este amortecedor e ao modelo de Bouc-Wen, conforme **Figura 21**, e é um modelo capaz de reproduzir fielmente o comportamento de um MRF, mesmo uma ampla gama de condições de operação (BUTZ & VON STRYK, 1999).

**Figura 21 – Modelo Modificado de Bouc-Wen: Estrutura reológica de um AMR.**



Fonte: Baseado em BUTZ & VON STRYK, 1999.

Por este modelo a força  $F_D$  gerada de amortecimento pelo sistema é dada por (SPENCER et al., 1997; BUTZ & VON STRYK, 1999; SAPINSKI & FILUS, 2003; SAVARESI et al., 2005; KWOK et al., 2006; TUSSET, 2008; AVRAAM, 2009; (PASCHOAL, 2011; DE LIMA, 2011; FILHO, 2013):

$$\begin{aligned} F_D &= \alpha_6 z_1 + C_0(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + K_0(u_2 - u_1) + K_1(u_2 - u_2^*) \\ &= C_1\dot{u}_1 + K_1(u_2 - u_2^*) + f_0 \end{aligned} \quad \text{Eq. 53}$$

sendo  $F_D$  a força gerada pelo sistema MR,  $\dot{u}_1$  a velocidade no ponto 1 que obrigatoriamente satisfaça a **Eq. 54**,  $\dot{u}_2$  a velocidade no ponto 2,  $u_2^*$  o deslocamento inicial no ponto 2 (condição inicial),  $C_0$  e  $C_1$  os coeficientes de amortecimento viscoso,  $f_0$  a força residual devido à presença do acumulador,  $K_0$  e  $K_1$  as rigidezes elásticas das molas,  $\alpha_6$  um parâmetro de ajuste (coeficiente de rigidez associado à evolução da variável  $z$ ) e  $z_1$  um componente histerético que satisfaça a **Eq. 55**:

$$\dot{u}_1 = \frac{1}{C_0 + C_1} [\alpha_6 z_1 + C_0\dot{u}_2 + K_0(u_2 - u_1)] \quad \text{Eq. 54}$$

e,

$$\dot{z}_1 = -\gamma|\dot{u}_2 - \dot{u}_1|z_1|z_1|^{m-1} - \beta(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)|z_1|^m + \lambda(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad \text{Eq. 55}$$

sendo  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  e  $m$  parâmetros de ajuste da linearidade (valores constantes).

Para se obter um modelo que é válido para diferentes forças do campo magnético, os parâmetros devem ser assumidos para depender da tensão elétrica  $V$  aplicada na bobina do amortecedor, conforme apresentado pelas **Eq. 53**, **Eq. 54** e **Eq. 55** (BUTZ & VON STRYK, 1999).

$$\alpha(v_1) = \alpha_a + \alpha_b v_1 \quad \text{Eq. 56}$$

$$C_1(v_1) = C_{1a} + C_{1b}v_1 \quad \text{Eq. 57}$$

e,

$$C_0(v_1) = C_{0a} + C_{0b}v_1 \quad \text{Eq. 58}$$

sendo  $v_1$  uma componente (função) relacionada à tensão elétrica  $V$  necessária para a dinâmica do MRF,  $\alpha$  uma função de ajuste de rigidez associada,  $C_0$  e  $C_1$  funções de amortecimento viscoso,  $\alpha_a$  e  $\alpha_b$  parâmetros que ajustam a linearidade de  $\alpha$  em função da tensão elétrica  $V$ ,  $C_{0a}$  e  $C_{0b}$  parâmetros que ajustam a linearidade de  $C_0$  em função da tensão elétrica  $V$  e  $C_{1a}$  e  $C_{1b}$  parâmetros que ajustam a linearidade de  $C_1$  em função da tensão elétrica  $V$ .

Por sua vez, a tensão elétrica aplicada  $V$  deve ser governada por um filtro de primeira ordem para permitir a dinâmica do fluido de alcançar equilíbrio reológico:

$$\dot{v}_1 = -\eta(v_1 - V) \quad \text{Eq. 59}$$

sendo  $\dot{v}_1$  a derivada no tempo função  $v_1$  relacionada à tensão elétrica  $V$  necessária para a dinâmica do MRF e  $\eta$  um parâmetro de ajuste associado à evolução de  $v_1$ .

É pertinente ressaltar que o modelo modificado de Bouc-Wen é altamente dependente da concepção e dos componentes do dispositivo de cada MRF específico (BUTZ & VON STRYK, 1999) e é altamente adequado para aplicação em controle.

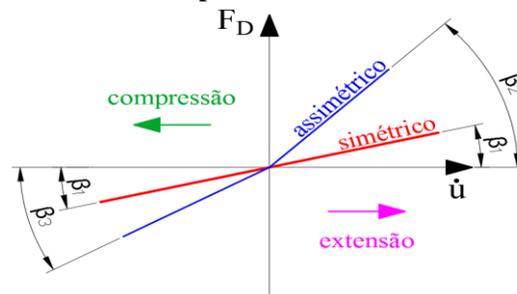
## 2.10. Modelos de Amortecimento com Assimetria

De acordo com FERNANDES (2015), estudos envolvendo o emprego de amortecedores assimétricos são amplamente desenvolvidos, principalmente nos últimos anos e os mesmos revelam que a utilização destes implica em um efeito peculiar onde a posição média

em regime permanente sofre alteração dependendo da razão de assimetria bem como da frequência da fonte excitadora.

Modelos assimétricos apresentam comportamentos diferentes para os semicírculos de velocidade positiva e negativa. Um exemplo é o amortecedor bilinear, que possui um coeficiente de amortecimento,  $C_E$ , na durante a subida do pistão e um coeficiente de amortecimento diferente na descida,  $C_C$ . Em termos comportamentais característicos ao amortecimento, a **Figura 22** apresenta a relação típica comparativa “assimétrico bilinear e simétrico”.

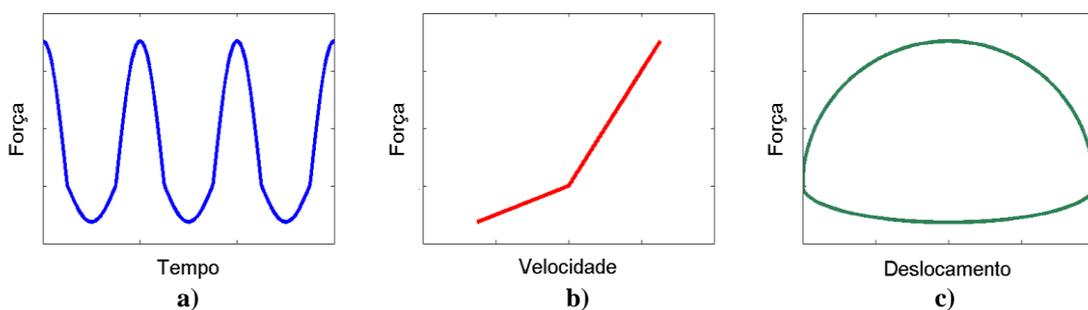
**Figura 22** – Característica da força de amortecimento simétrico e assimétrico para a extensão e compressão de um amortecedor típico.



Fonte: Baseado em FERNANDES, 2015.

A **Figura 23** apresenta alguns comportamentos típicos de amortecimento com assimetria bilinear de força por tempo, força por velocidade e força por deslocamento.

**Figura 23** – Modelo de amortecimento com assimetria bilinear: a) Força por tempo; b) Força por velocidade e c) Força por deslocamento.



Fonte: próprio autor.

DIXON (2007) elucida que as forças de compressão e de extensão exercidas por um amortecedor dentro ou fora de uma dada velocidade mensurada são empiricamente desiguais e esta desigualdade normalmente situa-se na relação de que a força de extensão é de três a quatro vezes maior que a força de compressão. Ainda segundo o mesmo autor, pode-se descrever as forças de extensão  $F_E$  e as forças de compressão  $F_C$  e a força média  $F_m$  como:

$$F_E = (1 + e_D)F_m \quad \text{Eq. 60}$$

$$F_C = (1 - e_D)F_m \quad \text{Eq. 61}$$

$$F_m = \frac{F_E + F_C}{2} \quad \text{Eq. 62}$$

e,

$$e_D = \frac{F_E - F_C}{2F_m} \quad \text{Eq. 63}$$

sendo  $F_E$  a força de extensão,  $F_C$  a força de compressão,  $F_m$  a força média e  $e_D$  um fator de transferência de força para uma velocidade particular.

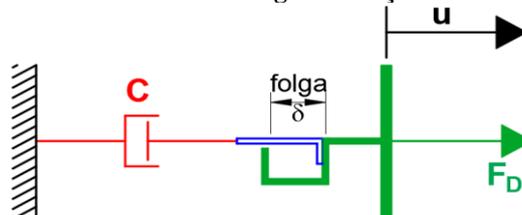
Em termos interpretativos da **Eq. 63**, para alguns valores típicos de  $e_D$ :

- $e_D = -1$ : amortecimento puro de compressão;
- $e_D = 0$ : amortecimento simétrico;
- $0,5 \leq e_D \leq 0,6$ : faixa de valores convencional para a maioria dos amortecedores;
- $e_D = 1$ : amortecimento puro de extensão;

## 2.11. Modelo de Amortecimento com Folga de Fixação

Quanto à modelagem de folga de fixação no amortecimento este ainda é um aspecto muito a ser explorado e esclarecido, mas o seu modelo básico pode ser idealizado conforme **Figura 24**.

**Figura 24 – Modelo básico de folga de fixação no amortecimento.**

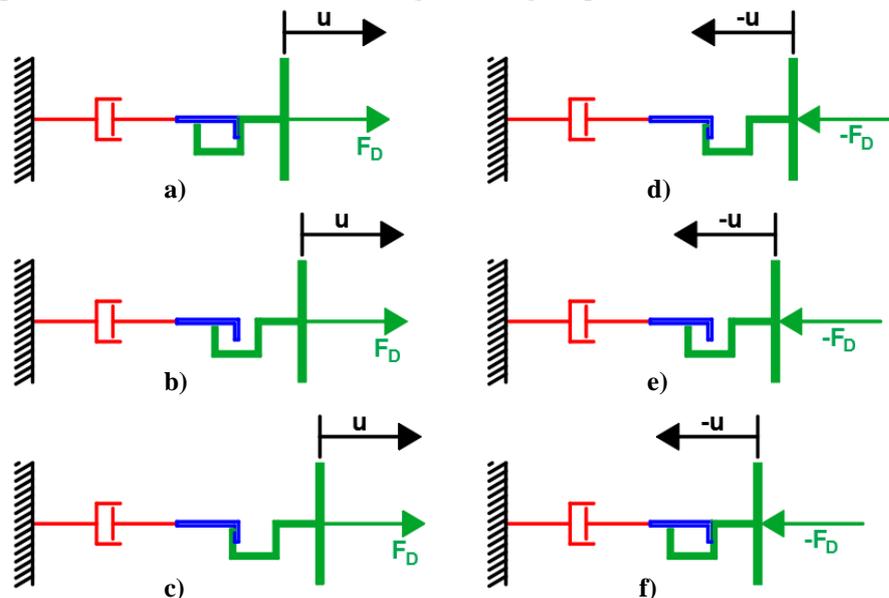


Fonte: próprio autor.

Ainda, com referência a **Figura 24**, um ciclo dinâmico fechado de força por deslocamento pode ser representado como uma composição de seis diferentes estados onde em dois deles ocorre extensão e em dois ocorre compressão:

- Ponto de início:  $u$  tem seu valor mínimo,  $\delta$  existe em seu valor total a ser percorrida e  $F_D = 0$  (para caso de simetria senão  $F_D$  será uma constante e diferente de zero);
- Primeiro estado (extensão):  $u$  crescente,  $\delta$  está sendo percorrida e  $F_D = 0$  (para caso de simetria senão  $F_D$  será uma constante e diferente de zero);
- Segundo estado (estado de contato):  $u = \text{constante}$  e diferente de zero,  $\delta = 0$  e  $|F_D| > 0$  crescente;
- Terceiro estado (extensão):  $u > 0$  crescente,  $\delta = 0$  e  $|F_D| > 0$  iniciando crescente e depois decrescendo;
- Ponto de reversão (início de folga):  $u$  tem seu valor máximo,  $\delta$  existe em seu valor total a ser percorrida e  $F_D = 0$  (para caso de simetria senão  $F_D$  será uma constante e diferente de zero);
- Quarto estado (compressão):  $u$  decrescente,  $\delta$  está sendo percorrida e  $F_D = 0$  (para caso de simetria senão  $F_D$  será uma constante e diferente de zero);
- Quinto estado (estado de contato):  $u = \text{constante}$  e diferente de zero,  $\delta = 0$  e  $|F_D| > 0$  crescente;
- Sexto estado (compressão):  $u < 0$  decrescente,  $\delta = 0$  e  $|F_D| > 0$  iniciando crescente e depois decrescendo;

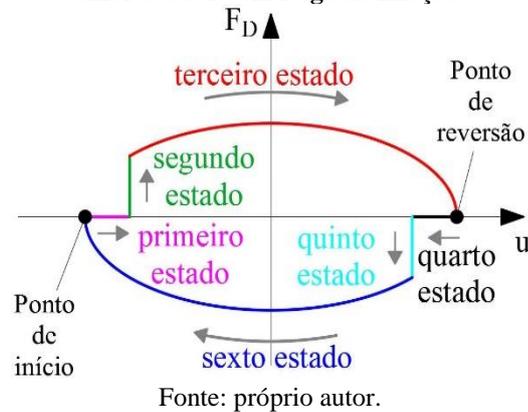
**Figura 25 – Exemplo de ciclo de força por deslocamento de um elemento amortecedor com folga de fixação: a) Ponto de início (folga total a percorrer); b) Primeiro estado (folga sendo percorrida); c) Segundo estado (folga toda percorrida e início do contato e da ação de força) e posteriormente Terceiro estado; d) Ponto de reversão (folga total a percorrer); e) Quarto estado (folga sendo percorrida) e f) Quinto estado (folga toda percorrida e início do contato e da ação de força) e posteriormente Sexto estado.**



Fonte: próprio autor.

A característica não linear deste modelo básico de folga de fixação descrito na **Figura 25** é dada pela **Figura 26**.

**Figura 26** – Característica não linear do modelo básico de um elemento tipo amortecedor com folga de fixação.



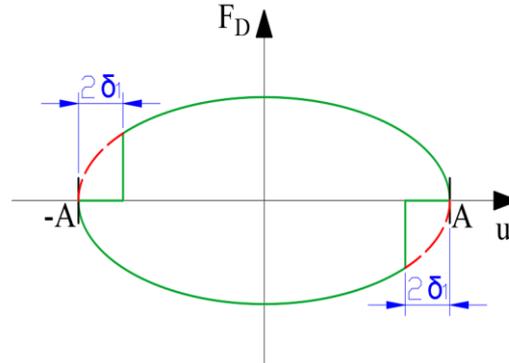
CASTRO et al. (2016) abordam que para idealização de um elemento tipo amortecedor com folga, pode-se partir inicialmente de um elemento linear, cuja força desenvolvida é proporcional à velocidade de deslocamento de modo que:

$$F_D = C\dot{u} = CA\omega\cos(\omega t) \quad \text{Eq. 64}$$

sendo A a amplitude e note que considera-se  $u = A\sin(\omega t)$ .

Os referidos autores também trabalham no pressuposto de que a presença da folga é somente percebida a partir do momento em que a força desenvolvida pelo amortecedor se anula e tem inversão de seu sinal. A partir do instante em que a extremidade do amortecedor atinge o seu ponto de deslocamento máximo. Neste instante, devido à presença de folga, a extremidade do amortecedor desloca-se sem transferir força para o sistema. A transferência de força só vai ocorrer no momento em que o sistema se deslocar e atingir o limite da folga já com uma velocidade não nula. A partir deste instante haverá uma descontinuidade na aplicação da força desenvolvida pelo amortecedor, que passará novamente a ser proporcional à velocidade da sua extremidade. A **Figura 27** ilustra a proposição descrita.

**Figura 27 – Característica não linear de um elemento tipo amortecedor com folga de fixação pelo modelo em desenvolvimento de CASTRO et al.**



Fonte: Baseado em CASTRO et al. (2016).

Segundo estes autores, para um elemento tipo amortecedor com folga deve descrever o comportamento da força gerada em função do deslocamento relativo entre as extremidades. A **Eq. 65** apresenta uma idealização proposta (aproximada) para tanto.

$$F_D \approx \frac{C}{\pi} \left[ \pi - \arccos \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right) + \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right)^2} \right] \dot{u} + \frac{C\varpi}{\pi} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right)^2 \right] u \quad \text{Eq. 65}$$

sendo  $\delta_1$  a metade da folga física.

Pela análise da **Eq. 65** é possível observar que a presença da folga na conexão do amortecedor provoca o surgimento de uma parcela que é proporcional ao deslocamento da extremidade do amortecedor e não apenas à velocidade desse deslocamento. Portanto pode-se dizer que a presença da folga no elemento induz a um termo que tem característica de rigidez (rigidez aparente).

Desmembrando-se o amortecimento com folga em uma parcela de amortecimento equivalente e outra parcela de rigidez aparente tem-se que:

$$C_{eq} = \frac{C}{\pi} \left[ \pi - \arccos \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right) + \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right)^2} \right] \quad \text{Eq. 66}$$

e,

$$K_{ap} = \frac{C\varpi}{\pi} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2\delta_1}{A} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 67}$$

Pelas **Eq. 66** e **Eq. 67** pode-se observar que o amortecimento equivalente  $C_{eq}$  não é afetado pela frequência de movimento do sistema. É afetado somente pelos valores de sua amplitude e da folga. Este fato é esperado em virtude do fato que o amortecimento admitido fora da região de folga é do tipo linear (independe da frequência do movimento). Já a rigidez aparente  $K_{ap}$  é influenciada tanto pelo valor da folga quanto pelos valores da frequência e amplitude do movimento. Portanto, referente à realização de ensaios experimentais visando a determinação de características de impedância de um amortecedor (ou atuador), caso seja detectado situação de folga, poderá ser computada uma parcela de rigidez aparente na impedância do elemento.

### 3. SOBREPOSIÇÃO DE MODELOS DE AMORTECIMENTO E NOVA PROPOSIÇÃO

Frequentemente sistemas mecânicos físicos apresentarão a ocorrência mais de um tipo de amortecimento atuantes. Neste caso ocorrerá a sobreposição de dois ou mais modelos de amortecimento e a modelagem analítica e numérica de tais sistemas substancialmente envolverá maior complexidade.

#### 3.1. Modelo de Histerese e Propriedades MR com Dependência da Corrente Elétrica

Um modelo para amortecimento com sobreposição pertinente a citar é aquele abordado por TUSSET (2008). Trata-se de um modelo dependente da corrente e da histerese e MRF com base na formulação do modelo paramétrico modificado de Bouc-Wen. Neste caso a força do amortecedor pode ser expressa por:

$$F_D = [f_i(I)][f_h(u_2, \dot{u}_2, \ddot{u}_2)] \quad \text{Eq. 68}$$

sendo  $f_i$  uma função que representa a corrente  $I$  e  $f_h$  uma função de histerese que descreve a variação da força em relação ao deslocamento, velocidade e aceleração do pistão do amortecedor, ou seja,

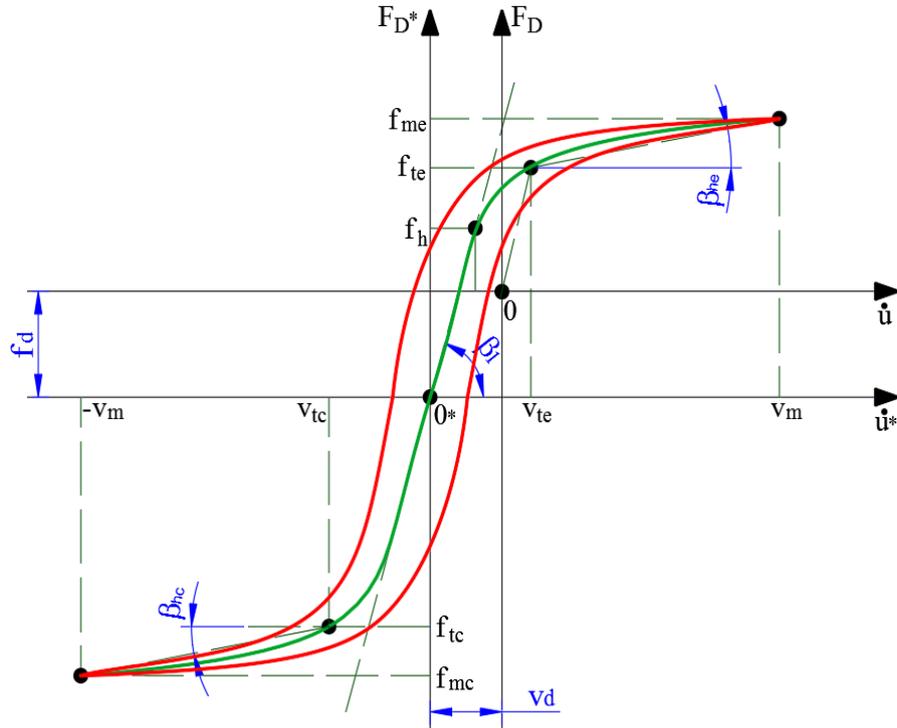
$$F_D = \left[ 1 + \frac{K_2}{1 + e^{-a_2(I-I_0)}} - \frac{K_2}{1 + e^{-a_2 I_0}} \right] [\alpha z_1 + C_0 \dot{u}_2 + (K_0 + K_1)u_2 + K_1 u_1] \quad \text{Eq. 69}$$

Sendo  $I_0$  um parâmetro constante,  $\dot{u}_2$  a velocidade no ponto 2,  $C_0$  o coeficiente de amortecimento viscoso,  $K_0$  e  $K_1$  as rigidezes elástica das molas,  $\alpha$  e  $a_2$  parâmetros de ajuste e  $z_1$  um componente histerético que satisfaça a **Eq. 48**.

#### 3.2. Modelo de Assimetrias, Histerese e Propriedades MR com Dependência de Corrente Elétrica

A modelagem de MRF envolvendo assimetrias (de força e de velocidade) e histerese foi abordada por WANG et al. (2004), embasado originalmente no Modelo Paramétrico de Bouc-Wen. A representação generalizada do modelo idealizado pelos referidos autores está indicada na **Figura 28**.

**Figura 28 – Representação generalizada de assimetrias e histerese no diagrama força-velocidade pelo modelo de WANG et al. (2004).**



Fonte: Baseado em WANG et al. (2004).

No modelo proposto pelos referidos autores a força de amortecimento  $F_D$  é expressa por:

$$F_D = \begin{cases} \left[ f_t \left( \frac{1 - e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}}{1 + e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}} \right) - f_d \right] (1 + k_{vc} |\dot{u}|) & \text{para } \dot{u} \geq 0 \\ \left[ f_t \left( \frac{1 - e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}}{1 + e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}} \right) - f_d \right] (1 + k_{ve} |\dot{u}|) & \text{para } \dot{u} < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 70}$$

Trata-se de um modelo também paramétrico e envolve dezesseis parâmetros a identificar ( $f_{0w}$ ,  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $k_0$ ,  $k_{1c}$ ,  $k_{1e}$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$ ) de modo que:

$$v_d = k_6 v_m \quad \text{Eq. 71}$$

$$f_d = k_5 f_t \quad \text{Eq. 72}$$

$$k_{ve} = k_{1e} e^{-a_4 v_m} \quad \text{Eq. 73}$$

$$k_{vc} = k_{1c} e^{-a_4 v_m} \quad \text{Eq. 74}$$

$$\alpha_w = \frac{a_0}{1 + k_0 v_m} \quad \text{Eq. 75}$$

e,

$$v_h = -\text{sng}(u)k_4v_m \cdot \left(1 + \frac{k_3}{1 + e^{-a_3(I+I_1)}} - \frac{k_3}{1 + e^{-a_3I_1}}\right) \quad \text{Eq. 76}$$

sendo  $v_m = \dot{u}_{\text{maximo}}$  e a força de transição  $f_t$  dada pela **Eq. 77**:

$$f_t = f_{0w}(1 + e^{a_1v_m}) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + e^{-a_2(I+I_0)}} - \frac{k_2}{1 + e^{-a_2I_0}}\right) \quad \text{Eq. 77}$$

sendo  $I$  a corrente elétrica de excitação.

### 3.3. Proposição de um Novo Modelo de Amortecimento com Assimetria em Força e Folga de Fixação

Os amortecedores assimétricos podem ter força descrita por qualquer um dos modelos apresentados em cada um dos semicírculos, aumentando ainda mais a diversidade de modelos que podem ser combinados. Cada caso específico demandará de uma análise preliminar para determinar qual modelo melhor representará as particularidades de cada amortecedor.

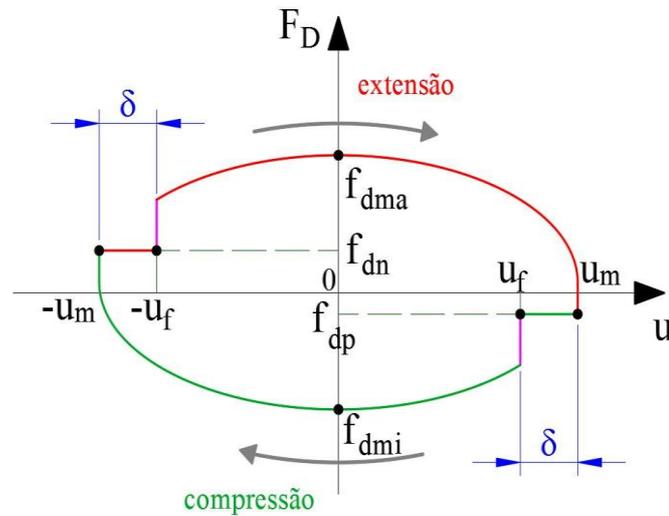
Por exemplo, no caso do modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência de velocidade, baseado na função da **Eq. 15** (RUZICKA & DERBY, 1971) tem-se agora que, de modo genérico, no caso de assimetria em força existem dois coeficientes  $C_n$  e  $n$  agora designados por  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  de modo que:

$$F_D = \begin{cases} C_{n1}|\dot{u}|^{n_{n1}}\text{sng}(\dot{u}) & \text{para } \dot{u} \geq 0 \\ C_{n2}|\dot{u}|^{n_{n2}}\text{sng}(\dot{u}) & \text{para } \dot{u} < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 78}$$

sendo  $C_{n1}$  e  $C_{n2}$  constantes de proporcionalidade e  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  índices de potência.

Mas a proposição da **Eq. 78** ainda não contempla a não linearidade de folga de fixação. Para tanto, propõe-se, baseado no mecanismo de folga de fixação da **Figura 26**, a idealização conforme apresentada na **Figura 29**.

**Figura 29 – Representação generalizada de assimetria em força e folga de fixação no diagrama força-deslocamento.**



Fonte: próprio autor.

Em termos deste novo modelo paramétrico, baseado na **Eq. 78**, seis parâmetros são necessários a identificar:

- $C_{n3}$  é uma constante de proporcionalidade;
- $n_{n3}$  é um índice de potência;
- $f_{n3}$  é uma constante de proporcionalidade de força;
- $\delta$  é uma constante e representa a folga física de fixação do amortecedor;
- $f_{dn}$  é a força onde ocorre a folga com  $u < 0$ ;
- $f_{dp}$  é a força onde ocorre a folga com  $u > 0$ .

Pela **Figura 29** algumas das considerações são:

$$u_m = \text{máximo}(u) \quad \text{Eq. 79}$$

$$f_{dma} = \text{máximo}(F_D) \quad \text{Eq. 80}$$

$$f_{dmi} = \text{mínimo}(F_D) \quad \text{Eq. 81}$$

e

$$\delta = u_m - u_f \quad \text{Eq. 82}$$

sendo  $u_m$  o deslocamento máximo e  $u_f$  o deslocamento onde ocorre o contato.

Em termos de novo modelo proposto, a força de amortecimento que governa tal sistema pode ser expressa em termos do deslocamento e velocidade de modo que:

$$F_D = \begin{cases} f_{dp} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| > u_m - \delta \text{ e } \dot{u} < 0 \\ f_{dn} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| > u_m - \delta \text{ e } \dot{u} \geq 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) + f_{n3} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| \leq u_m - \delta \text{ e } \dot{u} > 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| \leq u_m - \delta \text{ e } \dot{u} \leq 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) + f_{n3} & \text{para } u\dot{u} \geq 0 \text{ e } \dot{u} > 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } u\dot{u} \geq 0 \text{ e } \dot{u} \leq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 83}$$

sendo  $f_{dn}$  força onde ocorre a folga em  $u < 0$  (compressão),  $f_{dp}$  força onde ocorre a folga em  $u > 0$  (extensão),  $f_{n3}$  uma constante de proporcionalidade de força,  $C_{n3}$  uma constante de proporcionalidade,  $n_{n3}$  um índice de potência,  $\delta$  a folga de fixação,  $\text{sgn}$  função sinal, e  $u$  e  $\dot{u}$  deslocamento e velocidade, respectivamente.

É importante salientar que tal modelo proposto na **Eq. 83** é incapaz de representar o efeito de histerese, pois na transição de  $\dot{u} = 0$ , tanto na extensão quanto na compressão, a mesma relação é utilizada para representar os percursos do movimento do amortecedor.

Em termos de aplicabilidade, uma vez obtida a curva experimental pode-se recorrer a uma detecção automática da folga, pois esta possui localização definida em duas regiões: ocorre nas imediações de  $-u_m$  e de  $+u_m$  e, durante sua ocorrência, as forças de amortecimento  $f_{dp}$  e  $f_{dn}$  são constantes. Tal detecção é bastante conveniente na engenharia mecânica em termos, por exemplo, de manutenção preditiva de sistemas dinâmicos que possuam o elemento amortecedor.

## 4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a realização dos procedimentos experimentais inicialmente foram selecionados três amortecedores diversificados, cada qual com suas características construtivas particulares e fora também necessária a utilização de equipamentos e instrumentos, bem como adoção de uma metodologia.

### 4.1. Amortecedores Utilizados

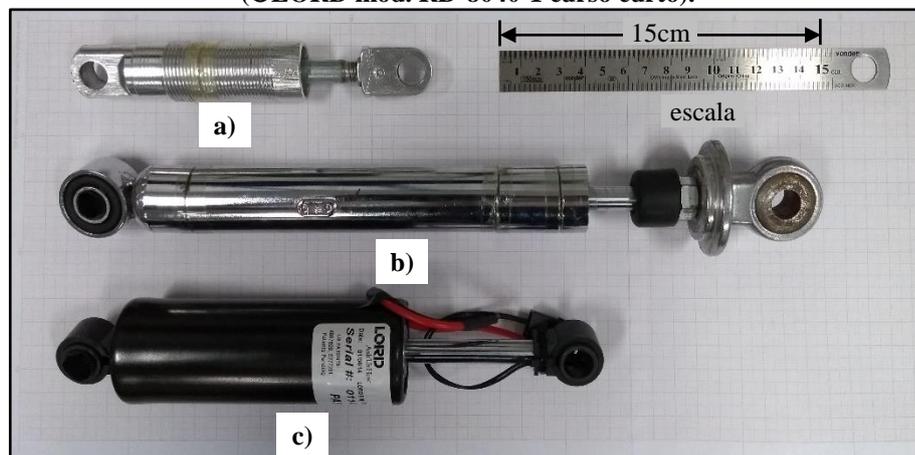
A caracterização experimental desta tese foi baseada no emprego dos amortecedores apresentados na **Tabela 2**. O critério de seleção foi a disponibilidade de aquisição comercial, aplicabilidade na engenharia mecânica (e demais áreas de conhecimento) e a sua idealização construtiva (tipo) onde, de forma conveniente, optou-se por um modelo seco, um modelo misto (hidropneumático) e um terceiro magnetoreológico. A **Figura 30** apresenta os amortecedores utilizados.

**Tabela 2 - Amortecedores comerciais utilizados experimentalmente.**

| Código | Tipo                                  | Fabricante / Modelo                     | Aspecto Construtivo | Curso* [mm] | Fluido de Trabalho  |
|--------|---------------------------------------|---|---------------------|-------------|---|
| AP     | Amortecedor seco (Pneumático)         | LU JIN mod. LJ400AX (com mola retirada) | Especial Monotubo   | 27          | (provável ar)   |
| AH     | Amortecedor viscoso (Hidropneumático) | SCUD mod. 10010006 (com mola retirada)  | Convencional Bitubo | 50          | Óleo Industrial (provável ISO VG 15) e gás (ar e/ou nitrogênio) |
| MR     | Amortecedor Magnetoreológico          | ©LORD mod. RD-8040-1 curso curto        | Especial Monotubo   | 55          | Magnetoreológico (MRF-122 EG)                                   |

\*Curso útil do pistão (abertura máxima menos abertura mínima)

**Figura 30 – Amortecedores utilizados: a) Amortecedor AP (LU JIN mod. LJ400AX); b) Amortecedor AH (SCUD mod. 10010006) e c) Amortecedor MR (©LORD mod. RD-8040-1 curso curto).**



Fonte: próprio autor.

#### 4.1.1. Amortecedor AP

O amortecedor AP estudado é geralmente adquirido em um conjunto de configuração em paralelo de mola e amortecedor (**Figura 31a**). Este tipo de modelo é comumente utilizado originalmente em bicicletas do tipo *mountain bike*, conforme ilustrado na **Figura 31b**. Após a realização dos ensaios foi feita uma investigação por desmontagem do elemento, constatando realmente tratar-se de um amortecedor do tipo seco (câmara de ar). Para maiores informações sobre aspectos internos construtivos vide APÊNDICE D.

**Figura 31 – a) Amortecedor AP: Fabricante LU JIN mod. LJ400AX; b) Aplicação original do amortecedor AP: bicicletas do tipo *mountain bike*.**



Fonte: a) [http://www.diytrade.com/china/pd/571809/SHOCK\\_ABSORBER\\_LJ\\_400AX.html](http://www.diytrade.com/china/pd/571809/SHOCK_ABSORBER_LJ_400AX.html) e  
b) <http://buysoftcialisonline.com/category/mountain-bike/> (imagem direita)

#### 4.1.2. Amortecedor AH

O amortecedor AH estudado também é geralmente adquirido em um conjunto de configuração em paralelo de mola e amortecedor (**Figura 32a**). Este tipo de modelo é comumente utilizado em motocicletas fabricante ©HONDA, modelos TITAN/FAN, comercializadas entre os anos de 2000 a 2009, conforme ilustrado na **Figura 32b**. Após a realização dos ensaios foi feita uma investigação por desmontagem do elemento, constatando realmente tratar-se de um amortecedor do tipo hidropneumático (construção convencional bitubo, com óleo e gás). Para maiores informações sobre aspectos internos construtivos vide APÊNDICE D.

**Figura 32 – a) Amortecedor AH: Fabricante SCUD mod. 10010006; b) Aplicação original do amortecedor AH: motocicletas fabricante ©HONDA modelos TITAN/FAN fabricadas entre os anos de 2000 a 2009.**



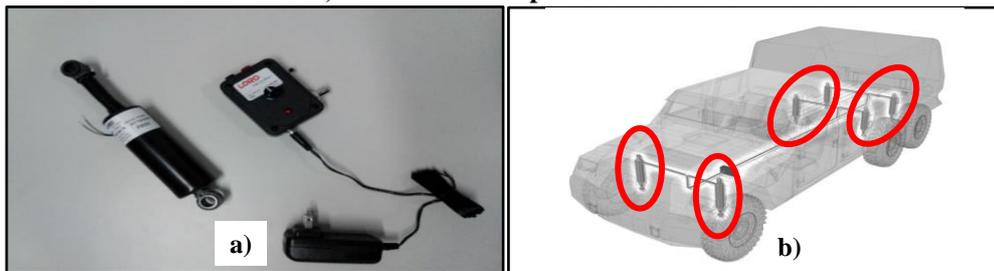
Fonte: a) <http://www.scud.com.br> e  
b) [http://fichatecnica.motosblog.com.br/FichaTecnica/Honda/CG\\_150\\_Titan\\_ES\\_2004](http://fichatecnica.motosblog.com.br/FichaTecnica/Honda/CG_150_Titan_ES_2004).

### 4.1.3. Amortecedor MR

O amortecedor MR estudado é geralmente adquirido individual, diferentemente do AP e AH, e funciona acoplado a um kit controlador denominado “*Wonder Box*” que permite operação com pulso por controle manual ou externo, sendo que o sistema manual necessita de um potenciômetro (amperímetro), conforme mostra a **Figura 33a**. Este tipo de amortecedor é originalmente utilizado em uma vasta gama de aplicações industriais que, segundo o fabricante, vai desde emprego em veículos militares, suspensão automotiva em carros esportivos, indústria aeroespacial e sistemas diversos, como substituto aos sistemas de suspensão convencionais, em qualquer condição de aplicabilidade onde se deseje a vantagem de permitir adaptação à condição dinâmica, proporcionando estabilidade melhorada em relação aos amortecedores passivos convencionais. A **Figura 33b** ilustra uma de suas aplicações: suspensão de veículos militares.

O fabricante ©*LORD Corporation* disponibiliza dados técnicos em relação a comportamento elétrico e mecânico deste sistema, mas dados construtivos (dimensionais internos) não são informados. Pelo motivo de custo não houve, neste caso, a investigação por desmontagem do elemento.

**Figura 33 – a) Amortecedor MR: Fabricante ©LORD mod. RD-8040-1 (curso curto); b) Exemplo de aplicação do amortecedor MR: aplicações diversas automotivas, incluindo em suspensão de veículos militares.**



Fonte: a) próprio autor e b) catálogo técnico ©LORD OD PB7138 Rev. 4 07/10.

## 4.2. Equipamentos e Instrumentos Utilizados

Para possibilitar a execução dos ensaios envolvendo os amortecedores AP, AH e MR adotados foi necessário a preparação do aparato experimental envolvendo equipamentos e instrumentos laboratoriais. Em relação aos equipamentos e instrumentos utilizados, a **Tabela 3** apresenta a listagem em ordem alfabética.

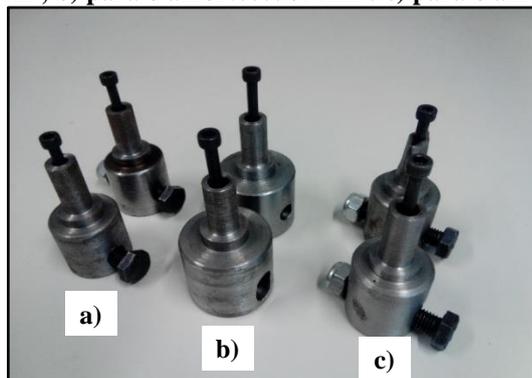
**Tabela 3 - Equipamentos e instrumentos necessários para os ensaios.**

| Item | Descrição  | Quantidade |
|------|--|------------|
| ME1  | Máquina de Ensaios MTS mod. 647 Hydraulic Wedge Grip #661.20H-03 BY 79, com transdutor de força MTS mod. 661.20H-03 SN 379538 cap. 100kN e microcomputador com software de aquisição de dados MTS FLEXTEST® 40 instalado e operacional | 1 CONJ     |
| ME2  | Módulo de aquisição de dados Switch para temperatura AGILENT mod. 34970A e microcomputador com software de aquisição de dados BenchLink Data Logger 3® v.4.3 instalado e operacional   | 1 CONJ     |
| ME3  | Multímetro Digital MINIPA mod. ET-1100 DMM com cabeamento montado (3 metros)   | 1 CONJ     |
| ME4  | Paquímetro analógico DIGIMESS mod. 100.001A de curso 7”  | 1 UNID     |
| ME5  | Suportes de fixação para o amortecedor AP (uma peça inferior com furo reto e uma peça superior com furo oblongo)   | 1 CONJ     |
| ME6  | Suportes de fixação para o amortecedor AH (uma peça inferior com furo reto e uma peça superior com furo oblongo)   | 1 CONJ     |
| ME7  | Suportes de fixação para o amortecedor MR (uma peça inferior com furo reto e uma peça superior com furo oblongo)   | 1 CONJ     |
| ME8  | Termopar tipo “T”  | 4 UNID     |

O instrumento ME4 foi utilizado para conferência de alinhamento dos amortecedores e seus suportes na máquina de ensaios, o instrumento ME3 foi utilizado apenas para ensaios no amortecedor MR (com MRF) e os sensores ME8 foram utilizados fixados ao corpo externo dos amortecedores, em locais previamente selecionados.

A fixação dos amortecedores nas pinças da máquina (item ME1) demandou a confecção de suportes de fixação (itens ME5, ME6 e ME7 da **Tabela 3**) de maneira que estes permitissem o correto encaixe dos elementos. Outra função atribuída a estes suportes foi a de promover a folga de fixação desejada de modo a permitir sua regulagem. Para tanto os suportes foram idealizados com uma regulagem de folga no seu centro de modo a permitir situações de folga zero ou folga de amplitude regulável. A **Figura 34** apresenta tais suportes idealizados e fabricados.

**Figura 34 – Suportes de fixação para os amortecedores utilizados: a) para o amortecedor AP; b) para o amortecedor AH e c) para o amortecedor MR.**



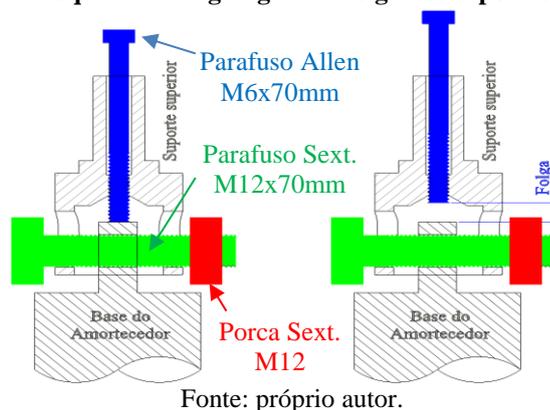
Fonte: próprio autor.

Os suportes foram confeccionados a partir de uma barra redonda de aço carbono ASTM SAE 1008 laminado de diâmetro original duas polegadas ( $\text{\O}2''$ ), trabalhada através de processos de usinagem (torneamento, furação e fresamento), cujas geometrias foram particulares a cada suporte. A opção pelo aço ASTM SAE 1008 foi baseada na magnitude das forças dos elementos amortecedores, sendo este suficiente para possibilitar as condições dinâmicas propostas. Em elementos que eventualmente envolvessem amplitudes de forças maiores aconselhar-se-ia a confecção dos suportes em material menos dúctil, como por exemplo aço ASTM SAE 1045 trefilado. Para detalhes geométricos dos suportes vide APENDICE E.

Para cada amortecedor objeto de estudo foram confeccionados dois suportes, um superior e um inferior. O suporte inferior é aquele que sempre esteve acoplado ao pistão do amortecedor e este era sempre regulado para folga zero. Este suporte se movimentava junto com o pistão pois a máquina de ciclagem realizava o deslocamento pela parte inferior. O suporte superior é aquele que sempre esteve acoplado ao corpo do amortecedor e este permitia a opção de folga na condição zero ou existência de folga, com magnitude regulável. Para tanto sua furação de fixação ao amortecedor foi feita através de furos oblongos.

A regulagem da folga foi feita através de um parafuso Allen DIN912 na medida M6x70mm e a fixação dos suportes aos amortecedores foi feita por um parafuso sextavado DIN933 classe 8.8 na medida M12x70mm e porca sextavada DIN985 autotravante tipo Parlock também M12. A **Figura 35** apresenta o mecanismo de regulagem de folga idealizado e utilizado na fixação dos suportes superiores dos amortecedores.

**Figura 35 – Esquema de regulagem de folga nos suportes superiores.**



### 4.3. Metodologia de Ensaios

A **Tabela 4** apresenta em ordem sequencial os procedimentos que foram realizados para execução de todos os ensaios:

**Tabela 4 - Procedimentos metodológicos necessários para os ensaios.**

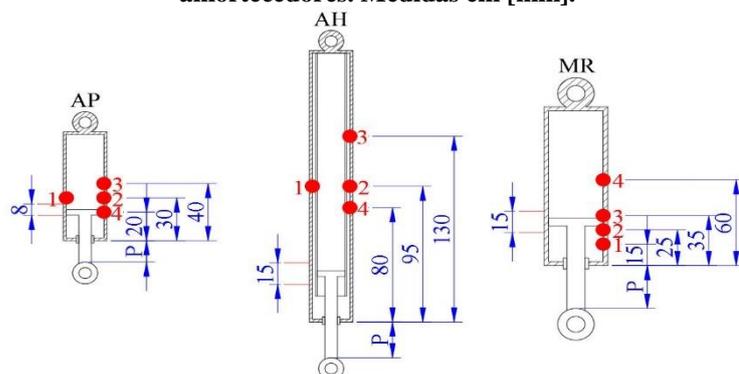
| Procedimento | Descrição  |
|--------------|--|
| PM1          | Fixação do amortecedor à máquina de ensaios com utilização dos respectivos suportes de fixação (vide APÊNDICE E para maiores informações sobre os suportes)  |
| PM2          | Conferência e alinhamento do amortecedor à máquina   |
| PM3          | Fixação da instrumentação de temperatura (termopares) ao amortecedor   |
| PM4          | <i>Startup</i> do módulo de aquisição de dados e software de aquisição com teste inicial sem fins de registro  |
| PM5          | <i>Start</i> da máquina e realização dos ensaios e geração dos arquivos digitais de dados (saídas de dados: força, deslocamento, tempo e temperatura do corpo externo do amortecedor)  |
| PM6*         | <i>Start</i> da máquina e realização dos ensaios com utilização do multímetro para variação do parâmetro de corrente elétrica e geração dos arquivos digitais de dados (saídas de dados: força, deslocamento, tempo e temperatura do corpo externo do amortecedor) |

\* O procedimento PM6 foi utilizado apenas para o amortecedor MR.

Relativo ao alinhamento dos amortecedores em seus respectivos suportes, a conferência foi realizada de maneira que o paquímetro foi utilizado em conjunto com um escalímetro e mediu-se as posições de centro a centro dos suportes (vista frontal e vista lateral) para obter-se uma posição correta de aperto dos suportes nas pinças da máquina de ensaios.

Em termos de sensoriamento de temperatura, a **Figura 36** ilustra os locais onde foram instalados os sensores de temperatura (termopares) nos três tipos de amortecedores utilizados nos ensaios. A adoção das coordenadas destes pontos fora baseada na condição de posição de referência de abertura do êmbolo do amortecedor, observando-se o limite físico de deslocamento de cada um deles e uma estimativa da região de escoamento interno de fluido (para os amortecedores AP e MR) e baseada na condição mediana do comprimento total da camisa do amortecedor (para o amortecedor AH).

**Figura 36 - Posições de referência de fixação dos termopares aos amortecedores. Medidas em [mm].**



Fonte: próprio autor.

Os ensaios envolveram as seguintes condições/configurações:

- Posição de referência de abertura dos êmbolos dos amortecedores: aproximadamente meio do curso do amortecedor (conforme valores indicados na **Tabela 5**);
- Temperatura ambiente do laboratório: 24°C;
- Intervalo de amostragem de tempo para ciclagem:  $\Delta t_c = 9,766 \times 10^{-4} \text{s}$ ;
- Intervalo de amostragem de tempo para temperatura:  $\Delta t_T = 0,5 \text{s}$ ;
- Frequências de ciclagem utilizadas: 1, 3 e 5 Hz (amortecedores AP e AH)  
1, 2 e 3 Hz (amortecedor MR)
- Correntes elétricas de excitação para MR: 0 – 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 e 0,6A;
- Amplitudes de deslocamentos utilizados, também conforme **Tabela 5**;
- Ensaios de curta duração: ensaios com até 450 ciclos de duração;
- Ensaios de longa duração: ensaios com mais de 450 ciclos de duração;

**Tabela 5 - Amplitudes de deslocamentos utilizados nos ensaios.**

| Amortecedor | Amplitude 1<br>[mm] | Amplitude 2<br>[mm] | Amplitude 3<br>[mm] | Posição<br>[mm] |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| AP          | ± 1,0               | ± 2,5               | ± 4,0               | 15              |
| AH          | ± 2,5               | ± 5,0               | ± 7,5               | 25              |
| MR          | ± 2,5               | ± 5,0               | ± 7,5               | 30              |

A posição de referência de abertura dos êmbolos dos amortecedores foi baseada na condição de média entre o êmbolo todo recolhido na camisa e o êmbolo na abertura máxima fora da camisa, proporcionando segurança contra danos nos elementos durante os ensaios.

A escolha das frequências de ensaios foi baseada na questão de segurança contra eventuais danos nos elementos e máquina de ensaios, bem como observação de faixas similares utilizadas por outros autores em trabalhos experimentais similares.

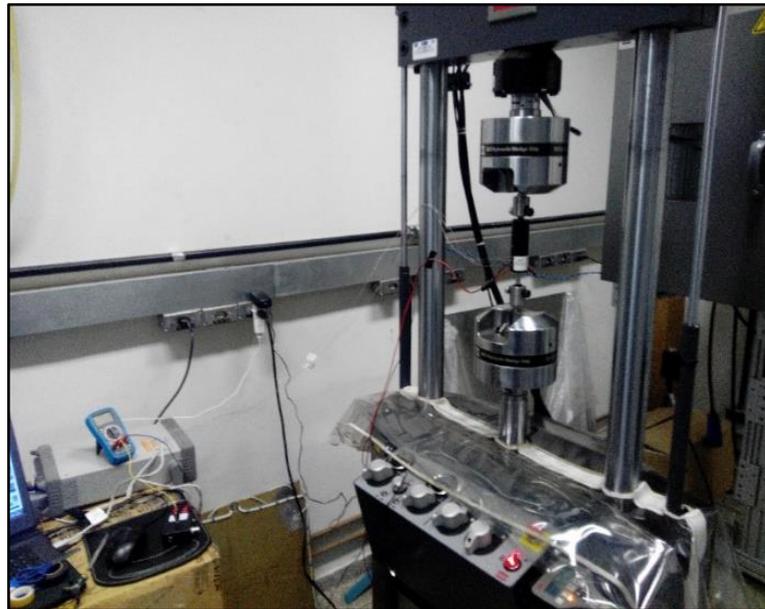
A adoção das correntes elétricas de excitação para o amortecedor MR foi realizada baseada na recomendação do fabricante do elemento de manter o mesmo abaixo de 1A na condição intermitente de trabalho, estipulando-se 60% deste valor, portanto, 0,6A como máxima corrente ensaiada.

As amplitudes de deslocamento adotadas foram baseadas respeitando-se a adoção da posição de referência de abertura de cada amortecedor e a limitação física (abertura máxima do êmbolo), de modo a não acarretar em danos aos elementos durante os ensaios.

Para maiores informações sobre as baterias de ensaios experimentais realizados, tais como codificação elaborada, vide APÊNDICE A.

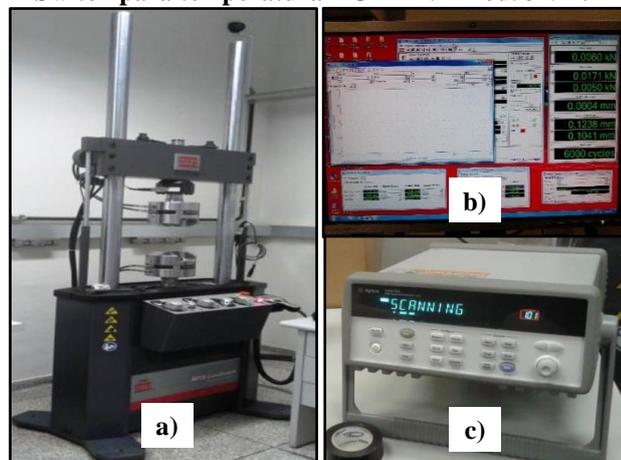
A **Figura 37** apresenta a montagem experimental típica aplicada para a realização dos procedimentos e as **Figura 38**, **Figura 39**, **Figura 40** e **Figura 41** apresentam detalhes da montagem experimental para cada amortecedor utilizado, AP, AH e MR, respectivamente.

**Figura 37 – Exemplo de montagem experimental realizado: ensaio E62 (amortecedor MR).**



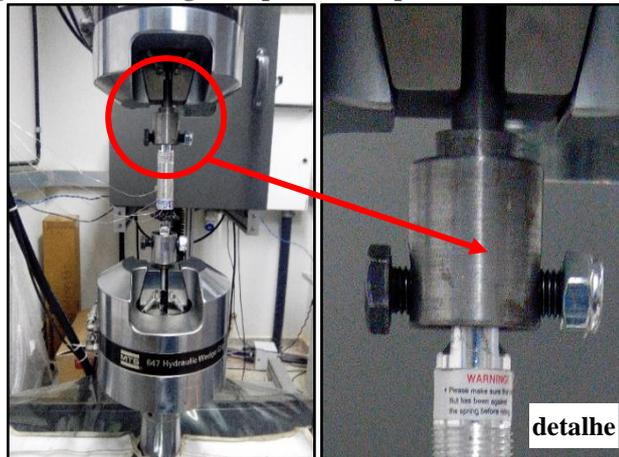
Fonte: próprio autor.

**Figura 38 – a) Máquina de Ensaio MTS mod. 647 Hydraulic Wedge Grip #661.20H-03 BY 79, com transdutor de força MTS mod. 661.20H-03 SN 379538 cap. 100kN; b) Microcomputador com software de aquisição de dados MTS FLEXTTEST® 40 instalado e operacional e c) Módulo de aquisição de dados Switch para temperatura AGILENT mod. 34970A**



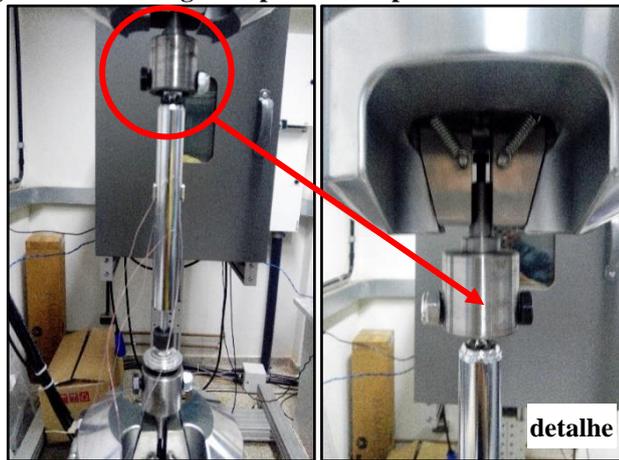
Fonte: próprio autor.

**Figura 39 – Montagem experimental para o amortecedor AP.**



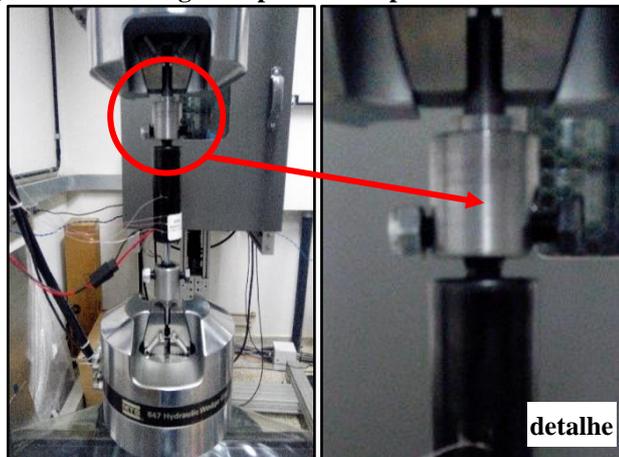
Fonte: próprio autor.

**Figura 40 – Montagem experimental para o amortecedor AH.**



Fonte: próprio autor.

**Figura 41 – Montagem experimental para o amortecedor MR.**



Fonte: próprio autor.

## 5. IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA

Através dos procedimentos experimentais, os dados disponibilizados pelo sistema da máquina MTS, através de seu software FLEXTTEST® 40, foram arquivos no formato .DAT que podem ser acessados por qualquer editor de textos, incluindo o mais simples, o “Bloco de notas”. Esses dados possuem a configuração de modo que a primeira coluna de dados representa o tempo e a segunda e terceira representam o deslocamento e a força, respectivamente.

**Figura 42 – Exemplo de arquivo .DAT gerado experimentalmente: a primeira coluna representa tempo, a segunda representa deslocamento e a terceira representa força.**

| t           | u              | F              |             |
|-------------|----------------|----------------|-------------|
| 0.017578125 | 0.00032745302  | -0.0023220694  | 0.01953125  |
| 0.018554688 | -0.0013051555  | 7.3944102e-05  | 0.020507813 |
| 0.01953125  | -0.0016095117  | -0.00054967531 | 0.021484375 |
| 0.020507813 | -0.00061560422 | -0.0028408715  | 0.022460938 |
| 0.021484375 | -0.00036600977 | 0.00084909552  | 0.0234375   |
| 0.022460938 | -0.0011732802  | 0.00010243384  | 0.024414063 |
| 0.0234375   | -0.00059306622 | -0.0018291175  | 0.025390625 |
| 0.024414063 | -0.00012870878 | -0.0020236503  | 0.026367188 |
| 0.025390625 | -8.0093741e-06 | -0.00084193598 | 0.02734375  |
| 0.026367188 | -0.00016298145 | -0.0034221071  | 0.028320313 |
| 0.02734375  | -0.0014295802  | -0.0017928221  | 0.029296875 |
| 0.028320313 | -0.0010684133  | -0.00054779521 | 0.030273438 |
| 0.029296875 | -0.00018272549 | -0.004008159   | 0.03125     |

Fonte: próprio autor.

Os dados de temperatura disponibilizados pelo sistema do módulo AGILENT, através de seu software BenchLink Data Logger 3® v 4.3, são arquivos no formato .CSV que podem ser acessados por qualquer planilha eletrônica, como o Microsoft Excel por exemplo. Esses dados possuem a configuração de modo que a primeira coluna de dados representa o tempo e a segunda, terceira, quarta e quinta representam as temperaturas nos pontos “1”, “2”, “3” e “4”, respectivamente.

**Figura 43 – Exemplo de arquivo .CSV gerado experimentalmente: a primeira coluna representa tempo, a segunda representa temperatura do termopar 1, a terceira representa temperatura do termopar 2, a quarta representa temperatura do termopar 3 e a quinta representa temperatura do termopar 4.**

|    | A                       | B       | C       | D       | E       | F |
|----|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---|
|    | Time                    | 101 (C) | 102 (C) | 103 (C) | 104 (C) |   |
| 11 |                         |         |         |         |         |   |
| 12 | 02/03/2016 18:16:38:220 | 27.289  | 27.332  | 27.388  | 27.313  |   |
| 13 | 02/03/2016 18:16:38:704 | 27.295  | 27.361  | 27.4    | 27.338  |   |
| 14 | 02/03/2016 18:16:39:204 | 27.263  | 27.338  | 27.429  | 27.357  |   |
| 15 | 02/03/2016 18:16:39:704 | 27.279  | 27.348  | 27.425  | 27.345  |   |
| 16 | 02/03/2016 18:16:40:204 | 27.279  | 27.342  | 27.41   | 27.364  |   |
| 17 | 02/03/2016 18:16:40:704 | 27.301  | 27.354  | 27.419  | 27.361  |   |
| 18 | 02/03/2016 18:16:41:204 | 27.298  | 27.37   | 27.425  | 27.364  |   |
| 19 | 02/03/2016 18:16:41:704 | 27.311  | 27.367  | 27.448  | 27.357  |   |
| 20 | 02/03/2016 18:16:42:204 | 27.317  | 27.361  | 27.435  | 27.383  |   |
| 21 | 02/03/2016 18:16:42:704 | 27.301  | 27.354  | 27.444  | 27.354  |   |
| 22 | 02/03/2016 18:16:43:204 | 27.314  | 27.373  | 27.413  | 27.332  |   |
| 23 | 02/03/2016 18:16:43:704 | 27.304  | 27.373  | 27.451  | 27.361  |   |
| 24 | 02/03/2016 18:16:44:204 | 27.33   | 27.376  | 27.438  | 27.364  |   |

Fonte: próprio autor.

No arquivo de dados .DAT deve-se adotar a partir de qual linha de deslocamento u será considerada como início da excitação harmônica no regime permanente para fins de modelagem e parametrização.

Para a metodologia proposta, os dados do ensaio a serem adotados devem iniciar em qualquer ponto da excitação harmônica de modo que, qualquer ponto de início escolhido, deve estar localizada na zona permanente. Apenas a partir do início escolhido é que os deslocamentos serão significativos.

A adoção da excitação harmônica é conveniente, quando possível, pois a resposta do sistema também será uma resposta harmônica. Os ensaios experimentais foram todos baseados nesta condição imposta.

Para a identificação paramétrica da dinâmica dos elementos amortecedores faz-se necessário inicialmente a plotagem dos dados experimentais para uma detecção prévia visual comportamental de modo a possibilitar a macro detecção de características típicas e peculiares das curvas de força por tempo, força por deslocamento e força por velocidade para cada amortecedor e condição dinâmica ao qual foi submetido. De modo geral tem-se a possibilidade de identificação e correlação das curvas de modo que:

- Curva de força por tempo: permite a verificação da presença ou ausência de folga e assimetria;
- Curva de força por deslocamento: permite também a verificação da presença ou ausência de folga e assimetria e adicionalmente possibilita a quantificação da energia (em forma de trabalho mecânico absorvido);
- Curva de força por velocidade: permite também a verificação da presença ou ausência de folga e assimetria e adicionalmente possibilita a verificação da incidência ou não dos fenômenos de histerese e efeito Stribeck. O efeito Stribeck pode também ser detectado em outra curva: velocidade por tempo.

Após a etapa inicial de plotagem e identificação comportamental, o procedimento seguinte para o processamento e detecção dos parâmetros dos modelos adotados é a consideração de apenas um ciclo de amortecimento (ou pouco mais de um). A delimitação dos dados experimentais na zona permanente objetiva a redução do tempo de computação envolvido. Esta delimitação já deve contemplar os dados no regime permanente e não inicial transiente.

O próximo passo é feito visando o ajuste do deslocamento de entrada observado de modo a se ajustar uma curva ideal de comportamento de deslocamento, livre de distorções não desejadas, devido a eventuais ruídos e efeitos adversos. Detectado o perfil de comportamento harmônico de deslocamento  $u$  pelo tempo experimentalmente pode-se recorrer à modelagem deste através de uma função básica do tipo:

$$u_{\text{modelo}} = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad \text{Eq. 84}$$

sendo  $A$  é a amplitude (máximo deslocamento do sistema),  $f$  é a frequência de excitação,  $t$  é o tempo e  $\varphi$  é o ângulo de fase.

Considerando então que o deslocamento experimental,  $u_{\text{experimental}}$  é o deslocamento da função modelo  $u_{\text{modelo}}$ , pode-se escrever uma função de erro entre estes dois valores da forma:

$$\text{ERRO}_u = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (u_{\text{modelo}_i} - u_{\text{experimental}_i})^2} \quad \text{Eq. 85}$$

sendo  $i$  a amostra correspondente ao instante de tempo  $t(i)$  e  $n$  o número de amostra de forma que  $t(n) - t(1)$  perfazem pelo menos um período completo de oscilação.

Considerando-se que esta função de erro quadrática, é possível garantir que existe um erro mínimo global para esta função e o problema de otimização é escrito a forma:

$$\begin{array}{l} \text{minimizar} \\ A, f, \varphi \end{array} \quad \text{ERRO}_u \quad \text{Eq. 86}$$

sendo  $A$ ,  $f$  e  $\varphi$  os parâmetros que definem o modelo.

Em geral, os parâmetros de amplitude  $A$  e frequência  $f$  já são conhecidos devido à condição de ensaio e podem ser utilizados como valores iniciais do problema de otimização. O parâmetro de fase  $\varphi$  é o de maior interesse.

Após esta etapa é possível obter uma função para a velocidade na forma:

$$\dot{u}_{\text{modelo}} = 2\pi f A \cos(2\pi f t + \varphi) \quad \text{Eq. 87}$$

sendo que  $A$ ,  $f$  e  $\varphi$  foram obtidos do problema de otimização da **Eq. 86**.

De forma análoga, no ajuste do modelo paramétrico é realizado utilizando-se um método de otimização considerando que  $F_{\text{Dexperimental}}$  é a força experimental medida e que  $F_{\text{Dmodelo}}$  é a força obtida por um modelo paramétrico.

Pode-se escrever agora uma função de erro do tipo:

$$\text{ERRO}_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (F_{\text{Dmodelo}_i} - F_{\text{Dexperimental}_i})^2} \quad \text{Eq. 88}$$

sendo  $i$  a amostra correspondente ao instante de tempo  $t(i)$  e  $n$  o número de amostra de forma que  $t(n) - t(1)$  perfazem pelo menos um período completo de oscilação.

Uma forma geral do problema de otimização é escrita como:

$$\begin{array}{l} \text{minimizar} \\ p_1, p_2, \dots, p_k \end{array} \quad \text{ERRO}_F \quad \text{Eq. 89}$$

sendo  $p_1, p_2, \dots, p_k$  os “ $k$ ” parâmetros que definem o modelo.

Para a otimização das funções de erro optou-se pelo Método Simplex, de *Nelder-Mead*. Neste método tem sido um dos métodos de busca direta mais utilizados em problemas de minimização e apresenta um diferencial de não necessitar de cálculo (explícito ou implícito) das derivadas da função objetivo de minimização. Trata-se de uma programação não linear que utiliza apenas os valores da função de modo que em cada iteração são realizadas apenas poucas avaliações da função objetivo desejada. Seu princípio baseia-se na ideia de um simplex com  $n+1$  vértices e o reposicionamento destes vértices em termos de reflexão, expansão, contração e redução, de modo a sempre substituir o pior vértice por um de melhor valor (GONÇALVES, 2013). No software MATLAB® este algoritmo está presente na função *fminsearch*.

Para obtenção dos modelos paramétricos foram considerados três opções:

- Variação do modelo paramétrico de  $n$ -ésima potência da velocidade para assimetria, com quatro parâmetros a identificar. Utilizado para os amortecedores AP, AH e MR sem folga de fixação;

- Modelo paramétrico de WANG et al. (2004), com dezesseis parâmetros a identificar. Utilizado para o amortecedor MR;
- Novo modelo simplificado proposto nesta tese, baseado no modelo paramétrico de n-ésima potência da velocidade, com seis parâmetros a identificar. Utilizado para os amortecedores AP e AH com folga de fixação.

O primeiro modelo considerado (de n-ésima potência) contempla assimetria de forma que a força de amortecimento é dada pela **Eq. 78** já apresentada anteriormente no **CAPÍTULO 3**.

$$F_D = \begin{cases} C_{n1} |\dot{u}|^{n_{n1}} \text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } \dot{u} \geq 0 \\ C_{n2} |\dot{u}|^{n_{n2}} \text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } \dot{u} < 0 \end{cases}$$

sendo  $C_{n1}$  e  $C_{n2}$  constantes de proporcionalidade e  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  índices de potência maiores ou iguais a 1.

Dessa forma foram obtidos resultados pelos métodos de otimização descritos nos passos anteriores deste capítulo onde foram encontrados os coeficientes paramétricos  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  para os três tipos de amortecedores propostos, em diferentes condições de ensaios a saber. A **Tabela 6** apresenta um exemplo de parâmetros obtidos.

**Tabela 6 – Exemplo: resumo dos parâmetros obtidos para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

| Condição dinâmica |                    | Parâmetros   |  |                            |                            | ERRO <sub>F</sub><br>[N] |
|-------------------|--------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| u <br>[mm]        | Frequência<br>[Hz] | $C_{n1}$<br>[kg.s <sup>n<sub>n1</sub>-2</sup> .m <sup>n<sub>n1</sub>-1</sup> ] | $C_{n2}$<br>[kg.s <sup>n<sub>n2</sub>-2</sup> .m <sup>n<sub>n2</sub>-1</sup> ] | $n_{n1}$<br>[adimensional] | $n_{n2}$<br>[adimensional] |                          |
| 2,5               | 1                  | 1732,7   | 159,1  | 0,63                       | 0,29                       | 6,2                      |
| 5,0               | 1                  | 709,7  | 50,7   | 0,44                       | 0,02                       | 6,3                      |

Ensaio em AH sem folga de fixação.

Além dos dados de força e deslocamento foram também avaliadas a influência da temperatura externa do corpo do amortecedor em relação aos parâmetros deste modelo.

O segundo método utilizado é o proposto por WANG et al. (2004), que contempla assimetrias e histerese, dado pela **Eq. 70**, já apresentada na **CAPÍTULO 3**, sendo necessário identificação de dezesseis parâmetros para descrever a força de amortecimento.

$$F_D = \begin{cases} \left[ f_t \left( \frac{1 - e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}}{1 + e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}} \right) - f_d \right] (1 + k_{vc} |\dot{u}|) & \text{para } \dot{u} \geq 0 \\ \left[ f_t \left( \frac{1 - e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}}{1 + e^{-\alpha(\dot{u} + v_h + v_d)}} \right) - f_d \right] (1 + k_{ve} |\dot{u}|) & \text{para } \dot{u} < 0 \end{cases}$$

Dessa forma também foram obtidos resultados pelos métodos de otimização descritos nos passos anteriores deste capítulo onde foram encontrados os coeficientes paramétricos  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  para os três tipos de amortecedores propostos, em diferentes condições de ensaios a saber. A **Tabela 7** apresenta um exemplo de parâmetros obtidos.

**Tabela 7 – Exemplo: resumo dos parâmetros obtidos para o modelo de amortecimento de WANG et al. (2004).**

| Corrente [A] | Condição dinâmica |            | Parâmetros   |           |           |       |             |                          |                          |                           |        |          |          |       |       |        |        |       |
|--------------|-------------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|----------|----------|-------|-------|--------|--------|-------|
|              | $u_{max}$ [mm]    | freq. [Hz] | $f_{0w}$ [N] | $I_0$ [A] | $I_1$ [A] | $a_0$ | $a_1$ [m/s] | $a_2$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_3$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_4$ [m/s] <sup>-1</sup> | $k_0$  | $k_{1c}$ | $k_{1e}$ | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$  | $k_5$  | $k_6$ |
| 0            | 2,5               | 1          | 28,7         | -0,199    | 0,492     | 22247 | 6,02        | -45,8                    | 1,450                    | 11,65                     | 1638   | 19,99    | 37,71    | 527,6 | -67,9 | -0,091 | -0,260 | 0,006 |
|              | 5,0               | 1          | 27,9         | 0,098     | 0,514     | -1746 | 5,74        | -17,9                    | 0,189                    | -7,0                      | -121,7 | 9,96     | 9,80     | 44,7  | 47,7  | -0,064 | -0,004 | 0,014 |

Ensaio em MR sem folga de fixação.

Além dos dados de força e deslocamento foram também avaliadas a influência da temperatura externa do corpo do amortecedor em relação aos parâmetros deste modelo.

O terceiro método utilizado é a proposição simplificada de um novo modelo contemplando assimetria e folga, dado pela **Eq. 83** também já apresentada.

$$F_D = \begin{cases} f_{dp} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| > u_m - \delta \text{ e } \dot{u} < 0 \\ f_{dn} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| > u_m - \delta \text{ e } \dot{u} \geq 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) + f_{n3} & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| \leq u_m - \delta \text{ e } \dot{u} > 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } u\dot{u} < 0, |u| \leq u_m - \delta \text{ e } \dot{u} \leq 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) + f_{n3} & \text{para } u\dot{u} \geq 0 \text{ e } \dot{u} > 0 \\ C_{n3}|\dot{u}|^{n_{n3}}\text{sgn}(\dot{u}) & \text{para } u\dot{u} \geq 0 \text{ e } \dot{u} \leq 0 \end{cases}$$

sendo  $f_{dn}$  força onde ocorre a folga em  $u < 0$ ,  $f_{dp}$  força onde ocorre a folga em  $u > 0$  (extensão),  $f_{n3}$  uma constante de proporcionalidade de força,  $C_{n3}$  uma constante de proporcionalidade,  $n_{n3}$  um índice de potência,  $\delta$  a folga de fixação,  $\text{sgn}$  função sinal, e  $u$  e  $\dot{u}$  deslocamento e velocidade, respectivamente.

Dessa forma foram obtidos resultados pelos métodos de otimização descritos nos passos anteriores deste capítulo onde foram encontrados os respectivos coeficientes paramétricos para dois dos três tipos de amortecedores propostos (AP e AH), em diferentes condições de ensaios a saber. Neste caso optou-se por analisar a magnitude de energia (trabalho dissipado). A **Tabela 8** apresenta um exemplo de parâmetros obtidos.

**Tabela 8 – Exemplo: resumo dos parâmetros obtidos para o novo modelo de amortecimento com assimetria e folga.**

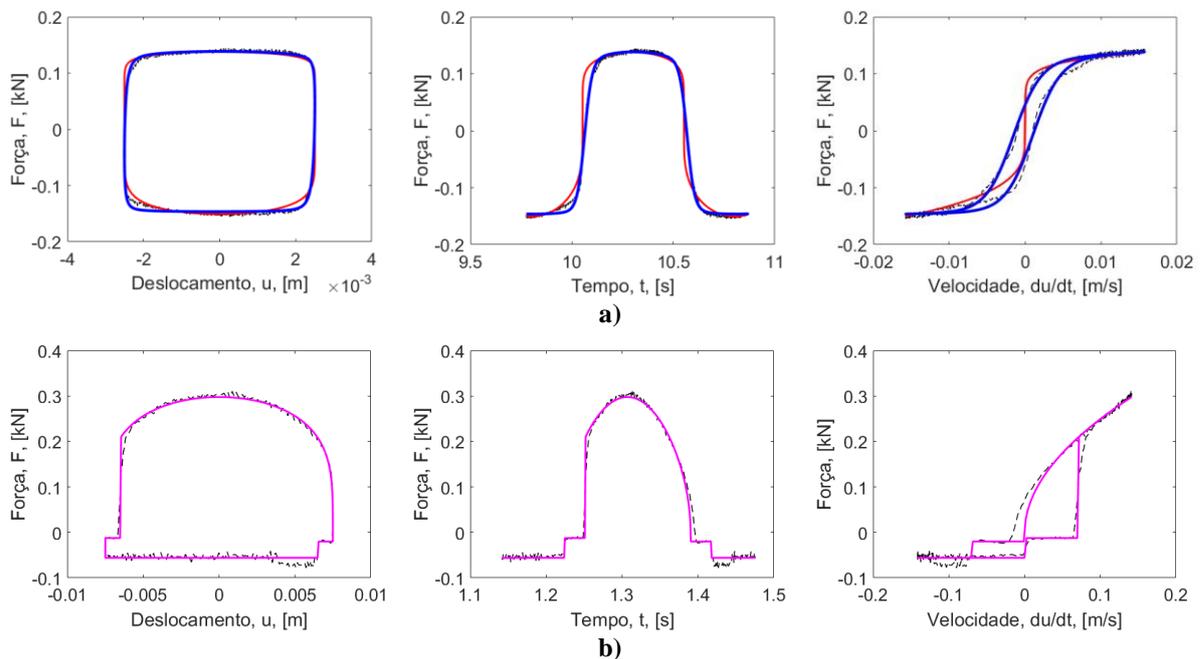
| Condição dinâmica |               | Parâmetros*  |                            |                 |                 |                 | Energia (Trabalho)          |                          |                                 |
|-------------------|---------------|--|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| u <br>[mm]        | Freq.<br>[Hz] | $C_{n3}$<br>[kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | $n_{n3}$<br>[adimensional] | $f_{n3}$<br>[N] | Na folga        |                 | Energia experimental<br>[J] | Energia do modelo<br>[J] | Diferença percentual de Energia |
|                   |               |  |                            |                 | $f_{dn}$<br>[N] | $f_{dp}$<br>[N] |                             |                          |                                 |
| 2,5               | 1             | 302,0  | 0,25                       | 61,6            | -12,5           | -20             | 0,45                        | 0,44                     | -2,40                           |
| 5                 | 1             | 471,2  | 0,34                       | 55,5            | -12,5           | -20             | 1,48                        | 1,47                     | -0,66                           |

Ensaio em AH com folga de fixação

\*Sexto parâmetro (folga) foi adotado como entrada. Neste exemplo,  $\delta = 1,1\text{mm}$ .

Como exemplo de resultados típicos apresenta-se a **Figura 44** em termos de modelagem realizada: curvas de força por deslocamento (a esquerda), força por tempo (no centro) e força por velocidade (a direita). A **Figura 44a** faz referência a respostas típicas de um ensaio sem folga de fixação enquanto que na **Figura 44b** refere-se a respostas de um ensaio com folga de fixação.

**Figura 44 – Exemplo: Resultados de modelagem com os modelos utilizados; a) curvas de resposta experimental, por modelo de n-ésima potência da velocidade e por modelo de WANG et al. (2004) e b) curvas de resposta experimental e por novo modelo proposto de assimetria e folga de fixação.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
 linha vermelha cheia representa modelo de n-ésima potência da velocidade,  
 linha azul cheia representa modelo de WANG et al. (2004) e  
 linha magenta cheia representa novo modelo com assimetria e folga de fixação.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em termos de resultados, os principais aspectos obtidos no desenvolvimento desta tese em relação aos amortecedores seco (AP), viscoso (AH) e magnetoreológico (MR) utilizados, inicialmente plotados os dados experimentais para macro identificação comportamental, foram:

### 6.1. Amortecedor Seco (AP)

Para este amortecedor seco (fluido de trabalho pressuposto como sendo ar) obteve-se:

#### 6.1.1. Sem Folga de Fixação

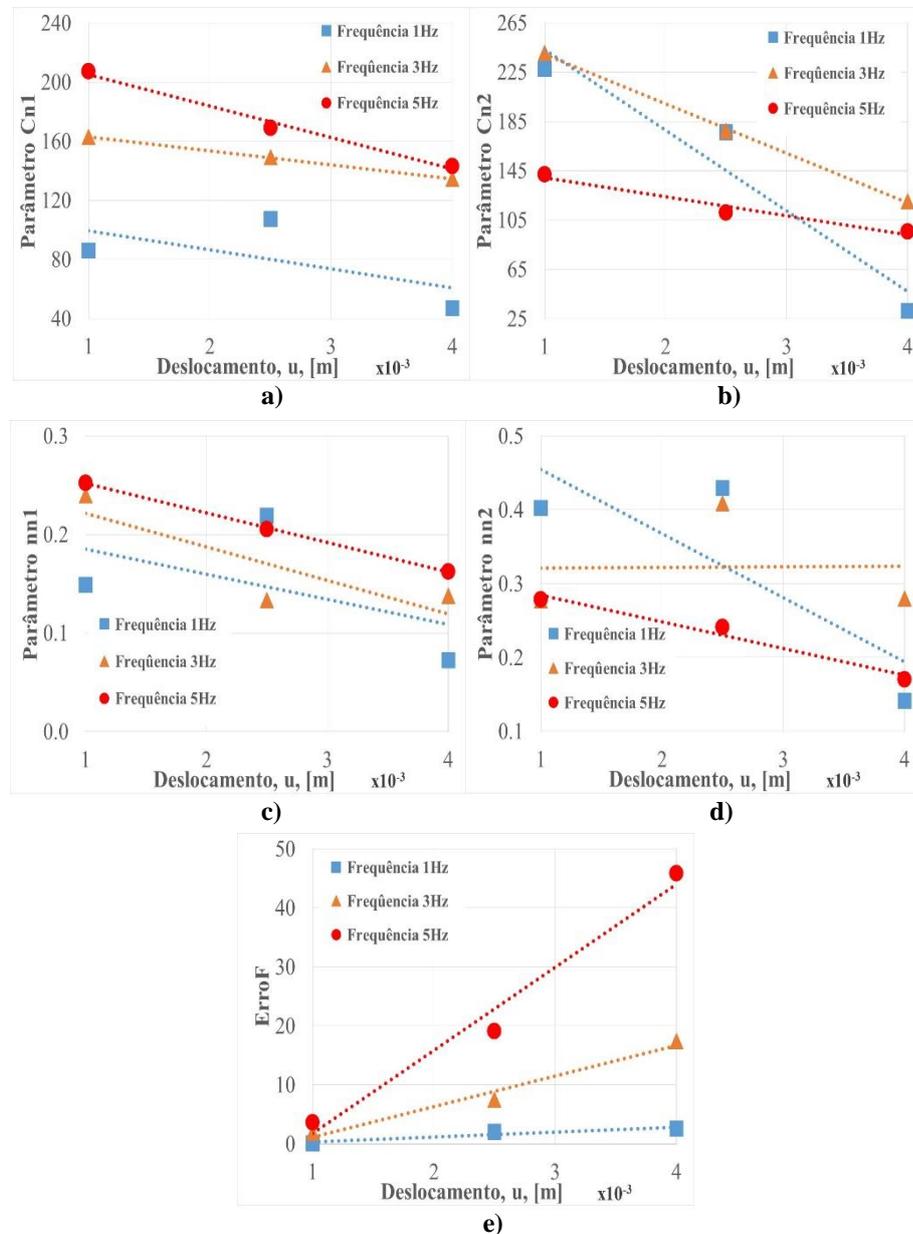
No caso dinâmico sem folga de fixação obteve-se, utilizando o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade com assimetria (Eq. 78), em termos de identificação paramétrica, a **Tabela 9** de resultados obtidos.

**Tabela 9 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AP sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

| Condição dinâmica |                    | Parâmetros  |   |                                   |                                   | ERRO <sub>F</sub><br>[N] |
|-------------------|--------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| u <br>[mm]        | Frequência<br>[Hz] | C <sub>n1</sub><br>[kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | C <sub>n2</sub><br>[kg.s <sup>nn2-2</sup> .m <sup>nn2-1</sup> ] | n <sub>n1</sub><br>[adimensional] | n <sub>n2</sub><br>[adimensional] |                          |
| 1                 | 1                  | 85,9  | 227,6   | 0,15                              | 0,40                              | 0,1                      |
| 2,5               | 1                  | 107,4   | 176,3   | 0,22                              | 0,43                              | 2,0                      |
| 4                 | 1                  | 47,2  | 31,5  | 0,07                              | 0,14                              | 2,6                      |
| 1                 | 3                  | 162,9   | 240,5   | 0,24                              | 0,28                              | 1,8                      |
| 2,5               | 3                  | 149,2   | 177,3   | 0,13                              | 0,41                              | 7,5                      |
| 4                 | 3                  | 134,4   | 120,2   | 0,14                              | 0,28                              | 17,4                     |
| 1                 | 5                  | 207,2   | 142,0   | 0,25                              | 0,28                              | 3,6                      |
| 2,5               | 5                  | 169,0   | 111,1   | 0,21                              | 0,24                              | 19,1                     |
| 4                 | 5                  | 143,3   | 95,6  | 0,16                              | 0,17                              | 45,9                     |

A **Figura 45** apresenta o perfil dos parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade em relação ao deslocamento e a frequência.

**Figura 45 – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de  $C_{n1}$ ; b) evolução de  $C_{n2}$ ; c) evolução de  $n_{n1}$ ; d) evolução de  $n_{n2}$  e e) evolução de  $ERRO_F$ .**



As curvas de tendência linear que aparecem na **Figura 45** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

Com base na análise da **Tabela 9** ou da **Figura 45** pode-se observar que:

- $C_{n1}$ : para frequência de 1Hz este aumentou de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 2,5mm mas depois decaiu quando a amplitude

do deslocamento passou para 4mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz, este parâmetro se reduziu linearmente com a amplitude do deslocamento, de modo inverso e, finalmente, em uma frequência de 5Hz este parâmetro apresentou uma redução quase linear com a amplitude do deslocamento;

- $C_{n2}$ : para frequência de 1Hz este apresentou redução gradual, mas não linear quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 4mm. Já para frequências maiores, de 3Hz e 5Hz, este parâmetro teve comportamento similar aos de  $C_{n1}$  nas mesmas frequências;
- $n_{n1}$ : para frequência de 1Hz este aumentou de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 2,5mm mas depois decaiu quando a amplitude do deslocamento passou para 4mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro decaiu de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 2,5mm mas depois apresentou um ligeiro aumento quando a mesma passou para 4mm e, para uma frequência de 5Hz o parâmetro apresentou uma redução próxima à linear em relação à amplitude do deslocamento;
- $n_{n2}$ : para frequência de 1Hz este parâmetro apresentou comportamento similar aos de  $n_{n1}$  na mesma frequência. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro subiu de valor quando o deslocamento passa de 1mm para 2,5mm mas depois decaiu quando o deslocamento passou para 4mm e, para uma frequência maior, de 5Hz, também apresentou um decaimento característico quase linear à medida que o deslocamento aumentou;
- $ERRO_F$ : tanto para frequência de 1Hz como nas de 3H e 5Hz esta apresentou acréscimo de valor em relação à amplitude do deslocamento, de modo diretamente proporcional. A proporção de acréscimo foi bem maior na frequência de 5Hz;

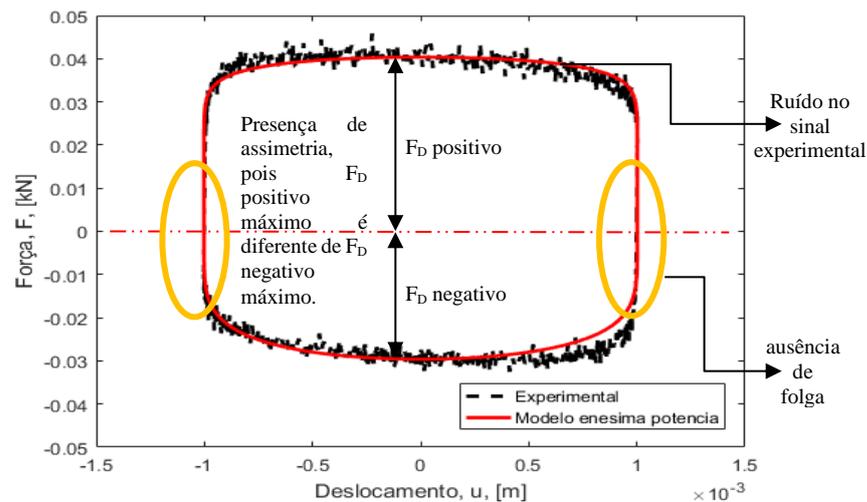
Em termos gerais, uma projeção linear primária permitiu concluir um comportamento característico de decaimento dos parâmetros  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  do modelo de n-ésima potência da velocidade, exceto pelo parâmetro  $n_{n2}$  para frequência de excitação de 3Hz que se manteve praticamente constante ao longo do aumento da amplitude do deslocamento. Não é completamente seguro adotar este aspecto comportamental em termos de extrapolação para frequências não aplicadas experimentalmente, cabendo neste caso um conveniente e necessário procedimento experimental envolvendo frequências intermediárias de até 5Hz, bem como acima desta. Ensaio envolvendo maiores amplitudes de deslocamentos também seriam

adequados para averiguação comportamental deste decaimento apenas salvo a observação da restrição física do amortecedor: sua abertura de curso máximo (condição de projeto do mesmo).

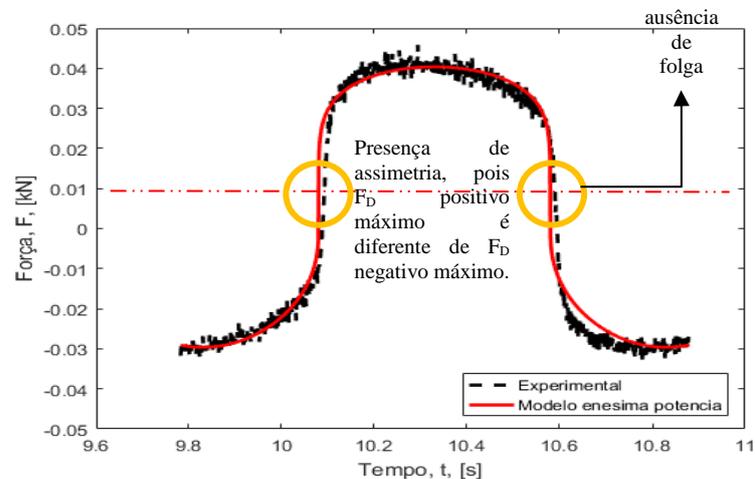
A função de erro permitiu observar que a identificação paramétrica do amortecedor AP pelo modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência da velocidade torna-se menos eficaz à medida que a frequência aumenta, portanto, este modelo mostrou-se recomendado apenas para representar o elemento físico em baixas frequências, principalmente da ordem de 1Hz.

Em termos de resultados do modelo aplicado, a **Figura 46** apresenta o primeiro resultado, como exemplo explicativo, para o amortecedor AP na condição de ausência de folga, deslocamento 1mm e frequência 1Hz.

**Figura 46 – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AP sem folga de fixação, amplitude de deslocamento de  $\pm 1$ mm e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**

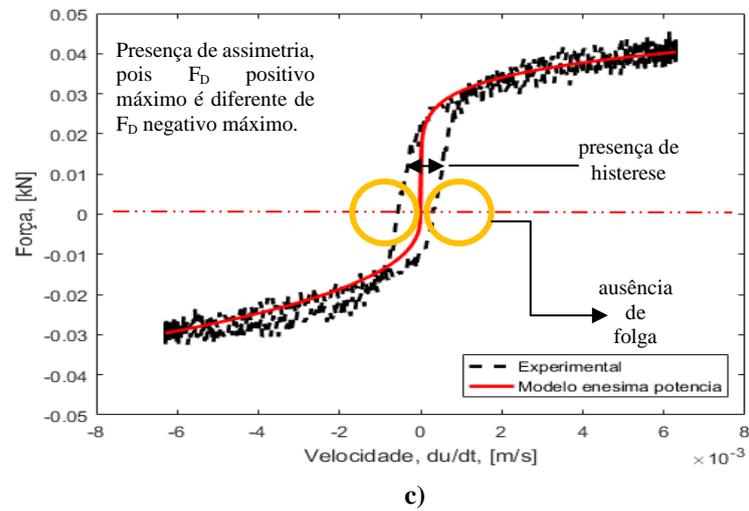


a)



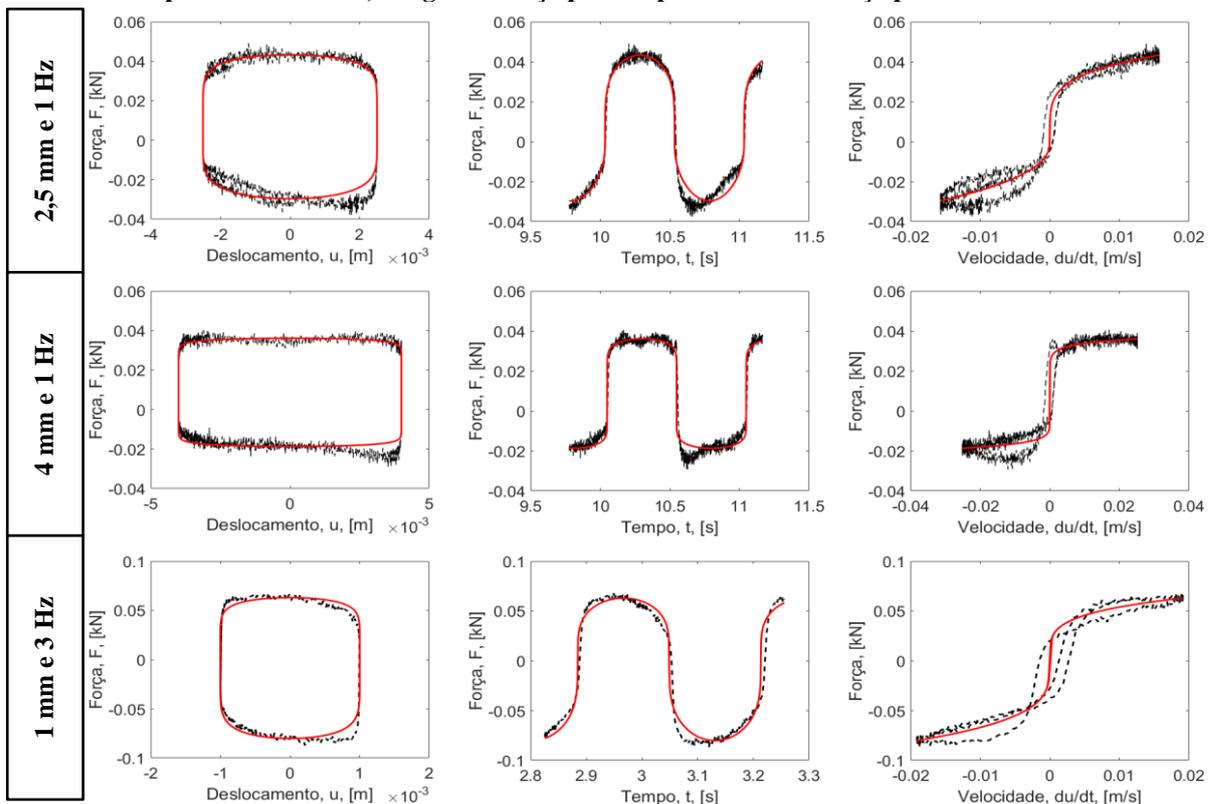
b)

**Figura 46 (continuação) – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AP sem folga de fixação, amplitude de deslocamento de  $\pm 1\text{mm}$  e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**



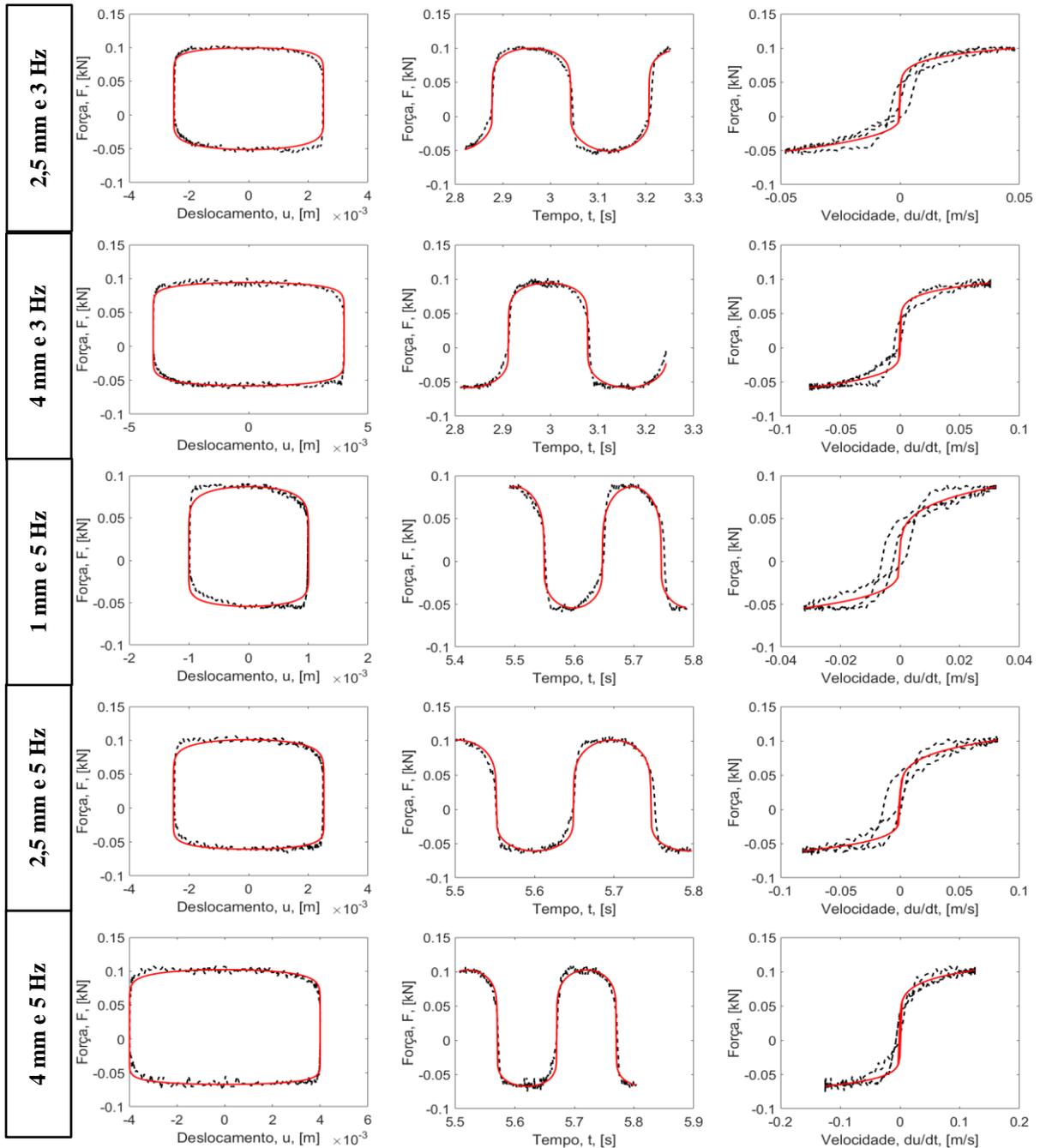
A **Figura 47** apresenta os demais resultados obtidos e discutidos para o amortecedor AP na condição de ausência de folga para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.

**Figura 47 – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e **linha vermelha cheia** representa modelo de n-ésima potência da velocidade.

**Figura 47 (continuação) – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e linha vermelha cheia representa modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade.

### 6.1.2. Com Folga de Fixação

No caso de folga induzida na fixação do amortecedor (folga externa não nula), utilizando-se o novo modelo de amortecimento com assimetria em força e folga de fixação da Eq. 83, em termos de identificação paramétrica, a Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os resultados obtidos.

**Tabela 10 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 0,35mm), para o novo modelo de amortecimento com assimetria e folga.**

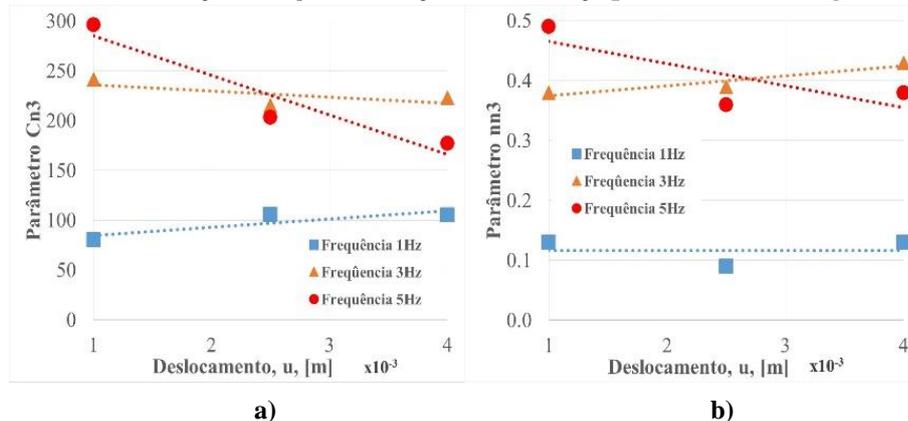
| Condição dinâmica |            | Parâmetros  |                         |              |              |              | Energia (Trabalho)       |                       |                                 |
|-------------------|------------|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| u  [mm]           | Freq. [Hz] | $C_{n3}$ [kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | $n_{n3}$ [adimensional] | $f_{n3}$ [N] | Na folga     |              | Energia experimental [J] | Energia do modelo [J] | Diferença percentual de Energia |
|                   |            |   |                         |              | $f_{dn}$ [N] | $f_{dp}$ [N] |                          |                       |                                 |
| 1                 | 1          | 80,2  | 0,13                    | 22,5         | 22,5         | -2,5         | 0,36                     | 0,36                  | 0,00                            |
| 2,5               | 1          | 105,7   | 0,09                    | -37,5        | -33          | -10          | 0,99                     | 0,99                  | 0,00                            |
| 4                 | 1          | 105,1   | 0,13                    | -25          | -30          | -0,5         | 1,60                     | 1,60                  | 0,37                            |
| 1                 | 3          | 241,6   | 0,38                    | 15           | 20           | -8,5         | 0,20                     | 0,20                  | -0,44                           |
| 2,5               | 3          | 215,2   | 0,39                    | 20           | 26           | -7,0         | 0,67                     | 0,68                  | 0,19                            |
| 4                 | 3          | 223,0   | 0,43                    | 30           | 32           | -6,0         | 1,27                     | 1,26                  | -0,09                           |
| 1                 | 5          | 296,3   | 0,49                    | 25           | 30           | -4,0         | 0,25                     | 0,25                  | 1,06                            |
| 2,5               | 5          | 203,2   | 0,36                    | 5            | 16           | -18          | 0,74                     | 0,74                  | 0,00                            |
| 4                 | 5          | 177,2   | 0,38                    | 25           | 33           | -5           | 1,32                     | 1,32                  | -0,07                           |

**Tabela 11 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 1,35mm), para o novo modelo de amortecimento com assimetria e folga.**

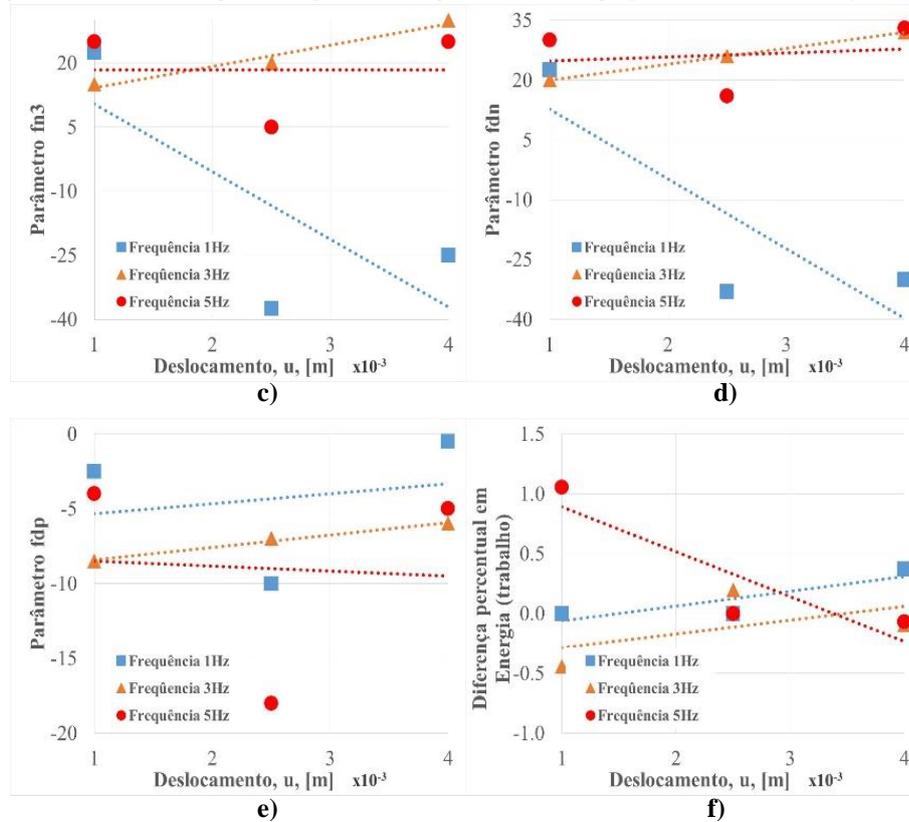
| Condição dinâmica |            | Parâmetros  |                         |              |              |              | Energia (Trabalho)       |                       |                                 |
|-------------------|------------|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| u  [mm]           | Freq. [Hz] | $C_{n3}$ [kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | $n_{n3}$ [adimensional] | $f_{n3}$ [N] | Na folga     |              | Energia experimental [J] | Energia do modelo [J] | Diferença percentual de Energia |
|                   |            |   |                         |              | $f_{dn}$ [N] | $f_{dp}$ [N] |                          |                       |                                 |
| 1                 | 1          | -   | -                       | -            | -            | -            | -                        | -                     | -                               |
| 2,5               | 1          | 189,6   | 0,25                    | -5           | 15           | -22          | 0,50                     | 0,50                  | -0,96                           |
| 4                 | 1          | 175,1   | 0,20                    | -30          | 2,5          | -35          | 0,92                     | 0,91                  | 0,00                            |
| 1                 | 3          | -   | -                       | -            | -            | -            | -                        | -                     | -                               |
| 2,5               | 3          | 428,3   | 0,52                    | 30           | 32,5         | -2,5         | 0,73                     | 0,73                  | 0,23                            |
| 4                 | 3          | 304,5   | 0,34                    | -15          | 7,5          | -27,5        | 1,51                     | 1,51                  | -0,11                           |
| 1                 | 5          | -   | -                       | -            | -            | -            | -                        | -                     | -                               |
| 2,5               | 5          | 401,4   | 0,51                    | 30           | 40           | -5           | 0,82                     | 0,83                  | 1,15                            |
| 4                 | 5          | 277,4   | 0,37                    | 20           | 27,5         | -7,5         | 1,76                     | 1,77                  | 0,43                            |

A **Figura 48** e **Figura 49** apresentam o perfil dos parâmetros do novo modelo proposto em relação ao deslocamento e a frequência.

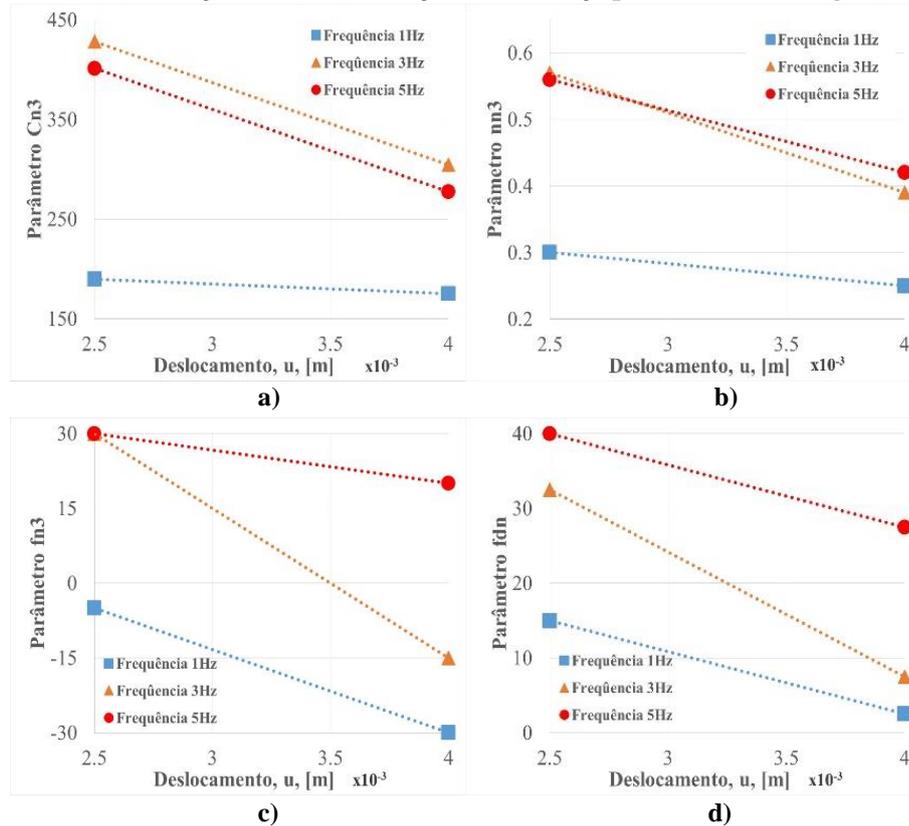
**Figura 48 – Resultados para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 0,35mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



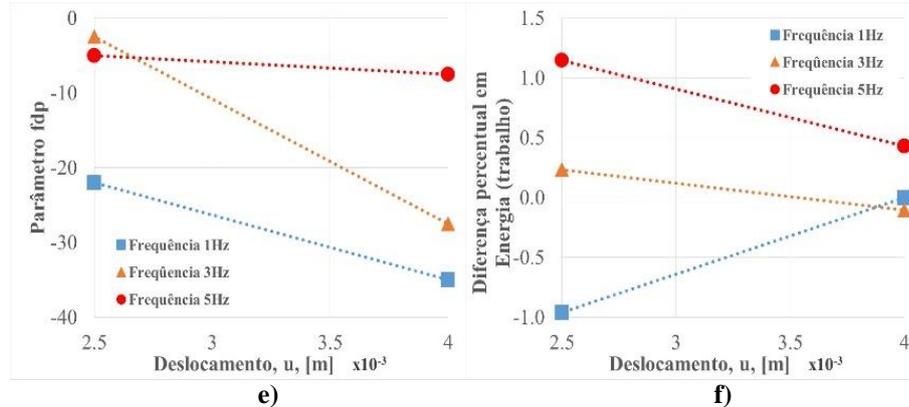
**Figura 48 (continuação) – Resultados para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 0,35mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



**Figura 49 – Resultados para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 1,35mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



**Figura 49 (continuação) - Resultados para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 1,35mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



As curvas de tendência linear que aparecem na **Figura 48** e **Figura 49** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo proposto obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

Com base na análise da **Tabela 10** e **Tabela 11** ou da **Figura 48** e **Figura 49** pode-se observar que:

- $C_{n3}$ : para frequência de 1Hz este apresentou um leve aumento quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 2,5mm, mas depois decaiu levemente quando esta passou para 4mm na folga 0,35mm e, em uma folga um pouco maior (1,35mm), também apresentou redução em relação ao aumento da amplitude do deslocamento. Já para uma frequência maior, de 3Hz, este parâmetro se reduziu quase que linearmente com a amplitude do deslocamento para folga de 0,35mm e o mesmo ocorreu para a folga de 1,35mm. Na frequência de 5Hz este parâmetro apresentou também redução com a amplitude do deslocamento em ambas as folgas;
- $n_{n3}$ : para frequência de 1Hz este caiu de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 2,5mm e depois subiu quando esta subiu para 4mm na folga de 0,35mm e para a folga de 1,35mm ele decaiu. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro subiu de forma quase linear quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 4mm na folga de 0,35mm mas caiu substancialmente na folga de 1,35mm. Para a frequência de 5Hz o parâmetro caiu e depois apresentou um ligeiro aumento na folga de 0,35mm mas na folga de 1,35mm ele apresentou apenas queda;

- $f_{n3}$ : para frequência de 1Hz este parâmetro apresentou queda e posterior aumento ao longo da amplitude do deslocamento na folga de 0,35mm e queda na de 1,35mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro subiu de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 1mm para 4mm na folga de 0,35mm e na folga de 1,35mm foi o oposto, apresentando queda de amplitude crescente. Para uma frequência maior, de 5Hz apresentou um decaimento e posterior crescimento ao longo da amplitude do deslocamento crescente na folga de 0,35mm e decaimento na folga de 1,35mm;
- $f_{dn}$ : comportamento similar ao de  $f_{n3}$  em todas as frequências, tanto na folga de 0,35mm quanto na de 1,35mm;
- $f_{dp}$ : para frequência de 1Hz este parâmetro apresentou queda e posterior aumento ao longo da amplitude do deslocamento na folga de 0,35mm e queda na de 1,35mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro subiu de valor quase que linearmente quando a amplitude passou de 1mm para 4mm na folga de 0,35mm e na folga de 1,35mm foi o oposto, apresentando queda ao longo de amplitude crescente. Para uma frequência maior, de 5Hz apresentou um decaimento substancial e posterior crescimento ao longo da amplitude do deslocamento crescente na folga de 0,35mm e decaimento leve na folga de 1,35mm;
- Energia percentual (trabalho): tanto para frequência de 1Hz como nas de 3H e 5Hz, na folga de 0,35mm e 1,35mm, esta apresentou-se dentro da faixa de -0,5% a 1,2% para a folga de 0,35mm e uma faixa um pouco maior de -1% a 1,2% para a folga de 1,35mm.

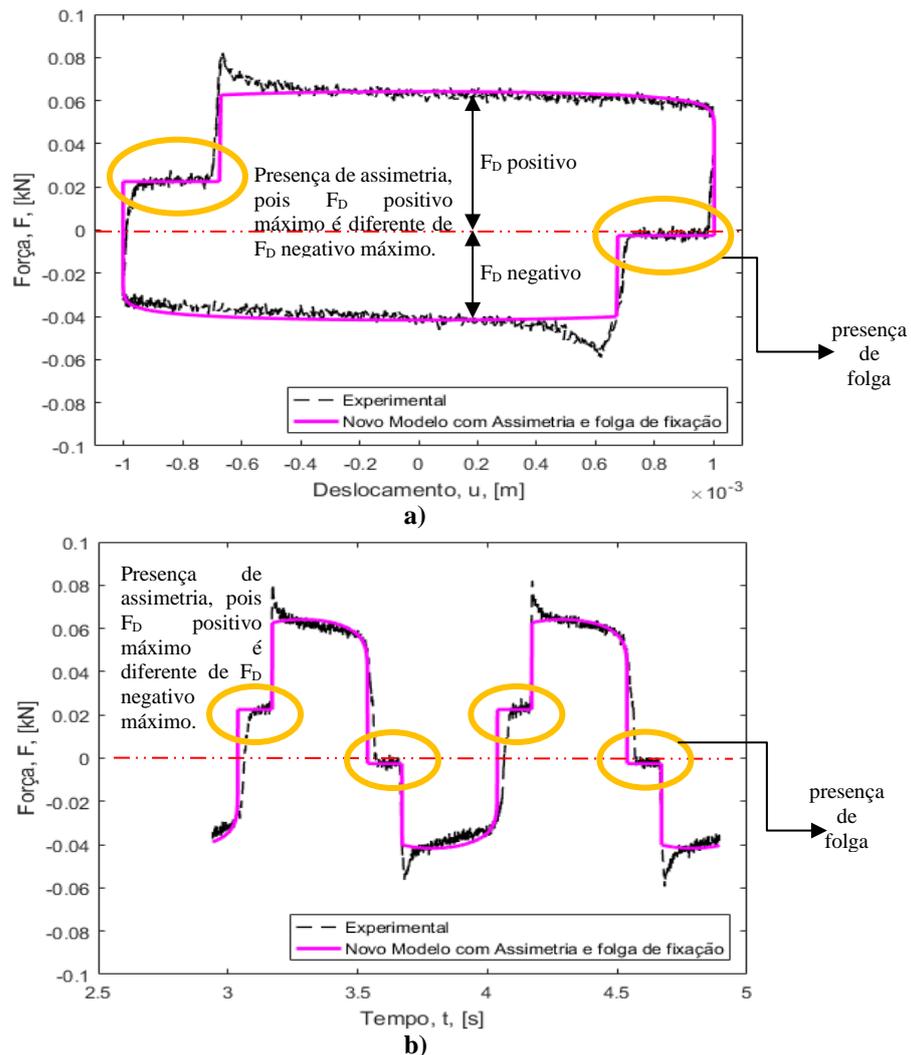
Em termos conclusivos sobre a incidência de folga aumentada no amortecedor, baseado nas projeções lineares obteve-se:

- $C_{n3}$ : apresentou um comportamento característico de decaimento do parâmetro tanto na folga menor quanto na maior, exceto na frequência de 1Hz e folga de 0,35mm onde ocorreu um pequeno aumento do parâmetro;
- $n_{n3}$ : também apresentou um comportamento de decaimento total na folga menor e comportamento oposto na folga maior;
- $f_{n3}$ : foi característico também de decaimento tanto na folga menor quanto na maior, exceto na frequência de 3Hz e folga de 0,35mm onde ocorreu um pequeno aumento deste parâmetro;

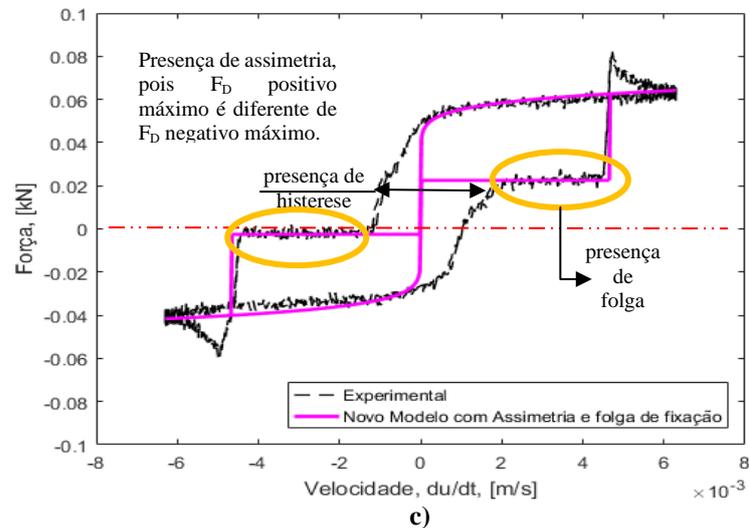
- $f_{dn}$ : apenas na folga de 1,35mm o comportamento típico é decaimento nas duas frequências;
- $f_{dp}$ : apenas na folga de 1,35mm o comportamento típico é similar ao do parâmetro  $f_{dn}$ ;
- Energia percentual (trabalho): apresentou-se dentro de uma faixa bem definida da ordem de  $\pm 1,2\%$  e decaimento para frequência maior de 5Hz em ambas as condições de folga.

Em termos de resultados do modelo aplicado, a **Figura 50** apresenta o primeiro resultado, como exemplo explicativo, para o amortecedor AP na condição de folga aproximada de 0,35mm, deslocamento 1mm e frequência 1Hz. Nota-se que conforme proposição deste novo modelo da tese confirma-se que a histerese não é percebida.

**Figura 50 – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 0,35mm), amplitude de deslocamento  $\pm 1$ mm e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**

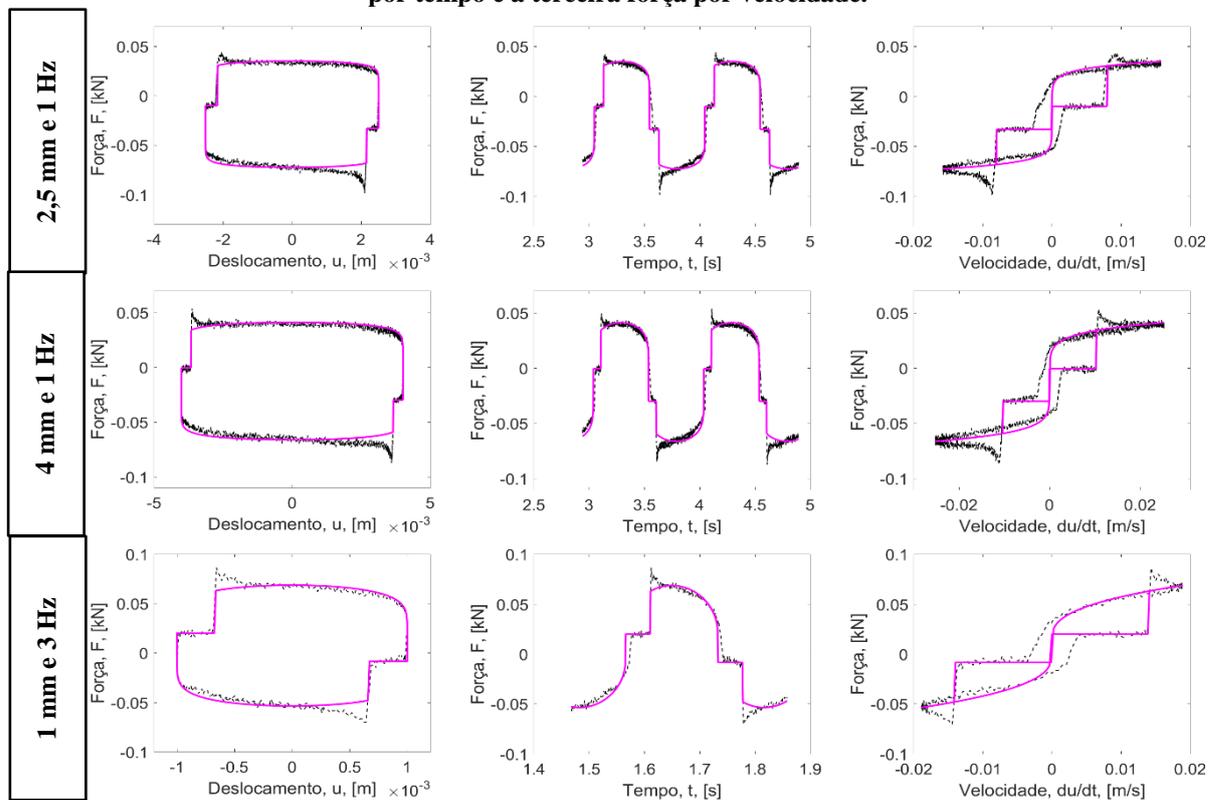


**Figura 50 (continuação) – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AP com folga de fixação (aproximadamente 0,35mm), amplitude de deslocamento  $\pm 1\text{mm}$  e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**



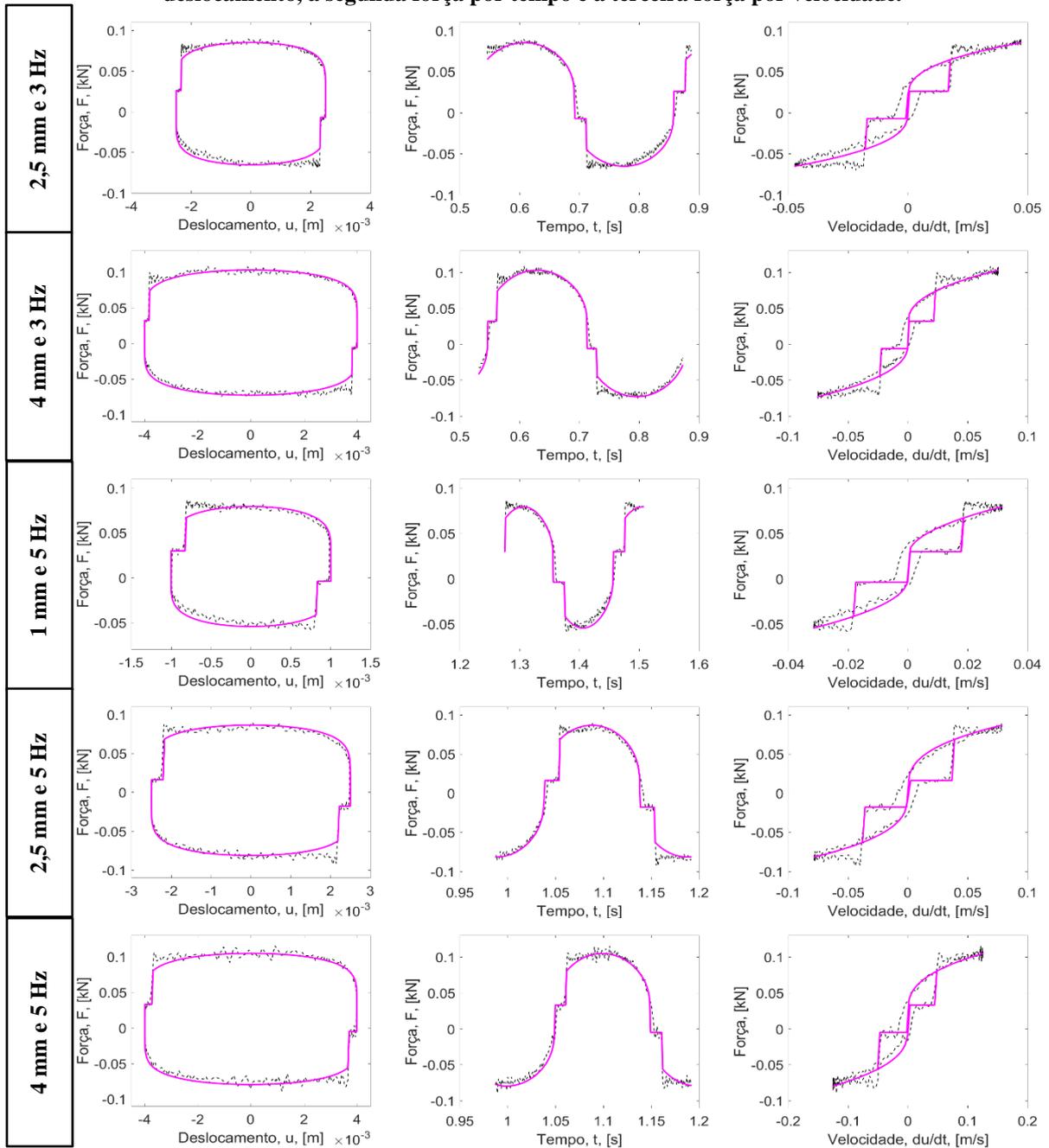
A **Figura 51** e **Figura 52** apresentam os resultados obtidos e discutidos para o amortecedor AP com folga para o novo modelo proposto de amortecimento com assimetria de força e folga de fixação.

**Figura 51 – Resultados para o amortecedor AP com folga (aproximadamente 0,35mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



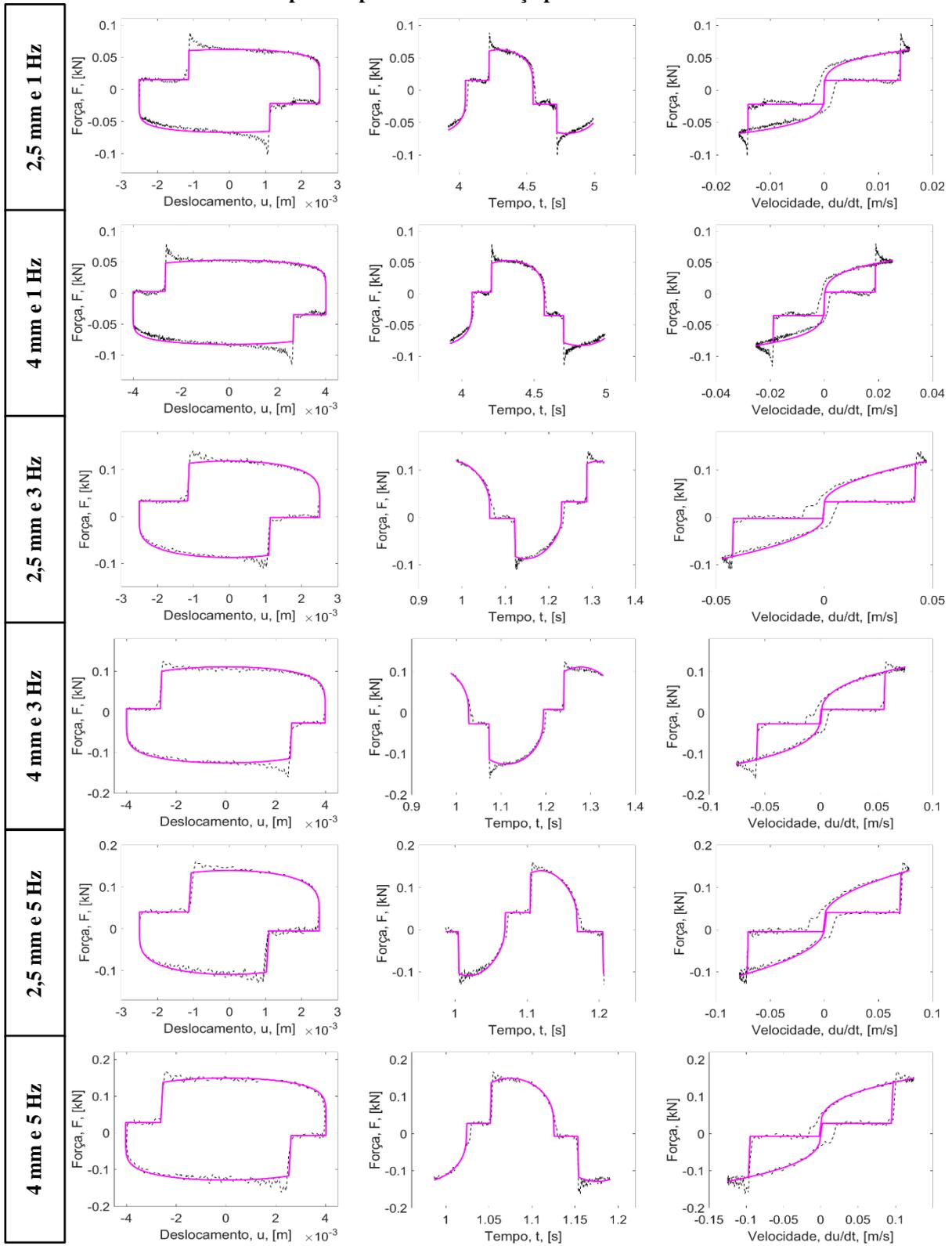
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 51 (continuação) – Resultados para o amortecedor AP com folga (aproximadamente 0,35mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 52 – Resultados para o amortecedor AP com folga (aproximadamente 1,35mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e  
 linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

### 6.1.3. Ensaio de Longa Duração

Quanto ao ensaio de longa duração (aproximadamente 600 segundos), diferentemente dos ensaios de duração mais curta onde a percepção da influência do efeito de temperatura foi mais sutil, nestes o comportamento da temperatura tornou-se um pouco mais nítido (também na forma de incremento).

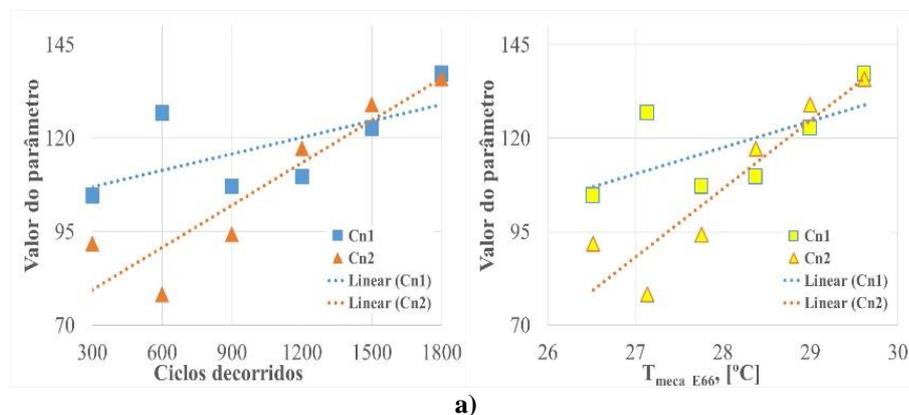
Para tanto foram adotados seis ciclos para análise: 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1800 ciclos de trabalho. Neste caso dinâmico sem folga de fixação obteve-se, utilizando o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade com assimetria (Eq. 78), em termos de identificação paramétrica, a **Tabela 12** de resultados obtidos.

**Tabela 12 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AP sem folga de fixação no ensaio de longa duração com frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 4$ mm, para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

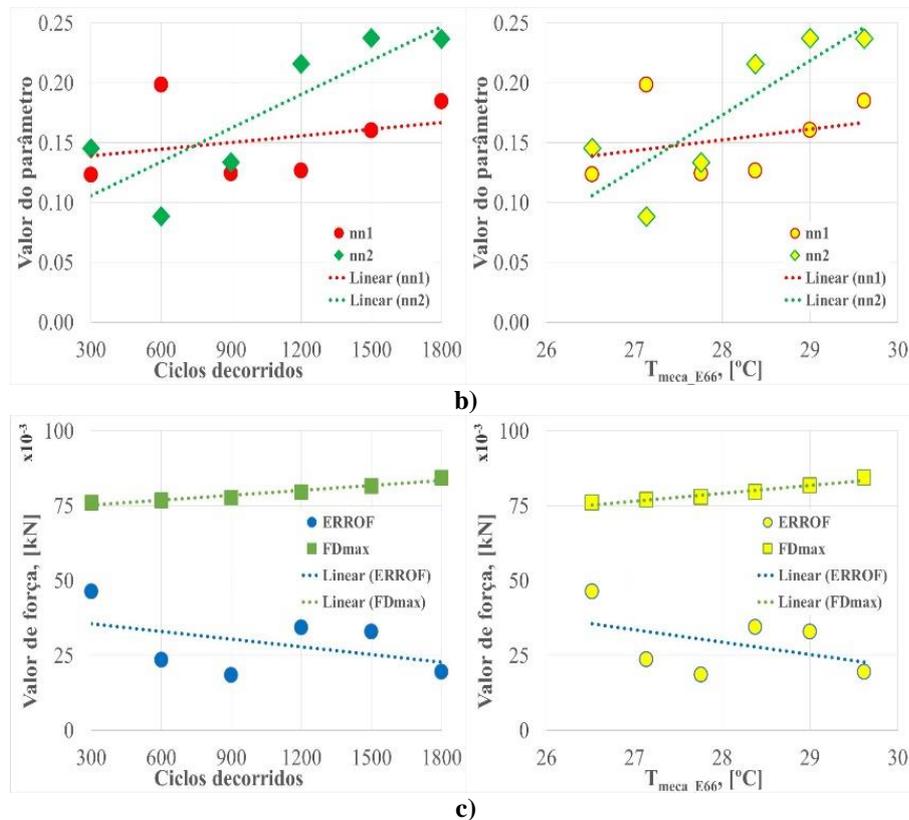
| Ciclos decorridos | Parâmetros   |  |                                |                                | ERRO <sub>F</sub> [N] | F <sub>Dmax</sub> [N] |
|-------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                   | C <sub>n1</sub> [kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | C <sub>n2</sub> [kg.s <sup>nn2-2</sup> .m <sup>nn2-1</sup> ] | n <sub>n1</sub> [adimensional] | n <sub>n2</sub> [adimensional] |                       |                       |
| 300               | 104,6  | 91,8   | 0,12                           | 0,15                           | 46,4                  | 76,0                  |
| 600               | 126,7  | 78,2   | 0,20                           | 0,09                           | 23,6                  | 76,8                  |
| 900               | 107,1  | 94,2   | 0,12                           | 0,13                           | 18,5                  | 77,8                  |
| 1200              | 109,7  | 117,2  | 0,13                           | 0,22                           | 34,4                  | 79,6                  |
| 1500              | 122,7  | 129,0  | 0,16                           | 0,24                           | 33,0                  | 81,7                  |
| 1800              | 137,2  | 135,8  | 0,18                           | 0,24                           | 19,5                  | 84,3                  |

A **Figura 53** apresenta o perfil dos parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade em relação aos ciclos decorridos.

**Figura 53 – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de C<sub>n1</sub> e C<sub>n2</sub>; b) evolução de n<sub>n1</sub> e n<sub>n2</sub>; c) evolução de ERRO<sub>F</sub> e F<sub>Dmax</sub>.**



**Figura 53 (continuação) – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de  $C_{n1}$  e  $C_{n2}$ ; b) evolução de  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$ ; c) evolução de  $ERRO_F$  e  $F_{Dmax}$ .**



As curvas de tendência linear que aparecem na **Figura 53** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro. Com base na análise da **Tabela 12** ou da **Figura 53** pode-se observar que:

- $C_{n1}$ : este parâmetro apresentou crescimento bem suave ao longo do aumento dos ciclos de trabalho (e proporcional aumento de temperatura) apenas apresentando um ponto (600 ciclos) com comportamento fora da curva;
- $C_{n2}$ : o mesmo comportamento ocorreu com este parâmetro, apresentando o mesmo ponto de 600 ciclos com comportamento fora da curva;
- $n_{n1}$ : assim como os dois parâmetros anteriores este apresentou crescimento e seu comportamento foi muito similar ao de  $C_{n1}$ ;
- $n_{n2}$ : assim como os três parâmetros anteriores este apresentou crescimento e seu comportamento foi muito similar ao de  $C_{n2}$ ;

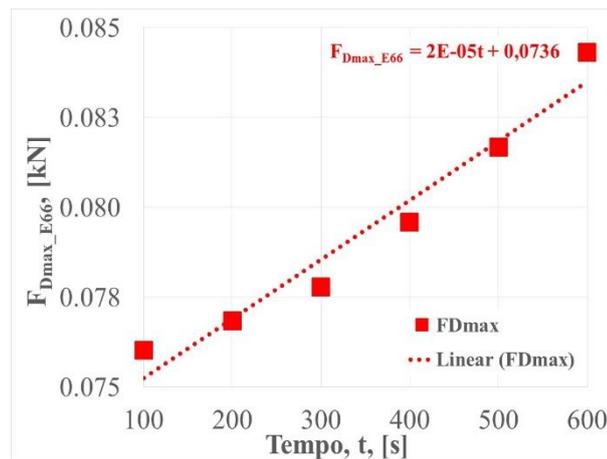
- $ERRO_F$ : apresentou certa oscilação ao longo do aumento dos ciclos de trabalho (e proporcional aumento de temperatura), mas apresentou a característica de decaimento;
- $F_{Dmax}$ : a força de amortecimento aumentou quase que linearmente com os ciclos crescentes de trabalho (e crescente de temperatura).

Em termos gerais, uma projeção linear primária permitiu concluir um comportamento característico de crescimento dos parâmetros  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  do modelo de n-ésima potência da velocidade, bem como crescimento também da força de amortecimento máxima  $F_{Dmax}$  mais uma vez ressaltando o comportamento característico deste amortecedor (atrito seco) que relaciona aumento de força de amortecimento em relação ao aumento da temperatura de trabalho.

A função de erro permitiu observar que a identificação paramétrica do amortecedor AP pelo modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade torna-se mais eficaz à medida que os ciclos (tempo de trabalho) aumenta.

Ainda em relação à **Figura 53c**, esta pode ser ainda representada em termos de tempo conforme ilustrado na **Figura 54**.

**Figura 54 – Resultados para o amortecedor AP sem folga de fixação: evolução de  $F_{Dmax}$  em termos de tempo pelo modelo de n-ésima potência da velocidade.**



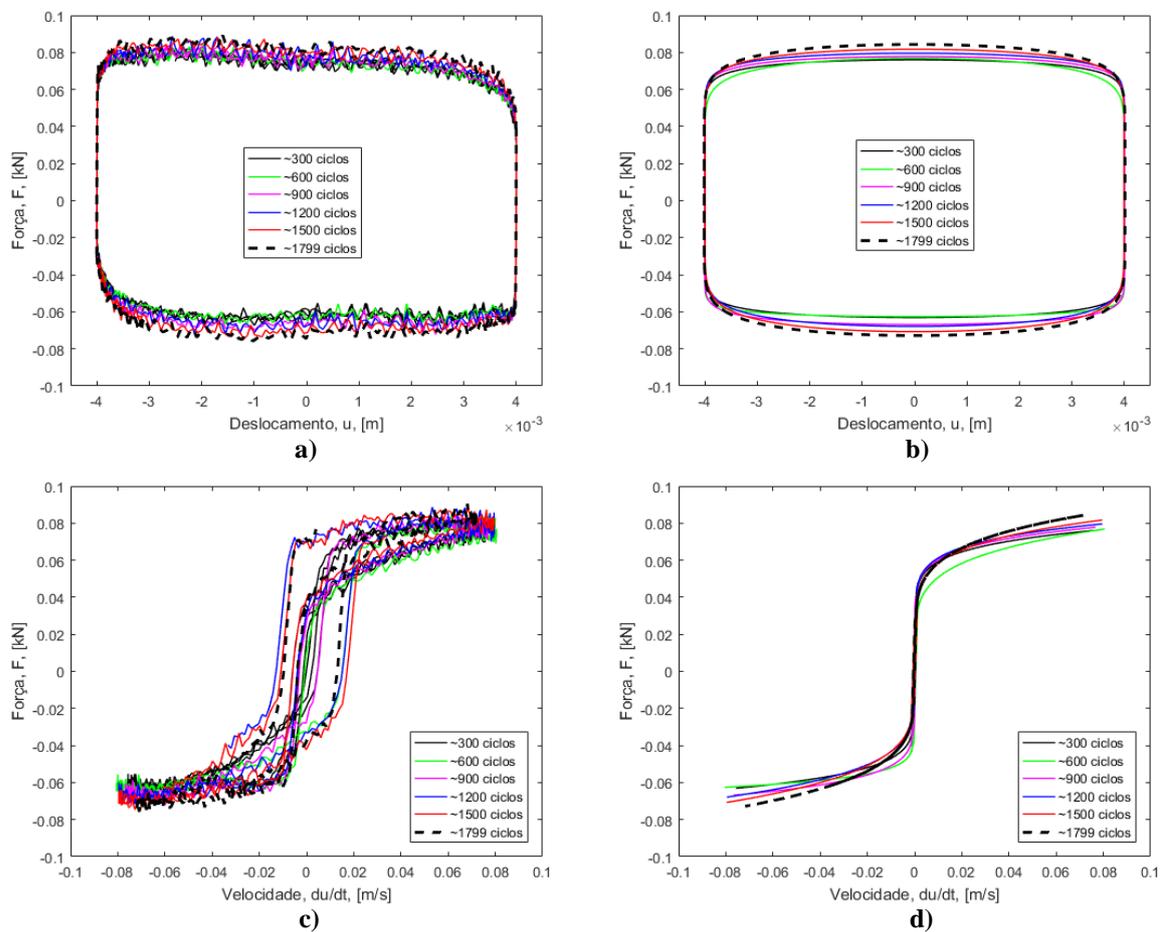
A **Eq. 90** apresenta uma aproximação linear para o comportamento da força de amortecimento máxima em relação ao tempo.

$$F_{Dmax\_E66}(t) = 2 \times 10^{-5}t + 7,36 \times 10^{-2} \quad \text{Eq. 90}$$

sendo  $F_{Dmax\_E66}$  a função de força de amortecimento máxima, [kN] pelo tempo, [s], referente ao ensaio E66. (Vide APÊNDICE A)

Uma vez identificados os parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade a **Figura 55** apresenta um comparativo entre as curvas de deslocamento e força e velocidade e força.

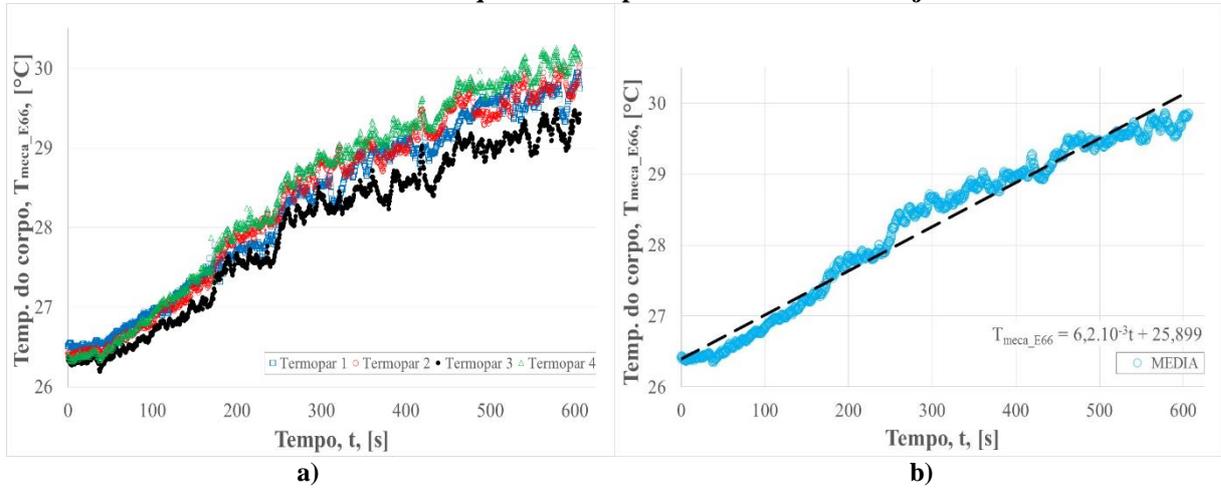
**Figura 55 – Resultados para o amortecedor AP em ensaio de longa duração para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 4$ mm, sem folga de fixação para os ciclos adotados como referências de análise 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1800: a) resultado experimental de força por deslocamento e b) modelo de n-ésima potência da velocidade de força por deslocamento; c) resultado experimental de força por velocidade e d) modelo de n-ésima potência da velocidade de força por velocidade.**



Vale lembrar que a **Figura 55d** deixa claro que a não linearidade de histerese não é representada pelo modelo de n-ésima potência da velocidade utilizado.

Em termos da temperatura, a **Figura 56** apresenta o perfil obtido na medição (média) da temperatura externa do corpo do amortecedor pelos termopares 1, 2, 3 e 4 posicionados conforme apresentado na **Figura 36**.

**Figura 56 – Resultados para o amortecedor AP em ensaio de longa duração: evolução da temperatura externa do corpo para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 4\text{mm}$ , sem folga de fixação. a) medição de cada termopar e b) média aritmética dos quatro termopares e tendência linear ajustada.**



Pela média aritmética dos dados dos quatro termopares utilizados ajustou-se de modo conveniente uma linha de tendência linear, conforme apresentado na **Eq. 91**.

$$T_{meca\_E66}(t) = 6,2 \times 10^{-3}t + 25,899 \quad \text{Eq. 91}$$

sendo  $T_{meca\_E66}$  a função de temperatura pelo tempo, [s], referente ao ensaio E66, em [°C]. (Vide APENDICE A)

A **Eq. 91** pode ser substituída na **Eq. 90** de modo a se obter uma relação entre a força de amortecimento máxima atuante e a temperatura média externa do corpo do amortecedor em relação. Logo, tem-se que:

$$F_{Dmax\_E66}(T_{meca\_E66}) = 2 \times 10^{-5} \left( \frac{T_{meca\_E66} - 25,899}{6,2 \times 10^{-3}} \right) + 7,36 \times 10^{-2} \quad \text{Eq. 92}$$

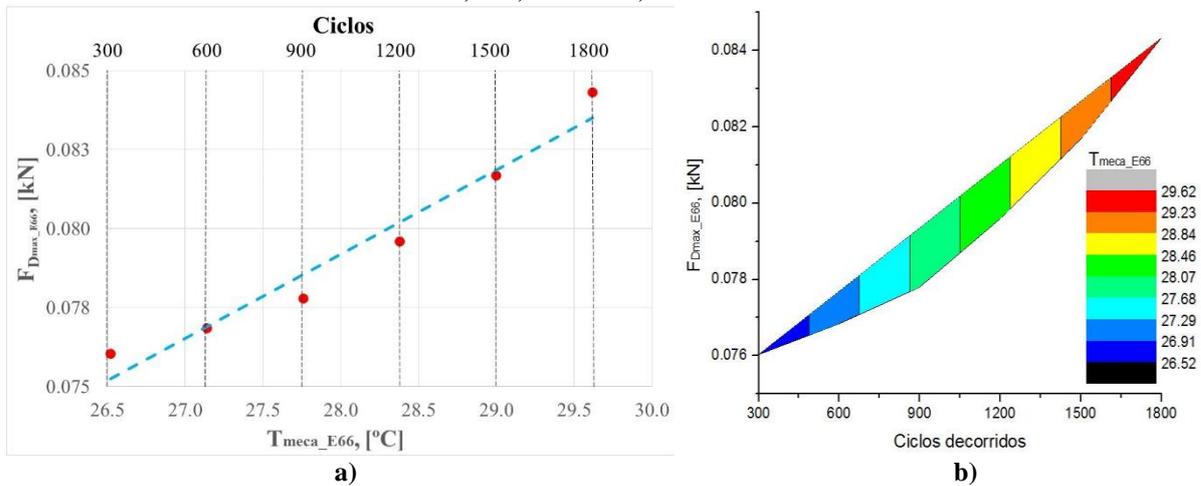
Reescrevendo a **Eq. 92** de modo mais conveniente tem-se:

$$F_{Dmax\_E66}(T_{meca\_E66}) = 3,23 \times 10^{-3} T_{meca\_E66} - 9,95 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 93}$$

sendo  $F_{Dmax\_E66}$  a função de força de amortecimento máxima, [kN] pela temperatura média externa do corpo do amortecedor, [°C], referente ao ensaio E66. (Vide APENDICE A)

A **Eq. 93** indica uma tendência linear e representa um comportamento quantitativo e não qualitativo, pois não se pode afirmar seguramente que ciclos intermediários estarão dentro do padrão comportamental daqueles adotados. O comportamento linear indica uma conclusão de crescimento da força  $F_{Dmax\_E66}$  em relação ao crescimento da temperatura externa do corpo do atuador. A **Figura 57** apresenta os resultados isolados de força máxima pela temperatura externa do corpo para os ciclos adotados, ressaltando que as temperaturas foram obtidas através da **Eq. 91**.

**Figura 57 – Resultados para o amortecedor AP em ensaio de longa duração sem folga: evolução da temperatura externa do corpo para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 4\text{mm}$ . Ciclos adotados como referências de análise 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1800.**



Ficou evidenciado uma particularidade deste amortecedor seco: o aumento da temperatura do corpo relaciona-se ao aumento força de amortecimento. Este fato é relativo à sua característica de atrito seco, envolvido em seus elementos construtivos internos (materiais base do êmbolo e corpo interno, rugosidade superficial e geometrias). O APENDICE D mostra uma visão dos aspectos construtivos internos do amortecedor AP.

## 6.2. Amortecedor Hidropneumático (AH)

Para este amortecedor obteve-se:

### 6.2.1. Sem Folga de Fixação

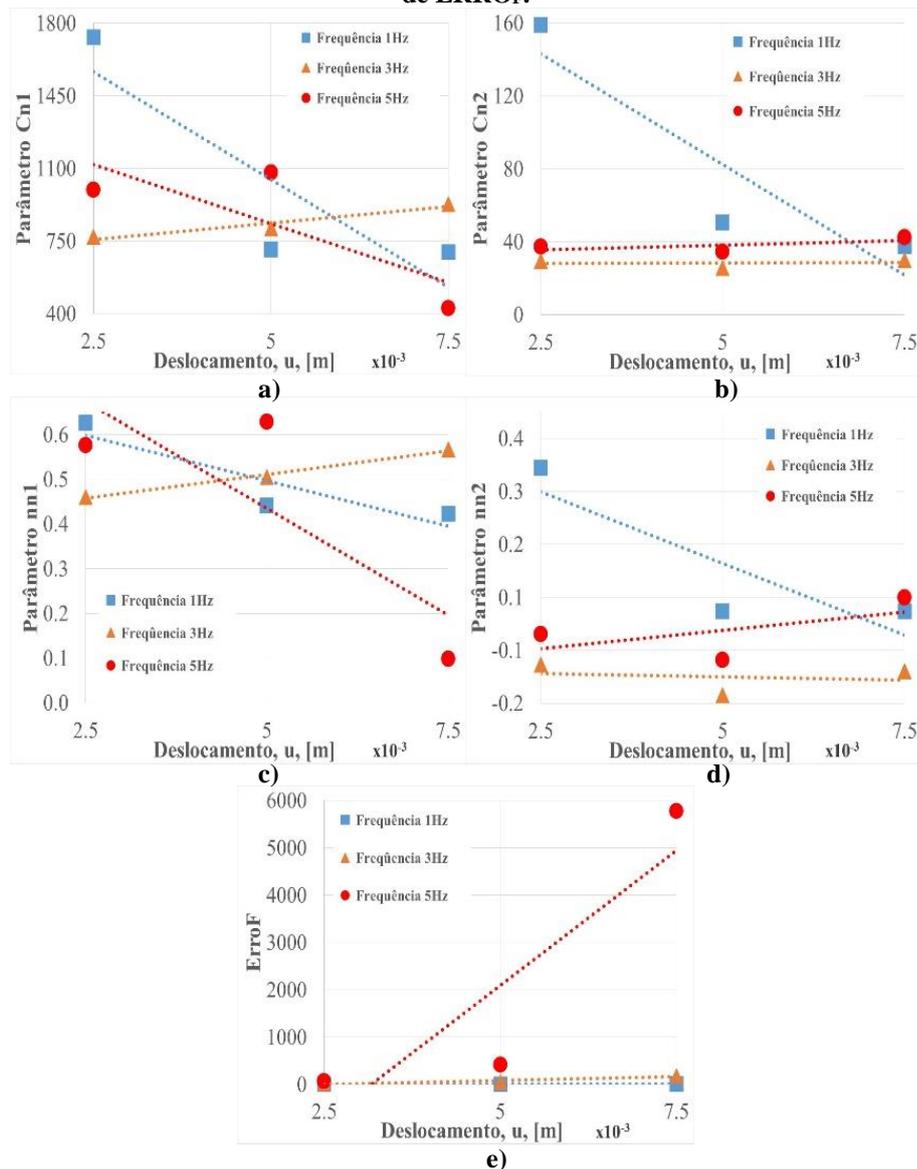
No caso dinâmico sem folga de fixação obteve-se, utilizando o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade com assimetria (**Eq. 78**), em termos de identificação paramétrica, a **Tabela 13** de resultados obtidos.

**Tabela 13 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AH sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

| Condição dinâmica |                    | Parâmetros  |   |                                   |                                   | ERRO <sub>F</sub><br>[N] |
|-------------------|--------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| u <br>[mm]        | Frequência<br>[Hz] | C <sub>n1</sub><br>[kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | C <sub>n2</sub><br>[kg.s <sup>nn2-2</sup> .m <sup>nn2-1</sup> ] | n <sub>n1</sub><br>[adimensional] | n <sub>n2</sub><br>[adimensional] |                          |
| 2,5               | 1                  | 1732,7  | 159,1   | 0,63                              | 0,29                              | 6,2                      |
| 5,0               | 1                  | 709,7   | 50,7  | 0,44                              | 0,02                              | 6,3                      |
| 7,5               | 1                  | 695,7   | 37,5  | 0,42                              | 0,02                              | 10,2                     |
| 2,5               | 3                  | 770,8   | 29,4  | 0,46                              | -0,08                             | 21,4                     |
| 5,0               | 3                  | 809,9   | 25,5  | 0,51                              | -0,14                             | 5036                     |
| 7,5               | 3                  | 928,6   | 29,8  | 0,57                              | -0,09                             | 179,8                    |
| 2,5               | 5                  | 996,6   | 37,4  | 0,58                              | -0,02                             | 74,2                     |
| 5,0               | 5                  | 1080,3  | 34,6  | 0,63                              | -0,07                             | 421,6                    |
| 7,5               | 5                  | 427,2   | 42,4  | 0,01                              | 0,05                              | 5779,4                   |

A **Figura 58** apresenta o perfil dos parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade em relação ao deslocamento e a frequência.

**Figura 58 – Resultados para o amortecedor AH sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de C<sub>n1</sub>; b) evolução de C<sub>n2</sub>; c) evolução de n<sub>n1</sub>; d) evolução de n<sub>n2</sub> e e) evolução de ERRO<sub>F</sub>.**



As curvas de tendência linear que aparecem na **Figura 58** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

Com base na análise da **Tabela 13** ou da **Figura 58** pode-se observar que:

- $C_{n1}$ : para frequência de 1Hz este decaiu de valor quando a amplitude de deslocamento passou de 2,5mm para 7,5mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz, este parâmetro cresceu praticamente de modo linear com a amplitude do deslocamento. Finalmente, em uma frequência de 5Hz este parâmetro apresentou um crescimento de 2,5mm para 5,0mm mas depois decaiu de 5,0mm para 7,5mm;
- $C_{n2}$ : para frequência de 1Hz este apresentou redução gradual, mas não linear quando a amplitude do deslocamento passou de 2,5mm para 7,5mm. Já para frequências maiores, de 3Hz e 5Hz, este aumentou à medida que esta amplitude evoluiu de 2,5mm para 7,5mm praticamente de forma linear, em ambos os casos;
- $n_{n1}$ : para frequência de 1Hz este decaiu de valor quando a amplitude do deslocamento passou de 2,5mm para 4mm. Já para uma frequência maior, de 3Hz este parâmetro cresceu de forma quase linear na mesma amplitude e, para uma frequência de 5Hz, o parâmetro apresentou crescimento de 2,5mm para 5,0mm mas decaiu de 2,5mm para 7,5mm;
- $n_{n2}$ : para frequências de 1Hz e 3Hz este decaiu de 2,5mm para 7,5mm de amplitude de deslocamento. Já para uma frequência maior, de 5Hz, este decaiu de 2,5mm para 5,0mm mas depois teve um crescimento quando a amplitude passou de 5,0mm para 7,5mm;
- $ERRO_F \rightarrow$  para as frequências de 1Hz e 3Hz manteve-se próximo ao valor zero mas na frequência de 5Hz apresentou crescimento substancial, principalmente à medida que a amplitude de deslocamento ocorreu de 5,0mm para 7,5mm.

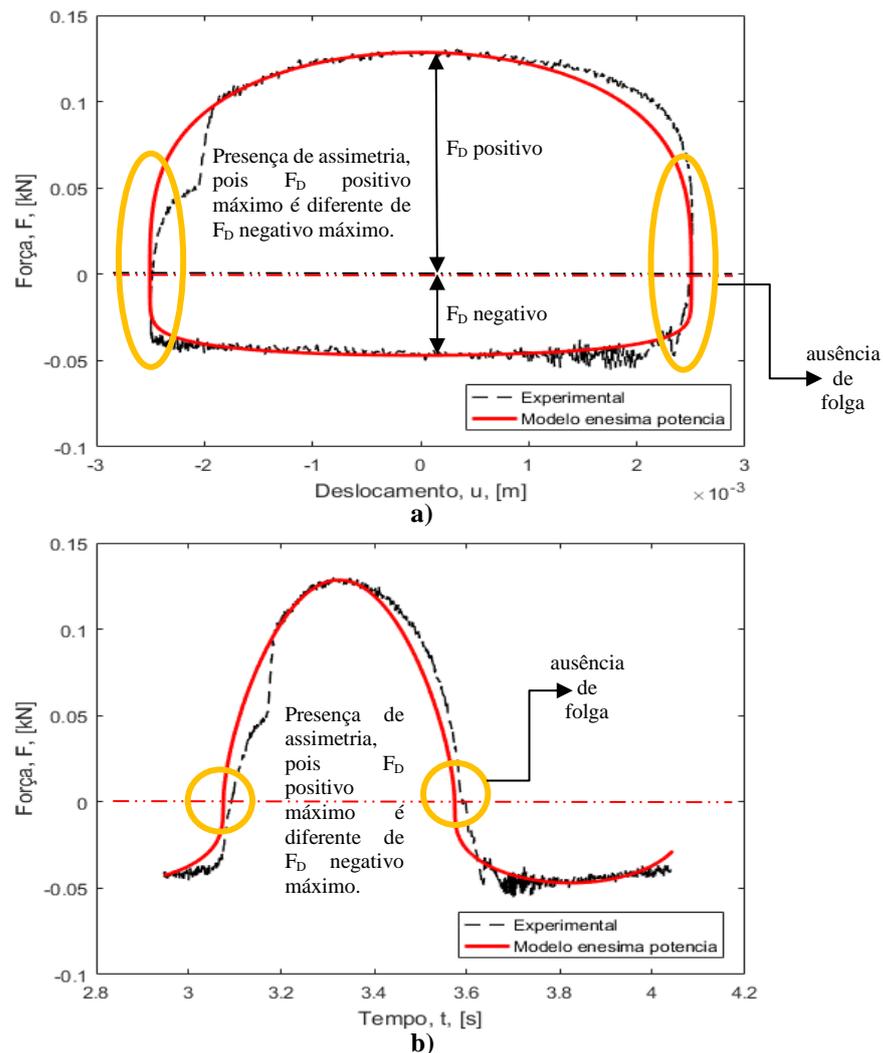
Em termos gerais, uma projeção linear primária permitiu concluir um comportamento característico de decaimento dos parâmetros  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  na frequência de 1Hz, crescimento de todos estes na frequência de 3Hz. Já para a frequência de 5Hz os parâmetros  $C_{n1}$  e  $n_{n1}$  diminuíram ao longo da evolução da amplitude do deslocamento enquanto que  $C_{n2}$  e  $n_{n2}$  apresentaram comportamento oposto, de crescimento. Não é completamente seguro adotar este aspecto comportamental em termos de extrapolação para frequências não aplicadas

experimentalmente, cabendo neste caso um conveniente e necessário procedimento experimental envolvendo frequências intermediárias de até 5Hz, bem como acima desta. Ensaio envolvendo maiores deslocamentos também seriam adequados para averiguação comportamental deste decaimento apenas salvo a observação da restrição física do amortecedor: sua abertura de curso máximo (condição de projeto do mesmo).

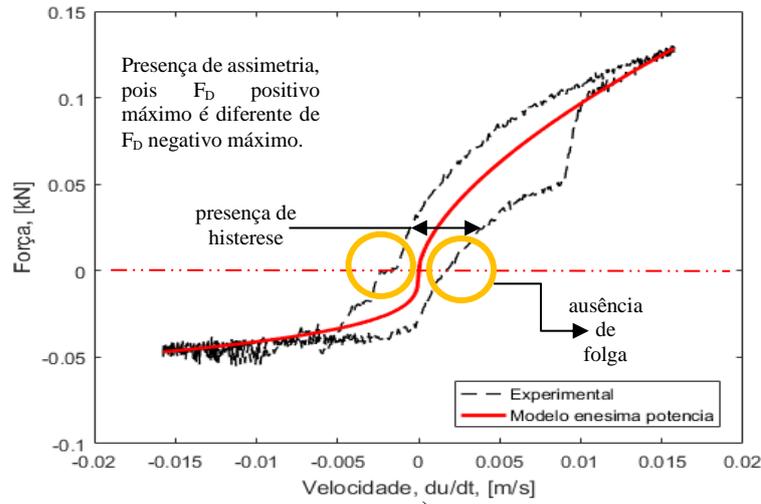
A função de erro permitiu observar que a identificação paramétrica do amortecedor AH pelo modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência da velocidade torna-se menos eficaz à medida que a frequência aumenta, portanto, este modelo mostrou-se recomendado apenas para representar o elemento físico em baixas frequências, principalmente da ordem de 1Hz e 3Hz.

Em termos de resultados do modelo aplicado, a **Figura 59** apresenta o primeiro resultado, como exemplo explicativo, para o amortecedor AH na condição de ausência de folga, deslocamento 2,5mm e frequência 1Hz.

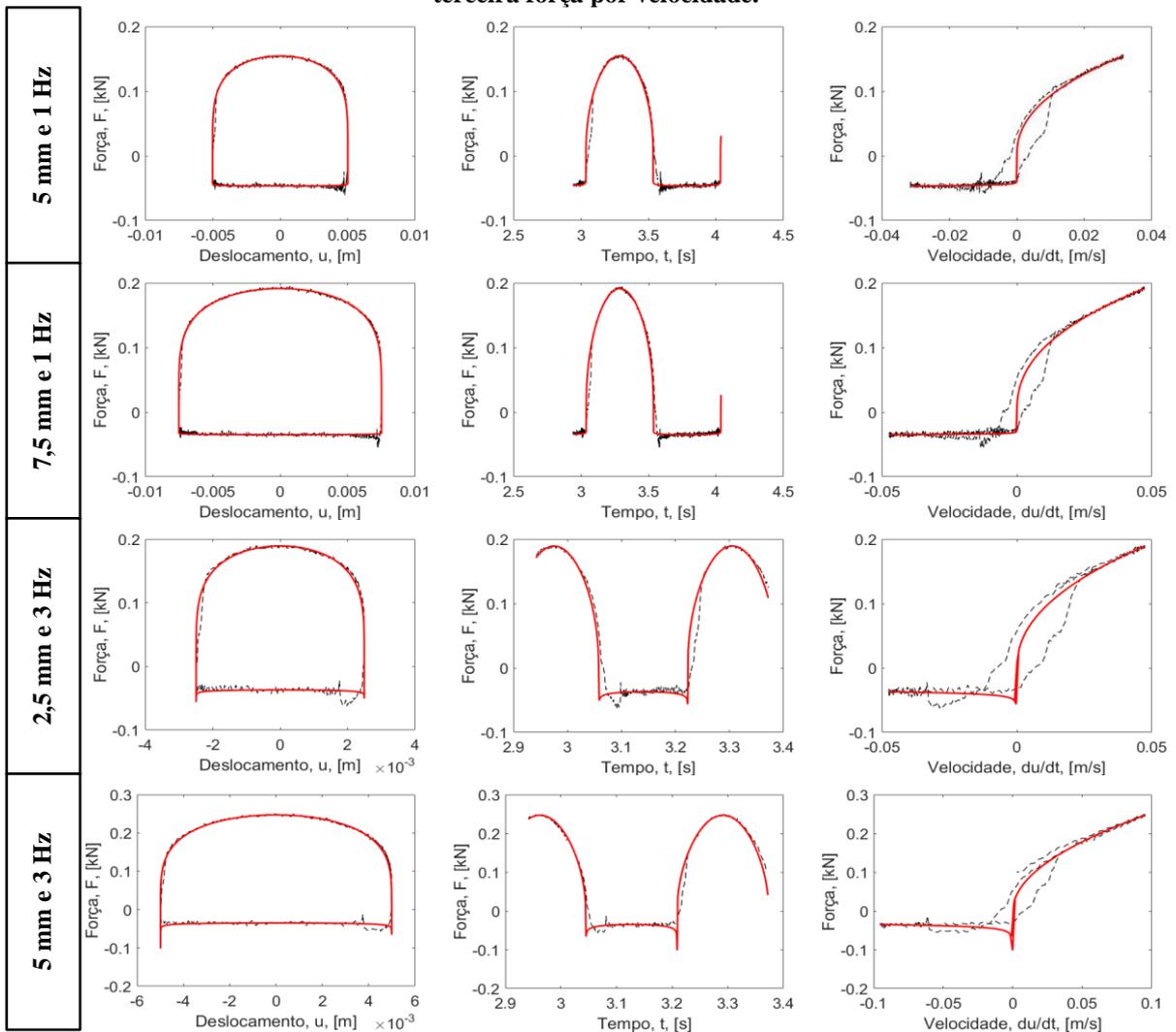
**Figura 59 – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AH sem folga de fixação, amplitude de deslocamento de  $\pm 2,5\text{mm}$  e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**



**Figura 59 (continuação) – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AH sem folga de fixação, amplitude de deslocamento de  $\pm 2,5\text{mm}$  e frequência 1Hz: a) força e deslocamento, b) força e tempo e c) força e velocidade.**

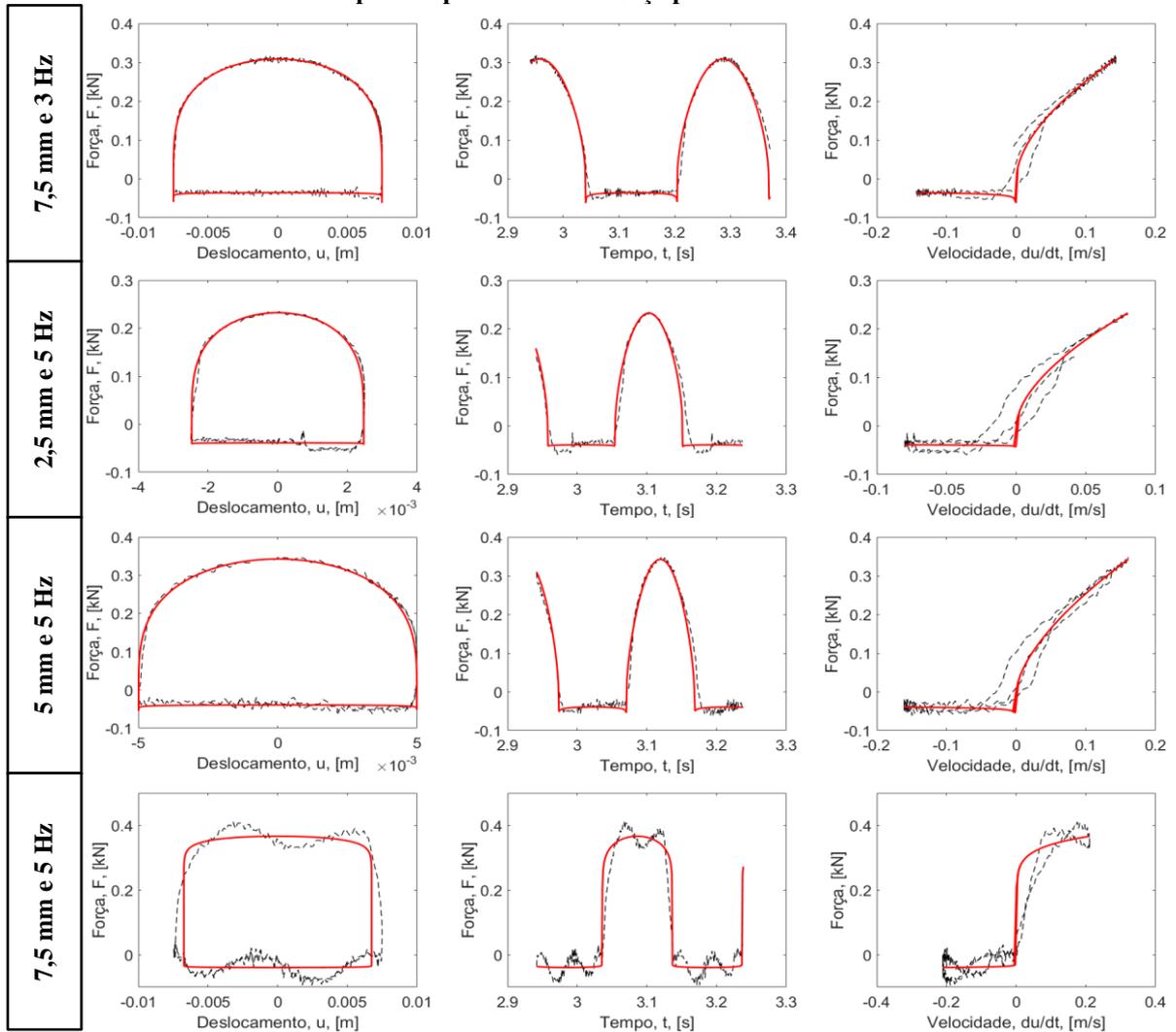


**Figura 60 – Resultados para o amortecedor AH sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda: linha preta tracejada representa dados experimentais e linha vermelha cheia representa modelo de n-ésima potência da velocidade.**

**Figura 60 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e  
**linha vermelha cheia** representa modelo de n-ésima potência da velocidade.

### 6.2.2. Com Folga de Fixação

No caso de folga induzida na fixação do amortecedor (folga externa não nula), utilizando-se o novo modelo de amortecimento com assimetria em força e folga de fixação da **Eq. 83**, em termos de identificação paramétrica, a **Tabela 14** e **Tabela 15** apresentam os resultados obtidos.

**Tabela 14 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 1,1mm), para o novo modelo de amortecimento com assimetria e folga.**

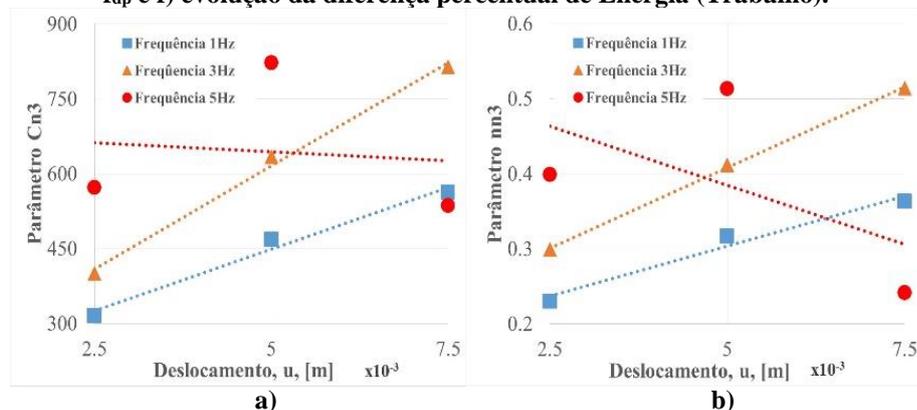
| Condição dinâmica |            | Parâmetros   |                         |              |              |              | Energia (Trabalho)       |                       |                                 |
|-------------------|------------|--|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| u  [mm]           | Freq. [Hz] | $C_{n3}$ [kg.s <sup>mm<sup>-2</sup>.m<sup>mm<sup>-1</sup></sup>]</sup> | $n_{n3}$ [adimensional] | $f_{n3}$ [N] | Na folga     |              | Energia experimental [J] | Energia do modelo [J] | Diferença percentual de Energia |
|                   |            |  |                         |              | $f_{dn}$ [N] | $f_{dp}$ [N] |                          |                       |                                 |
| 2,5               | 1          | 309,0  | 0,21                    | 10           | 2,5          | -5           | 0,63                     | 0,62                  | -0,67                           |
| 5                 | 1          | 468,3  | 0,32                    | 7,5          | 2,5          | -5           | 1,66                     | 1,66                  | -0,53                           |
| 7,5               | 1          | 562,7  | 0,36                    | 5            | 2,5          | -5           | 2,94                     | 2,93                  | -0,14                           |
| 2,5               | 3          | 399,9  | 0,30                    | 15           | -12,5        | -22,5        | 0,83                     | 0,83                  | -0,05                           |
| 5                 | 3          | 633,3  | 0,41                    | 7,5          | -10          | -15          | 2,41                     | 2,40                  | -0,51                           |
| 7,5               | 3          | 813,8  | 0,51                    | 5            | -12,5        | -20          | 4,52                     | 4,51                  | -0,30                           |
| 2,5               | 5          | 572,5  | 0,40                    | 12,5         | -5           | -12,5        | 1,08                     | 1,21                  | 11,36                           |
| 5                 | 5          | 822,6  | 0,51                    | 7,5          | -5           | -12,5        | 3,09                     | 3,07                  | -0,72                           |
| 7,5               | 5          | 477,3  | 0,22                    | 25           | -5           | -12,5        | 5,51                     | 5,07                  | -7,96                           |

**Tabela 15 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 2,4mm), para o novo modelo de amortecimento com assimetria e folga.**

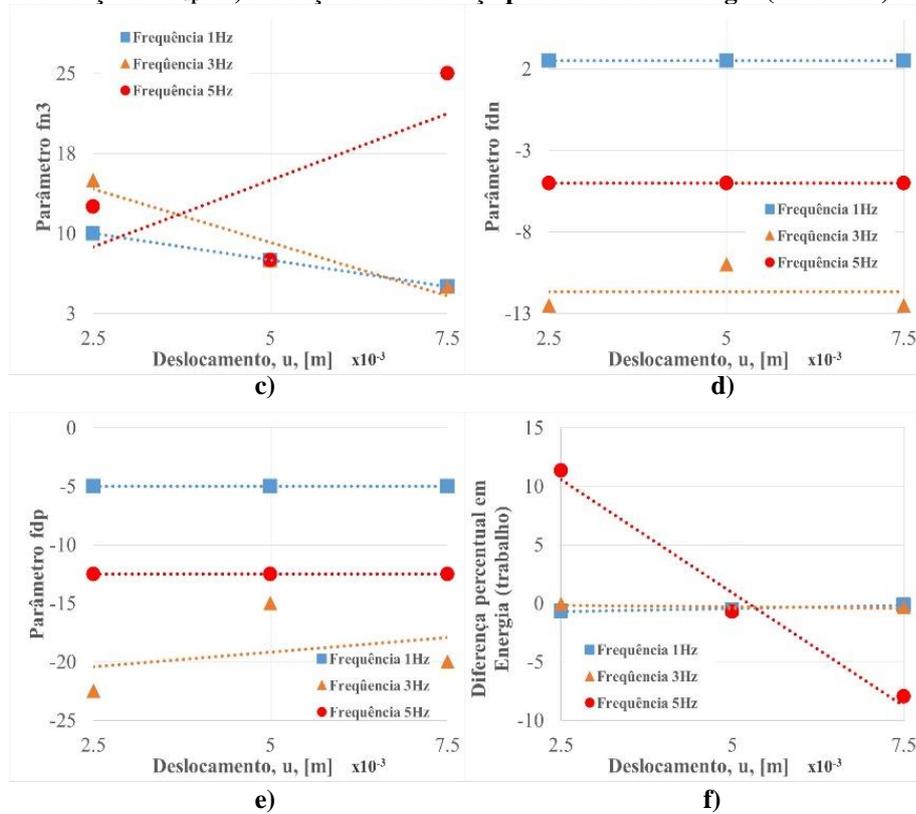
| Condição dinâmica |            | Parâmetros   |                         |              |              |              | Energia (Trabalho)       |                       |                                 |
|-------------------|------------|--|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| u  [mm]           | Freq. [Hz] | $C_{n3}$ [kg.s <sup>mm<sup>-2</sup>.m<sup>mm<sup>-1</sup></sup>]</sup> | $n_{n3}$ [adimensional] | $f_{n3}$ [N] | Na folga     |              | Energia experimental [J] | Energia do modelo [J] | Diferença percentual de Energia |
|                   |            |  |                         |              | $f_{dn}$ [N] | $f_{dp}$ [N] |                          |                       |                                 |
| 2,5               | 1          | 302,0  | 0,25                    | 7,5          | -12,5        | -20          | 0,45                     | 0,44                  | -2,40                           |
| 5                 | 1          | 471,2  | 0,34                    | 5            | -12,5        | -20          | 1,48                     | 1,47                  | -0,66                           |
| 7,5               | 1          | 537,5  | 0,38                    | 2,5          | -12,5        | -20          | 2,70                     | 2,69                  | -0,41                           |
| 2,5               | 3          | 319,4  | 0,24                    | 15           | -12,5        | -20          | 0,57                     | 0,57                  | 0,19                            |
| 5                 | 3          | 585,1  | 0,39                    | 7,5          | -12,5        | -20          | 2,11                     | 2,09                  | -0,99                           |
| 7,5               | 3          | 783,0  | 0,49                    | 5            | -12,5        | -20          | 4,18                     | 4,15                  | -0,70                           |
| 2,5               | 5          | 336,1  | 0,24                    | 30           | -12,5        | -20          | 0,71                     | 0,69                  | -3,03                           |
| 5                 | 5          | 749,3  | 0,46                    | 10           | -12,5        | -20          | 2,76                     | 2,73                  | -1,27                           |
| 7,5               | 5          | 475,3  | 0,22                    | 25           | -12,5        | -20          | 4,17                     | 4,17                  | 0,04                            |

A **Figura 61** e **Figura 62** apresentam o perfil dos parâmetros do novo modelo proposto em relação ao deslocamento e a frequência.

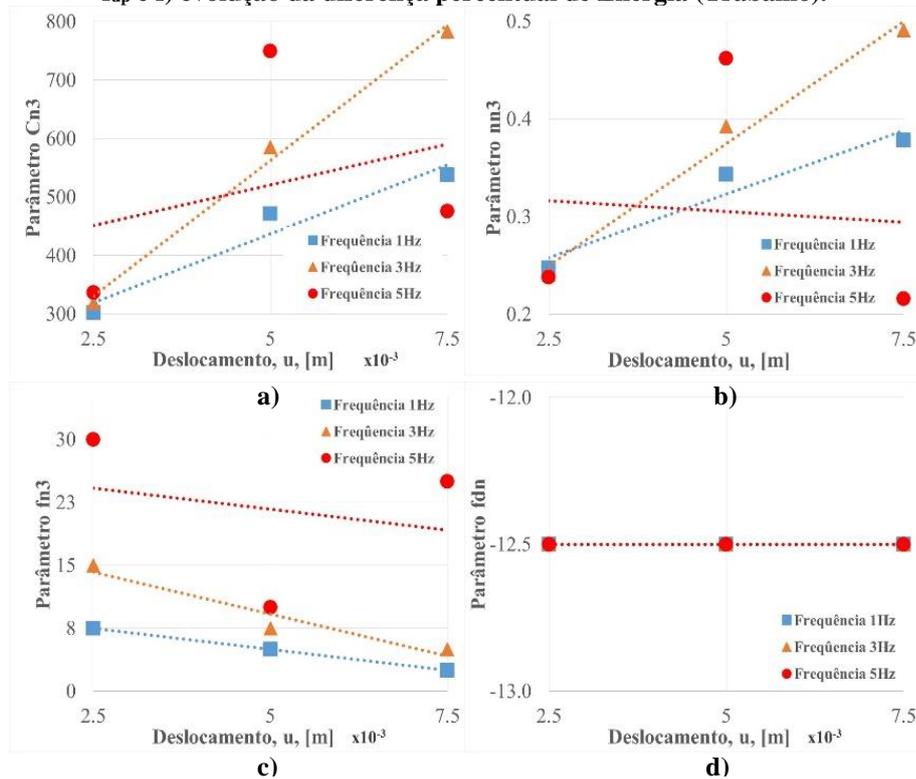
**Figura 61 – Resultados para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 1,1mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



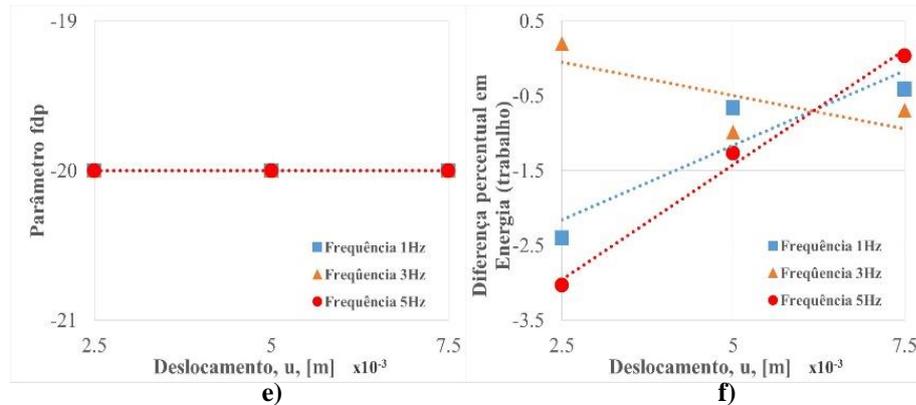
**Figura 61 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 1,1mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



**Figura 62 – Resultados para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 2,4mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



**Figura 62 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 2,4mm): parâmetros do novo modelo proposto: a) evolução de  $C_{n3}$ ; b) evolução de  $n_{n3}$ ; c) evolução de  $f_{n3}$ ; d) evolução de  $f_{dn}$ ; e) evolução de  $f_{dp}$  e f) evolução da diferença percentual de Energia (Trabalho).**



As curvas de tendência linear que aparecem na **Figura 61** e **Figura 62** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo proposto obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

Com base na análise da **Tabela 14** e **Tabela 15** ou da **Figura 61** e **Figura 62** pode-se observar que:

- $C_{n3}$ : para frequências de 1Hz e 3Hz este apresentou um aumento praticamente linear quando a amplitude de deslocamento passou de 2,5mm para 7,5mm, tanto na folga de 1,1mm quanto na folga de 2,4mm. Já para uma frequência maior, de 5Hz, este parâmetro cresceu com a amplitude do deslocamento de 2,5mm para 5mm e depois decaiu no de 5mm para 7,5mm em ambas as situações de folga;
- $n_{n3}$ : apresentou queda em frequência de 1Hz em ambos os casos de folga mas variou na frequência de 2Hz apresentando queda e redução de amplitudes de deslocamento variando de 2,5mm para 7,5mm no caso da folga menor mas para a folga maior apresentou uma tendência constante. Em 3Hz apresentou crescimento ao longo da evolução da amplitude de deslocamento para a folga menor e queda e posterior aumento para a folga maior, à medida que a amplitude de deslocamento foi acrescida. Para a folga maior manteve comportamento constante;
- $f_{n3}$ : tanto para frequência de 1Hz quanto para a de 3Hz este parâmetro decaiu ao longo do deslocamento em ambas as folgas. Em 5Hz ele cresceu no caso da folga de 1,1mm presente e decaiu no caso da folga de 2,4mm;

- $f_{dn}$ : parâmetro manteve-se praticamente inalterado ao longo da evolução do deslocamento, tanto na folga de 1,1mm quanto na de 2,4mm;
- $f_{dp}$ : parâmetro manteve-se praticamente inalterado ao longo da evolução do deslocamento, tanto na folga de 1,1mm quanto na de 2,4mm. Ligeiro aumento em 3Hz no deslocamento de 2,5mm para 5mm e posterior queda de 5mm para 7,5mm na condição de 1,1mm de folga;
- Energia percentual (trabalho): tanto para frequência de 1Hz como na de 3H na folga de 1,1mm esta apresentou-se dentro da faixa de -0,7% a -0,15%. Para a folga de 2,4mm apresentou uma faixa um pouco maior: de -2,5% a 0,5%. Na frequência de 5Hz ocorreu a maior faixa de diferença percentual em ambas as condições de folga, chegando a uma faixa de -10% a 13% na folga de 1,1mm;

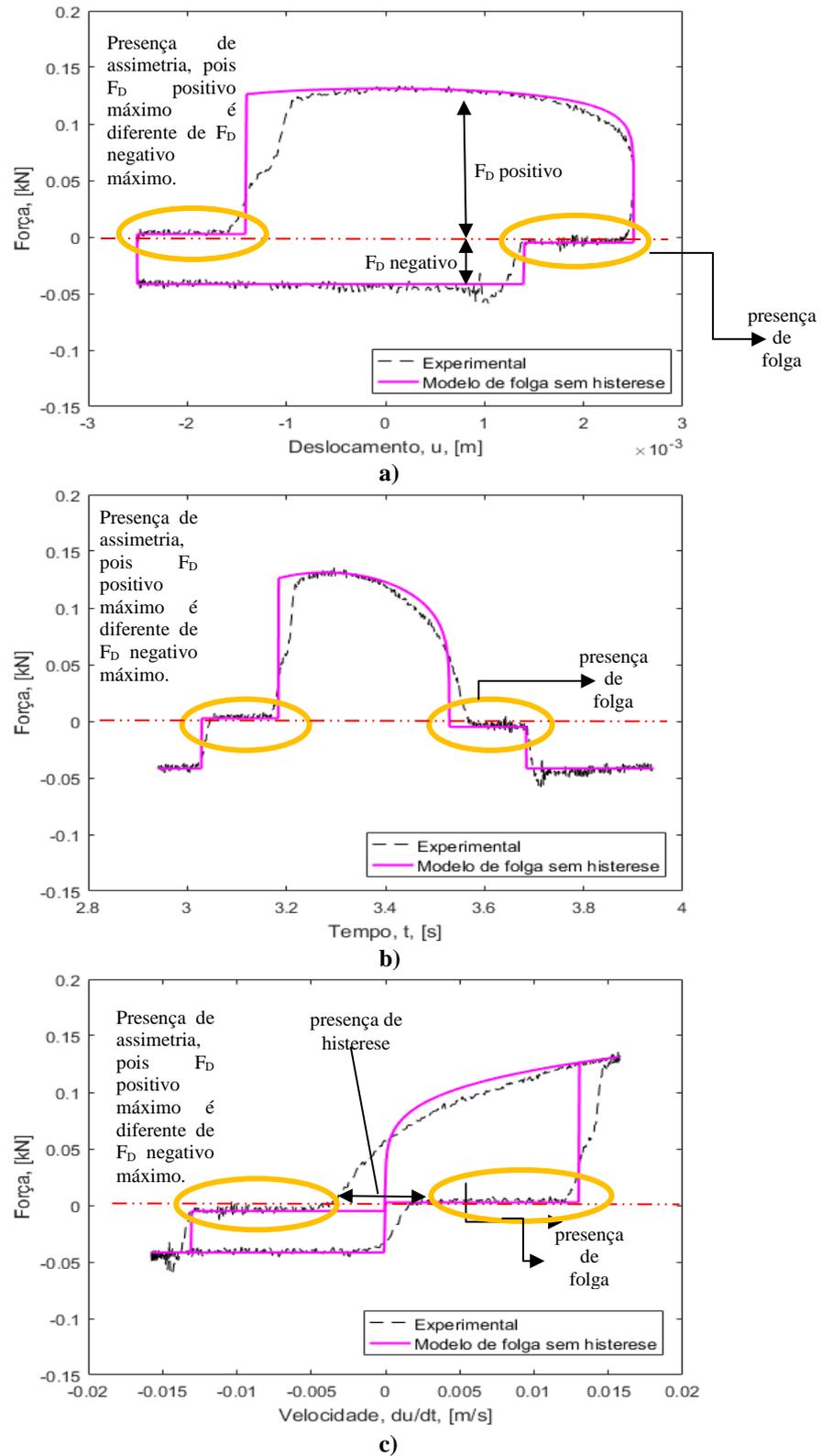
Em termos conclusivos sobre a incidência de folga aumentada no amortecedor, baseado nas projeções lineares obteve-se:

- $C_{n3}$ : apresentou um comportamento característico de crescimento do parâmetro tanto na folga menor quanto na maior, exceto na frequência de 1Hz e folga de 1,1mm onde ocorreu um pequeno decaimento do parâmetro;
- $n_{n3}$ : também apresentou um comportamento de aumento total nas folgas em 1Hz e 3Hz mas em 5Hz seu comportamento é inverso: decaimento em ambas as folgas;
- $f_{n3}$ : foi característico também de decaimento tanto na folga menor quanto na maior, exceto na frequência de 3Hz e folga de 1,1mm onde ocorreu um aumento deste parâmetro;
- $f_{dn}$ : manteve-se inalterado ao longo das variações de frequência, folga e deslocamento;
- $f_{dp}$ : manteve-se inalterado ao longo das variações de frequência, folga e deslocamento;
- Energia percentual (trabalho): apresentou-se dentro de uma faixa bem definida na folga de 1,1mm exceto na frequência de 5Hz onde valores bem mais substanciais foram alcançados em relação às frequências mais baixas analisadas.

Em termos de resultados do modelo aplicado, a **Figura 63** apresenta o primeiro resultado, como exemplo explicativo, para o amortecedor AH na condição de folga aproximada

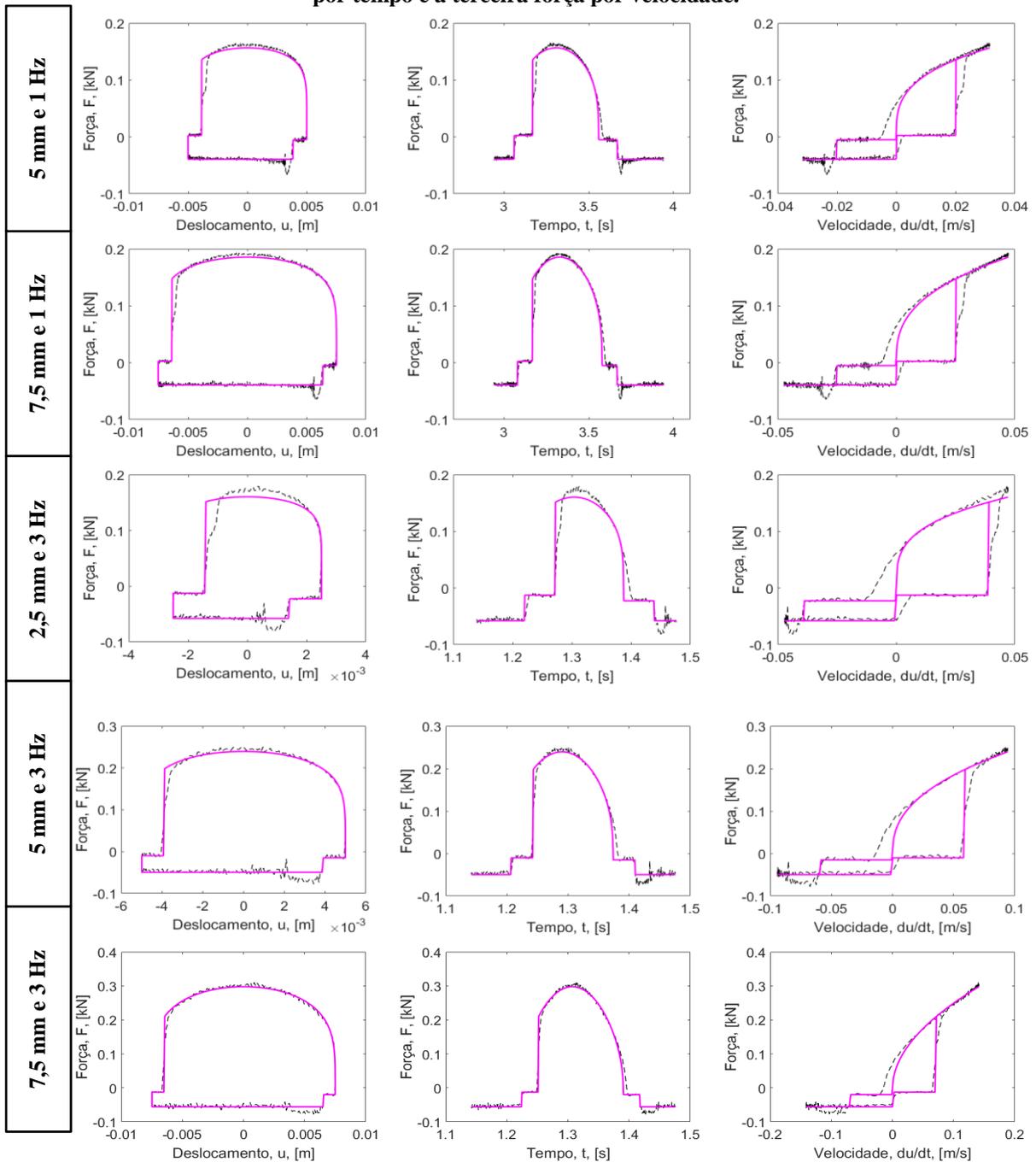
de 1,1mm, deslocamento  $\pm 2,5\text{mm}$  e frequência 1Hz. Nota-se que conforme proposição deste novo modelo da tese confirma-se que a histerese não é percebida.

**Figura 63 – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor AH com folga de fixação (aproximadamente 1,1mm): amplitude de deslocamento  $\pm 2,5\text{mm}$  e frequência 1Hz.**



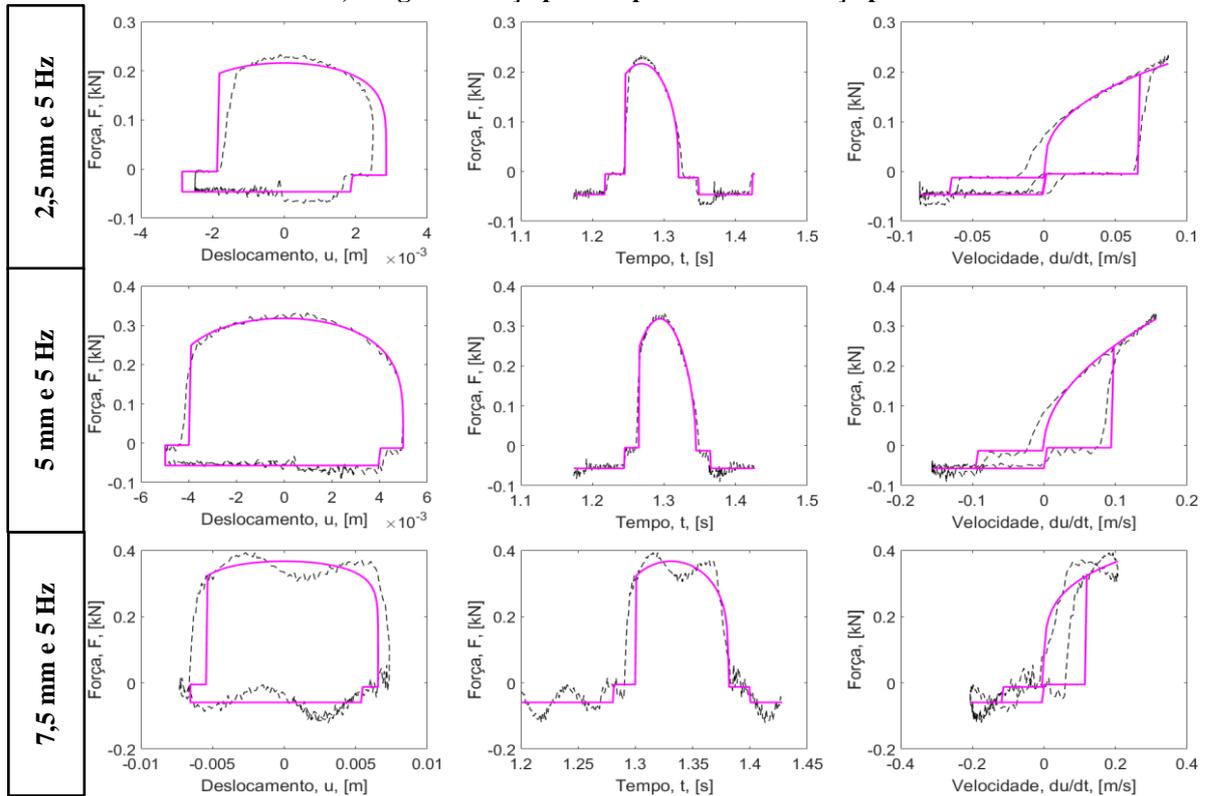
A **Figura 64** e **Figura 65** apresentam os resultados obtidos e discutidos para o amortecedor AH com folga para o novo modelo proposto de amortecimento com assimetria de força e folga de fixação.

**Figura 64 – Resultados para o amortecedor AH com folga (aproximadamente 1,1mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



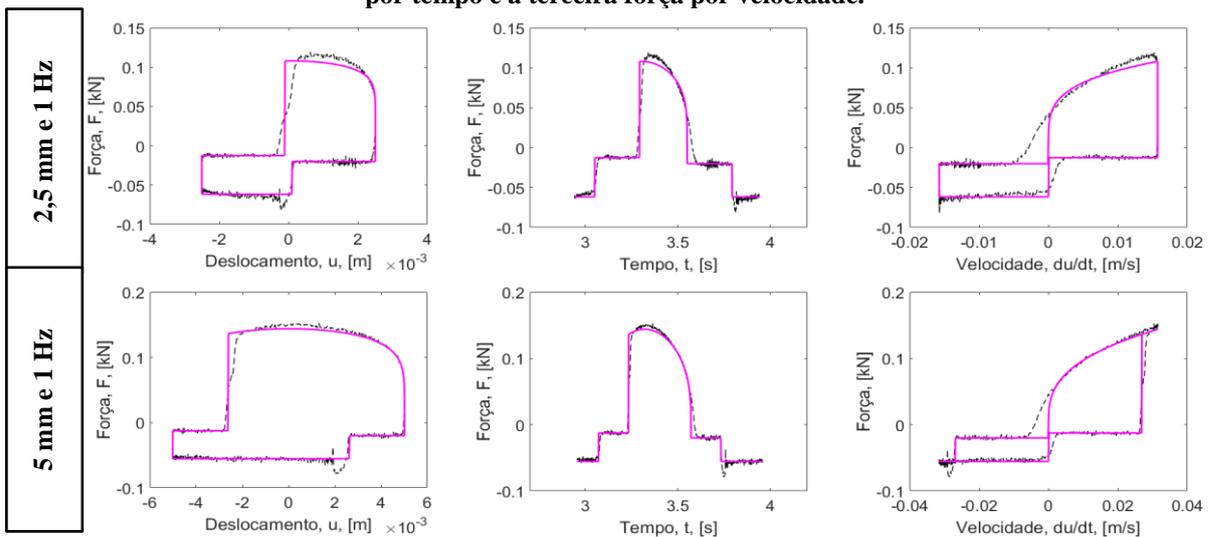
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e  
 linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 64 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH com folga (aproximadamente 1,1mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



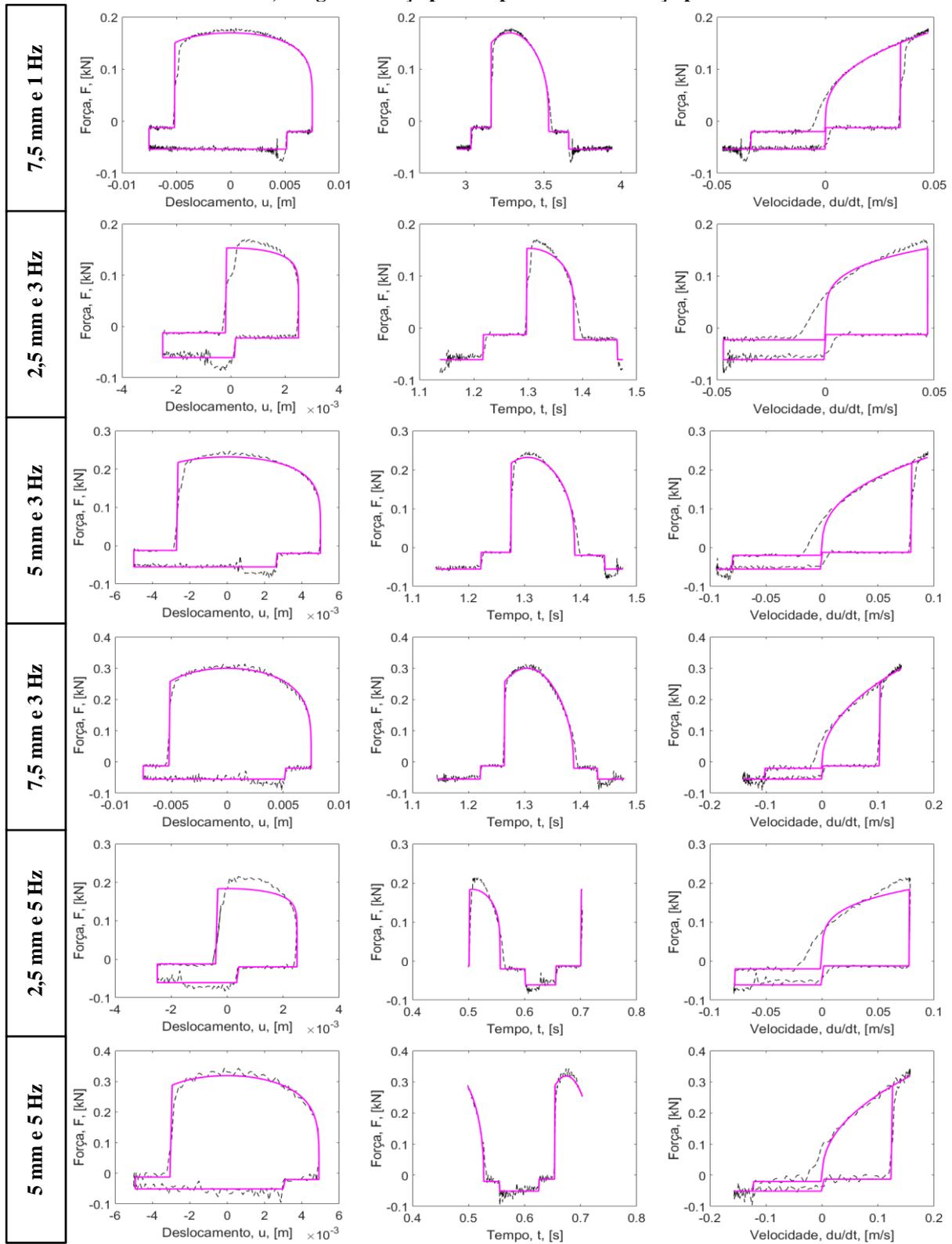
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e  
linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 65 – Resultados para o amortecedor AH com folga (aproximadamente 2,4mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



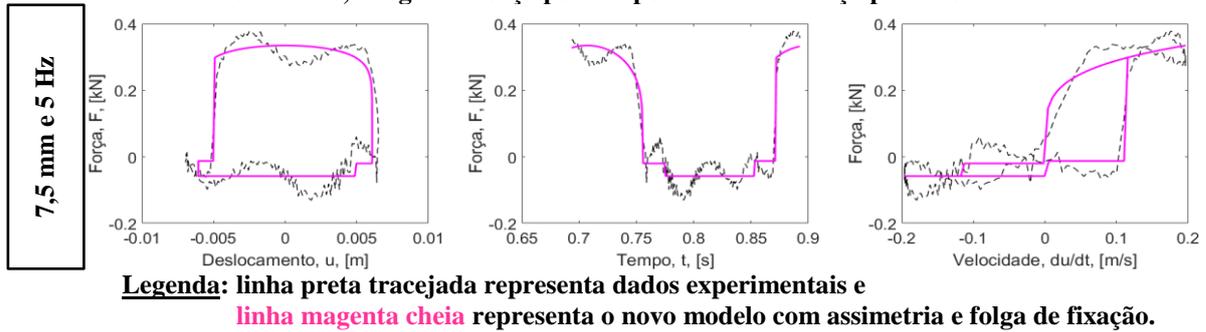
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e  
linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 65 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH com folga (aproximadamente 2,4mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais e linha magenta cheia representa o novo modelo com assimetria e folga de fixação.

**Figura 65 (continuação) – Resultados para o amortecedor AH com folga (aproximadamente 2,4mm): primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



### 6.2.3. Ensaio de Longa Duração

Quanto ao ensaio de longa duração deste amortecedor (aproximadamente 590 segundos), diferentemente dos ensaios de duração mais curta onde a percepção da influência do efeito de temperatura foi mais sutil, nestes o comportamento da temperatura tornou-se mais nítido (também na forma de incremento).

Neste caso dinâmico sem folga de fixação obteve-se, utilizando o modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência da velocidade com assimetria (Eq. 78), em termos de identificação paramétrica, a Tabela 16 de resultados obtidos.

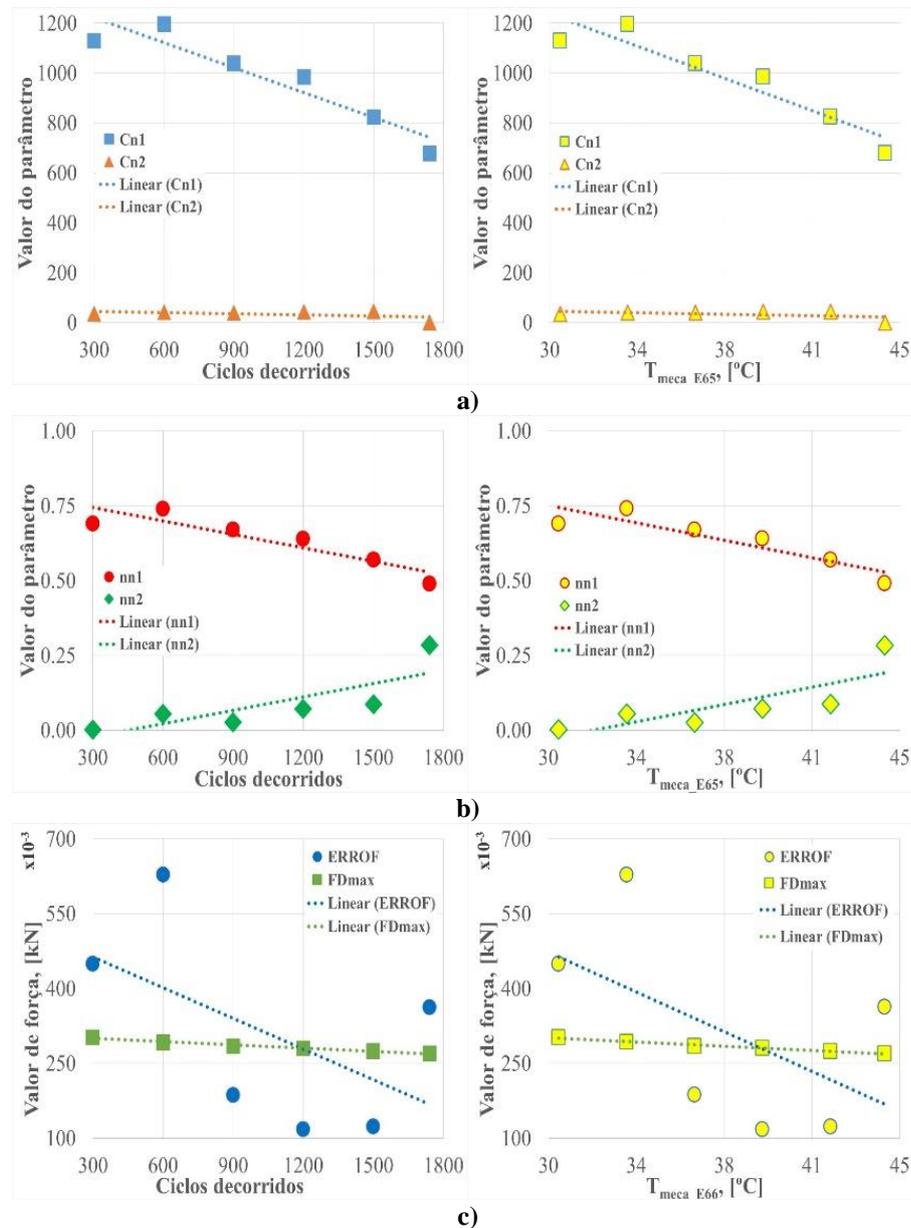
**Tabela 16 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor AH sem folga de fixação no ensaio de longa duração com frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 7,5$ mm, para o modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência da velocidade.**

| Ciclos decorridos | Parâmetros   |  |                                |                                | ERRO <sub>F</sub> [N] | F <sub>Dmax</sub> [N] |
|-------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                   | C <sub>n1</sub> [kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | C <sub>n2</sub> [kg.s <sup>nn2-2</sup> .m <sup>nn2-1</sup> ] | n <sub>n1</sub> [adimensional] | n <sub>n2</sub> [adimensional] |                       |                       |
| 300               | 1129,3   | 35,4   | 0,69                           | 0,002                          | 449,1                 | 301,9                 |
| 600               | 1196,1   | 40,9   | 0,74                           | 0,055                          | 627,8                 | 292,4                 |
| 900               | 1038,6   | 39,9   | 0,67                           | 0,026                          | 186,4                 | 284,5                 |
| 1200              | 984,4  | 43,5   | 0,64                           | 0,072                          | 117,8                 | 280,2                 |
| 1500              | 823,7  | 44,9   | 0,57                           | 0,087                          | 123,2                 | 274,1                 |
| 1740              | 678,0  | 69,5   | 0,49                           | 0,284                          | 362,6                 | 269,3                 |

A Figura 66 apresenta o perfil dos parâmetros do modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade em relação aos ciclos decorridos.

As curvas de tendência linear que aparecem na Figura 66 apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

**Figura 66 – Resultados para o amortecedor AH sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de  $C_{n1}$  e  $C_{n2}$ ; b) evolução de  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$ ; c) evolução de ERROF e  $F_{Dmax}$ .**



Com base na análise da **Tabela 16** ou da **Figura 66** pode-se observar que:

- $C_{n1}$ : este parâmetro apresentou decaimento ao longo do aumento dos ciclos de trabalho apenas apresentando dois pontos (600 e 1200 ciclos) com comportamento fora da curva;
- $C_{n2}$ : apresentou crescimento ao longo da evolução dos ciclos, exceto no ponto 900 onde houve um pequeno decaimento;
- $n_{n1}$ : apresentou comportamento similar ao de  $C_{n1}$ , inclusive nos pontos de 600 e 1200 ciclos;

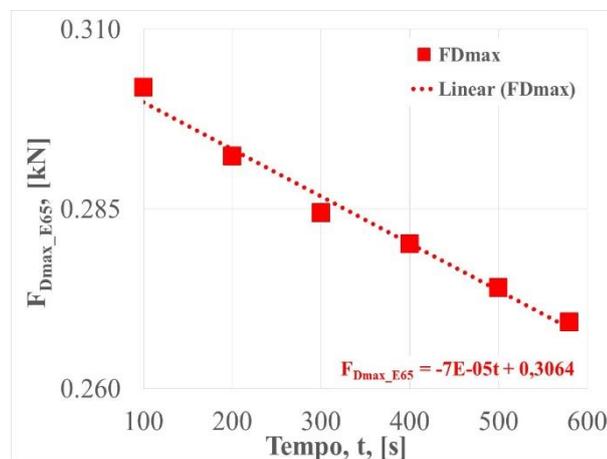
- $n_{n2}$ : apresentou comportamento similar ao de  $C_{n2}$  até 1500 ciclos e posteriormente cresceu mais significativamente;
- $ERRO_F$ : apresentou certa oscilação ao longo do aumento dos ciclos de trabalho, de modo que ocorreu crescimento de 300 para 600 ciclos, queda de 600 para 1200 ciclos, pequeno crescimento de 1200 para 1500 ciclos e crescimento mais significativo de 1500 para 1740 ciclos;
- $F_{Dmax}$ : a força de amortecimento decaiu quase que linearmente com os ciclos crescentes de trabalho.

Em termos gerais, uma projeção linear primária permitiu concluir um comportamento característico de decaimento dos parâmetros  $C_{n1}$  e  $n_{n1}$  e crescimento de  $C_{n2}$  e  $n_{n2}$  do modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade. Quanto à força de amortecimento máxima  $F_{Dmax}$  esta apresentou redução, ressaltando um comportamento característico deste amortecedor (viscoso) que relaciona queda de força de amortecimento em relação ao aumento da temperatura de trabalho.

A função de erro foi inconclusiva, não permitindo observar um padrão bem definido à medida que os ciclos (tempo de trabalho) aumentam. Para uma conclusão significativa deve-se realizar análise em pontos (ciclos) intermediários aos adotados.

Ainda em relação à **Figura 66c**, esta pode ser ainda representada em termos de tempo conforme ilustrado na **Figura 67**.

**Figura 67 – Resultados para o amortecedor AH sem folga de fixação: evolução de  $F_{Dmax}$  em termos de tempo pelo modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade.**



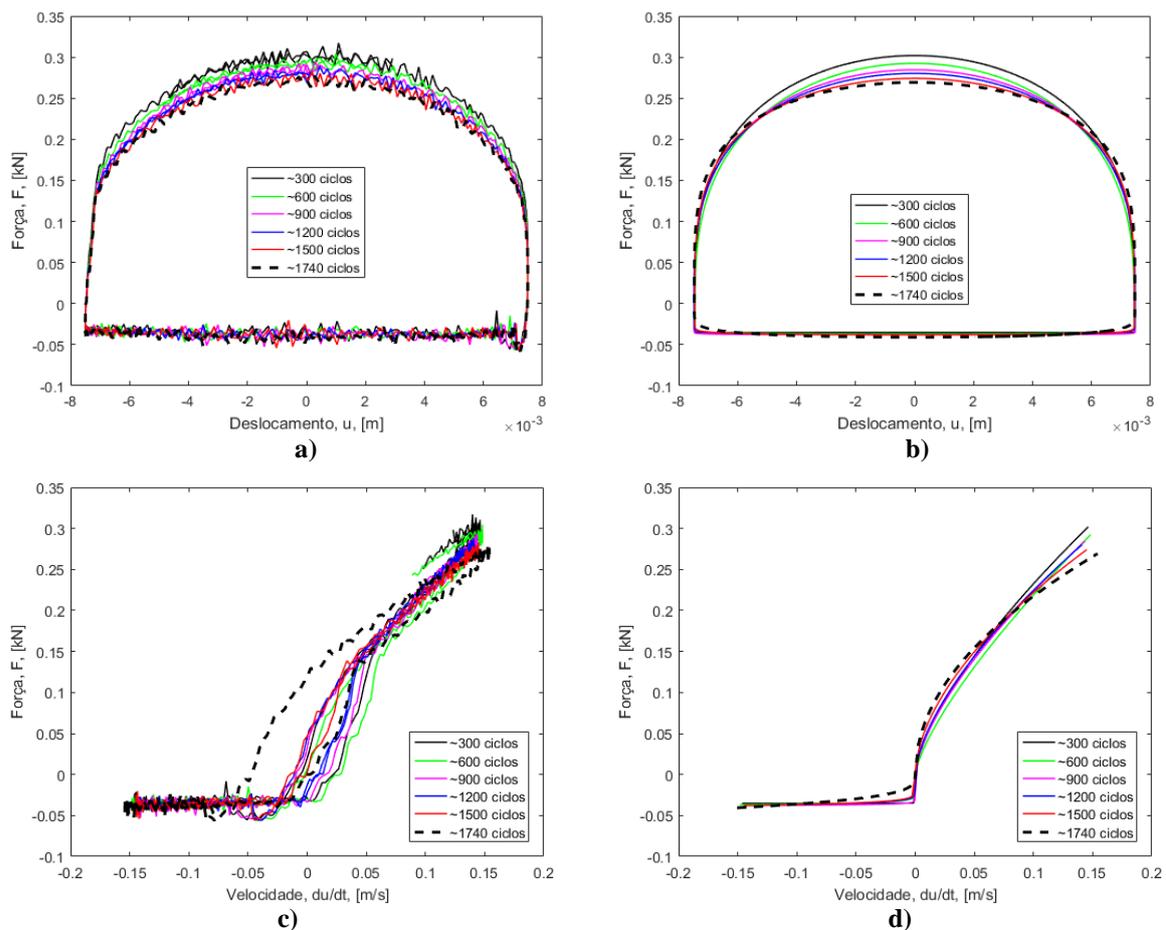
A **Eq. 94** apresenta uma aproximação linear para o comportamento da força de amortecimento máxima em relação ao tempo.

$$F_{D_{\max\_E65}}(t) = -7 \times 10^{-5} t + 0,3064 \quad \text{Eq. 94}$$

sendo  $F_{D_{\max\_E65}}$  a função de força de amortecimento máxima, [kN] pelo tempo, [s], referente ao ensaio E65. (Vide APÊNDICE A)

Uma vez identificados os parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade a **Figura 68** apresenta um comparativo entre as curvas de deslocamento e força e velocidade e força.

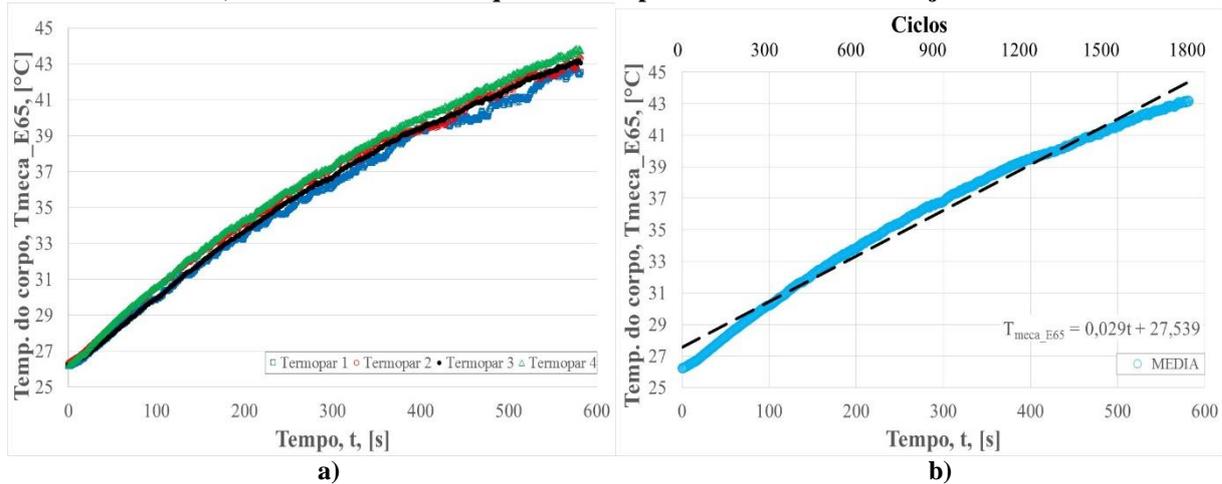
**Figura 68 – Resultados para o amortecedor AH em ensaio de longa duração para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 7,5$ mm, sem folga de fixação para os ciclos adotados como referências de análise 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1740: a) resultado experimental de força por deslocamento; b) modelo de n-ésima potência da velocidade de força por deslocamento; c) resultado experimental de força por velocidade e d) modelo de n-ésima potência da velocidade de força por velocidade.**



Vale lembrar novamente que a **Figura 68d** deixa claro que a não linearidade de histerese não é representada pelo modelo de n-ésima potência da velocidade utilizado.

Em termos da temperatura, a **Figura 69** apresenta o perfil obtido na medição da temperatura externa do corpo do amortecedor pelos termopares 1, 2, 3 e 4 posicionados conforme apresentado na **Figura 36**.

**Figura 69 – Resultados para o amortecedor AH em ensaio de longa duração: evolução da temperatura externa do corpo para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 7,5\text{mm}$ , sem folga de fixação. a) medição de cada termopar e b) média aritmética dos quatro termopares e tendência linear ajustada.**



Pela média aritmética dos dados dos quatro termopares utilizados ajustou-se de modo conveniente uma linha de tendência linear, conforme apresentado na **Eq. 95**.

$$T_{meca\_E65}(t) = 0,029t + 27,539 \quad \text{Eq. 95}$$

sendo  $T_{meca\_E65}$  a função de temperatura pelo tempo, [s], referente ao ensaio E65, em [°C]. (Vide APÊNDICE A)

De acordo com a **Figura 69** foram adotados seis ciclos para análise: 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1740 ciclos de trabalho (idem ao amortecedor AP em longa duração de ensaio exceto pelo último ciclo agora adotado).

A **Eq. 95** pode ser substituída na **Eq. 94** de modo a se obter uma relação entre a força de amortecimento máxima atuante e a temperatura média externa do corpo do amortecedor em relação. Logo, tem-se que:

$$F_{Dmax\_E65}(T_{meca\_E65}) = -7 \times 10^{-5} \left( \frac{T_{meca\_E65} - 27,539}{0,029} \right) + 0,3064 \quad \text{Eq. 96}$$

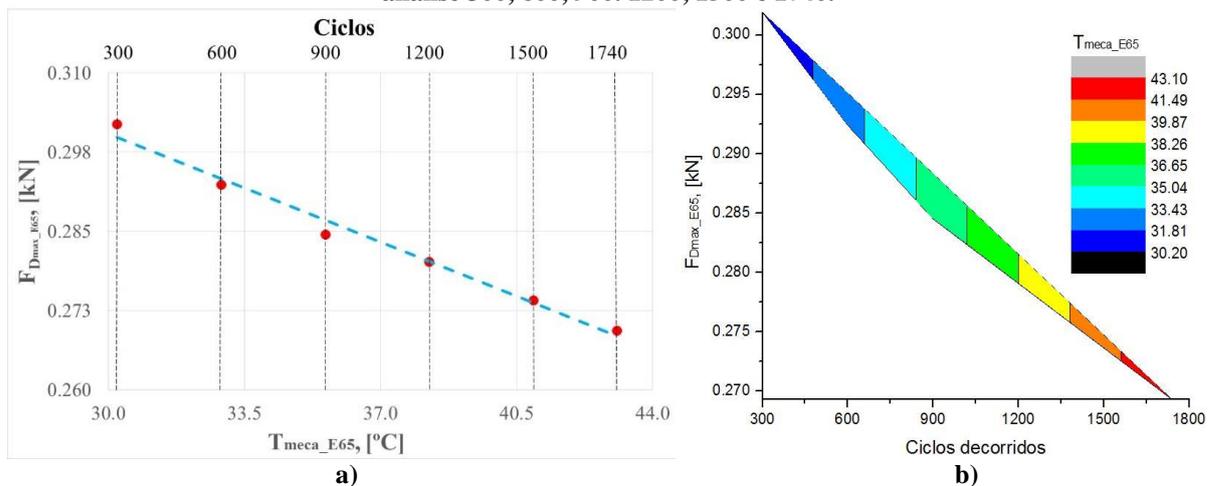
Reescrevendo a **Eq. 96** de modo mais conveniente tem-se:

$$F_{D_{\max\_E65}}(T_{\text{meca\_E65}}) = -2,41 \times 10^{-3} T_{\text{meca\_E65}} + 0,373 \quad \text{Eq. 97}$$

sendo  $F_{D_{\max\_E65}}$  a função de força de amortecimento máxima, [kN] pela temperatura média externa do corpo do amortecedor, [°C], referente ao ensaio E65. (Vide APÊNDICE A)

A **Eq. 97** indica uma tendência linear e representa um comportamento quantitativo e não qualitativo, pois não se pode afirmar seguramente que ciclos intermediários estarão dentro do padrão comportamental daqueles adotados. O comportamento linear indica uma conclusão de crescimento da força  $F_{D_{\max\_E65}}$  em relação ao crescimento da temperatura externa do corpo do atuador. A **Figura 70** apresenta os resultados isolados de força máxima pela temperatura externa do corpo para os ciclos adotados, ressaltando que as temperaturas foram obtidas através da **Eq. 95**.

**Figura 70 – Resultados para o amortecedor AH em ensaio de longa duração sem folga: evolução da temperatura externa do corpo para frequência de 3Hz e amplitude de deslocamento  $\pm 7,5\text{mm}$ . Ciclos adotados como referências de análise 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1740.**



Ficou evidenciado uma particularidade deste amortecedor seco: o aumento da temperatura do corpo relaciona-se ao aumento força de amortecimento. Este fato é relativo à sua característica de atrito viscoso, envolvido em seus fluidos de trabalho (líquido e gás). O APÊNDICE D mostra uma visão dos aspectos construtivos internos do amortecedor AH e o APÊNDICE B apresenta, em caráter ilustrativo, uma classificação do líquido como possível óleo ISO VG 15.

### 6.3. Amortecedor Magnetoreológico (MR)

Para este amortecedor (fluido de trabalho MRF-122 EG, conforme propriedades apresentadas na **Tabela 27**) obteve-se:

## 6.3.1. Sem Folga de Fixação

No caso de folga não induzida na fixação do amortecedor (folga externa nula), utilizando-se os modelos propostos de amortecimento de n-ésima potência da velocidade e de WANG et al. (2004), em termos de identificação paramétrica, obteve-se que:

**Tabela 17 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor MR sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

| Corrente<br>$I_A$ | Condição<br>dinâmica |                    | Parâmetros   |  |                            |                            | ERRO <sub>F</sub><br>[N] |
|-------------------|----------------------|--------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
|                   | $u_{max}$<br>[mm]    | Frequência<br>[Hz] | $C_{n1}$<br>[kg.s <sup><math>n_1-2</math></sup> .m <sup><math>n_1-1</math></sup> ] | $C_{n2}$<br>[kg.s <sup><math>n_2-2</math></sup> .m <sup><math>n_2-1</math></sup> ] | $n_{n1}$<br>[adimensional] | $n_{n2}$<br>[adimensional] |                          |
| 0                 | 2,5                  | 1                  | 212,7  | 263,5  | 0,19                       | 0,33                       | 1,7                      |
|                   | 5,0                  | 1                  | 276,0  | 256,3  | 0,33                       | 0,32                       | 14,5                     |
|                   | 7,5                  | 1                  | 255,1  | 172,3  | 0,27                       | 0,23                       | 40,7                     |
|                   | 2,5                  | 2                  | 196,1  | 204,4  | 0,21                       | 0,28                       | 3,1                      |
|                   | 5,0                  | 2                  | 289,1  | 257,3  | 0,32                       | 0,35                       | 25,5                     |
|                   | 7,5                  | 2                  | 417,3  | 317,7  | 0,47                       | 0,37                       | 81,3                     |
|                   | 2,5                  | 3                  | 201,6  | 253,8  | 0,22                       | 0,39                       | 11,0                     |
|                   | 5,0                  | 3                  | 396,0  | 328,0  | 0,47                       | 0,42                       | 72,3                     |
|                   | 7,5                  | 3                  | 440,8  | 455,0  | 0,46                       | 0,56                       | 657,5                    |
| 0,1               | 2,5                  | 1                  | 227,1  | 504,4  | 0,12                       | 0,29                       | 4,1                      |
|                   | 5,0                  | 1                  | 313,0  | 315,3  | 0,19                       | 0,18                       | 17,3                     |
|                   | 7,5                  | 1                  | 378,7  | 356,7  | 0,22                       | 0,21                       | 50,1                     |
|                   | 2,5                  | 2                  | 393,2  | 346,0  | 0,22                       | 0,21                       | 9,9                      |
|                   | 5,0                  | 2                  | 443,8  | 373,3  | 0,27                       | 0,24                       | 19,8                     |
|                   | 7,5                  | 2                  | 439,5  | 419,2  | 0,26                       | 0,28                       | 44,4                     |
|                   | 2,5                  | 3                  | 496,4  | 410,2  | 0,30                       | 0,30                       | 37,4                     |
|                   | 5,0                  | 3                  | 5012,0   | 417,1  | 0,34                       | 0,30                       | 244,2                    |
|                   | 7,5                  | 3                  | 432,2  | 470,7  | 0,28                       | 0,33                       | 335,1                    |
| 0,2               | 2,5                  | 1                  | 938,4  | 951,3  | 0,30                       | 0,31                       | 17,9                     |
|                   | 5,0                  | 1                  | 577,6  | 595,8  | 0,20                       | 0,20                       | 52,3                     |
|                   | 7,5                  | 1                  | 643,1  | 588,3  | 0,21                       | 0,19                       | 165,6                    |
|                   | 2,5                  | 2                  | 722,4  | 672,6  | 0,25                       | 0,23                       | 30,0                     |
|                   | 5,0                  | 2                  | 640,4  | 630,6  | 0,21                       | 0,22                       | 73,8                     |
|                   | 7,5                  | 2                  | 692,8  | 571,2  | 0,25                       | 0,20                       | 90,4                     |
|                   | 2,5                  | 3                  | 584,3  | 814,0  | 0,19                       | 0,32                       | 110,0                    |
|                   | 5,0                  | 3                  | 593,7  | 613,2  | 0,22                       | 0,22                       | 245,3                    |
|                   | 7,5                  | 3                  | 674,1  | 593,4  | 0,27                       | 0,22                       | 973,1                    |
| 0,3               | 2,5                  | 1                  | 2633,7   | 2598,4   | 0,47                       | 0,45                       | 60,4                     |
|                   | 5,0                  | 1                  | 1081,7   | 968,3  | 0,27                       | 0,23                       | 187,2                    |
|                   | 7,5                  | 1                  | 945,0  | 824,4  | 0,24                       | 0,19                       | 341,0                    |
|                   | 2,5                  | 2                  | 1186,4   | 1361,8   | 0,29                       | 0,33                       | 131,9                    |
|                   | 5,0                  | 2                  | 932,9  | 762,8  | 0,24                       | 0,18                       | 217,8                    |
|                   | 7,5                  | 2                  | 871,9  | 739,1  | 0,22                       | 0,17                       | 275,7                    |
|                   | 2,5                  | 3                  | 993,4  | 1149,3   | 0,26                       | 0,31                       | 207,6                    |
|                   | 5,0                  | 3                  | 817,1  | 793,2  | 0,20                       | 0,20                       | 274,3                    |
|                   | 7,5                  | 3                  | 867,1  | 772,3  | 0,23                       | 0,19                       | 1808,6                   |
| 0,4               | 2,5                  | 1                  | 12011,0  | 2629,0   | 0,78                       | 0,38                       | 135,1                    |
|                   | 5,0                  | 1                  | 2003,2   | 1579,2   | 0,37                       | 0,29                       | 301,2                    |
|                   | 7,5                  | 1                  | 1392,3   | 1101,4   | 0,27                       | 0,21                       | 615,5                    |
|                   | 2,5                  | 2                  | 2231,6   | 1775,8   | 0,40                       | 0,34                       | 375,7                    |
|                   | 5,0                  | 2                  | 1209,6   | 1155,9   | 0,23                       | 0,23                       | 728,0                    |
|                   | 7,5                  | 2                  | 1213,8   | 943,0  | 0,25                       | 0,16                       | 800,4                    |

**Tabela 17 (continuação) – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor MR sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade.**

| Corrente [A] | Condição dinâmica |                 | Parâmetros  |   |                         |                         | ERRO <sub>F</sub> [N] |
|--------------|-------------------|-----------------|---|---|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
|              | $ u_{max} $ [mm]  | Frequência [Hz] | $C_{n1}$ [kg.s <sup>nn1-2</sup> .m <sup>nn1-1</sup> ] | $C_{n2}$ [kg.s <sup>nn2-2</sup> .m <sup>nn2-1</sup> ] | $n_{n1}$ [adimensional] | $n_{n2}$ [adimensional] |                       |
| 0,4          | 2,5               | 3               | 1308,9  | 1966,0  | 0,26                    | 0,39                    | 866,7                 |
|              | 5,0               | 3               | 1415,3  | 1452,3  | 0,32                    | 0,34                    | 1001,1                |
|              | 7,5               | 3               | 1120,7  | 1017,5  | 0,23                    | 0,20                    | 3340,0                |
| 0,5          | 2,5               | 1               | 7627,3  | 2094,6  | 0,61                    | 0,84                    | 302,3                 |
|              | 5,0               | 1               | 3125,6  | 2796,4  | 0,42                    | 0,38                    | 644,8                 |
|              | 7,5               | 1               | 1939,0  | 1700,0  | 0,30                    | 0,27                    | 1103,4                |
|              | 2,5               | 2               | 4736,8  | 3418,2  | 0,54                    | 0,45                    | 709,2                 |
|              | 5,0               | 2               | 1953,6  | 1543,7  | 0,33                    | 0,25                    | 1407,0                |
|              | 7,5               | 2               | 1388,5  | 1298,0  | 0,21                    | 0,21                    | 1463,9                |
|              | 2,5               | 3               | 2213,1  | 2673,3  | 0,34                    | 0,42                    | 1187,7                |
|              | 5,0               | 3               | 1897,2  | 1388,7  | 0,35                    | 0,24                    | 5273,2                |
|              | 7,5               | 3               | 1192,5  | 1286,2  | 0,16                    | 0,22                    | 5180,7                |
| 0,6          | 2,5               | 1               | 9905,1  | 15819,0   | 0,61                    | 0,74                    | 525,0                 |
|              | 5,0               | 1               | 2771,0  | 3676,3  | 0,33                    | 0,43                    | 1024,8                |
|              | 7,5               | 1               | 2017,5  | 2282,9  | 0,25                    | 0,32                    | 1236,4                |
|              | 2,5               | 2               | 3525,1  | 3902,4  | 0,40                    | 0,45                    | 1062,6                |
|              | 5,0               | 2               | 2144,9  | 1925,0  | 0,30                    | 0,27                    | 1552,5                |
|              | 7,5               | 2               | 1715,9  | 1422,0  | 0,24                    | 0,19                    | 1954,5                |
|              | 2,5               | 3               | 2632,8  | 3031,1  | 0,35                    | 0,42                    | 1995,9                |
|              | 5,0               | 3               | 1501,4  | 1668,7  | 0,19                    | 0,26                    | 3031,5                |
|              | 7,5               | 3               | 1357,3  | 1548,9  | 0,15                    | 0,25                    | 8638,2                |

**Tabela 18 – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor MR sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de WANG et al. (2004).**

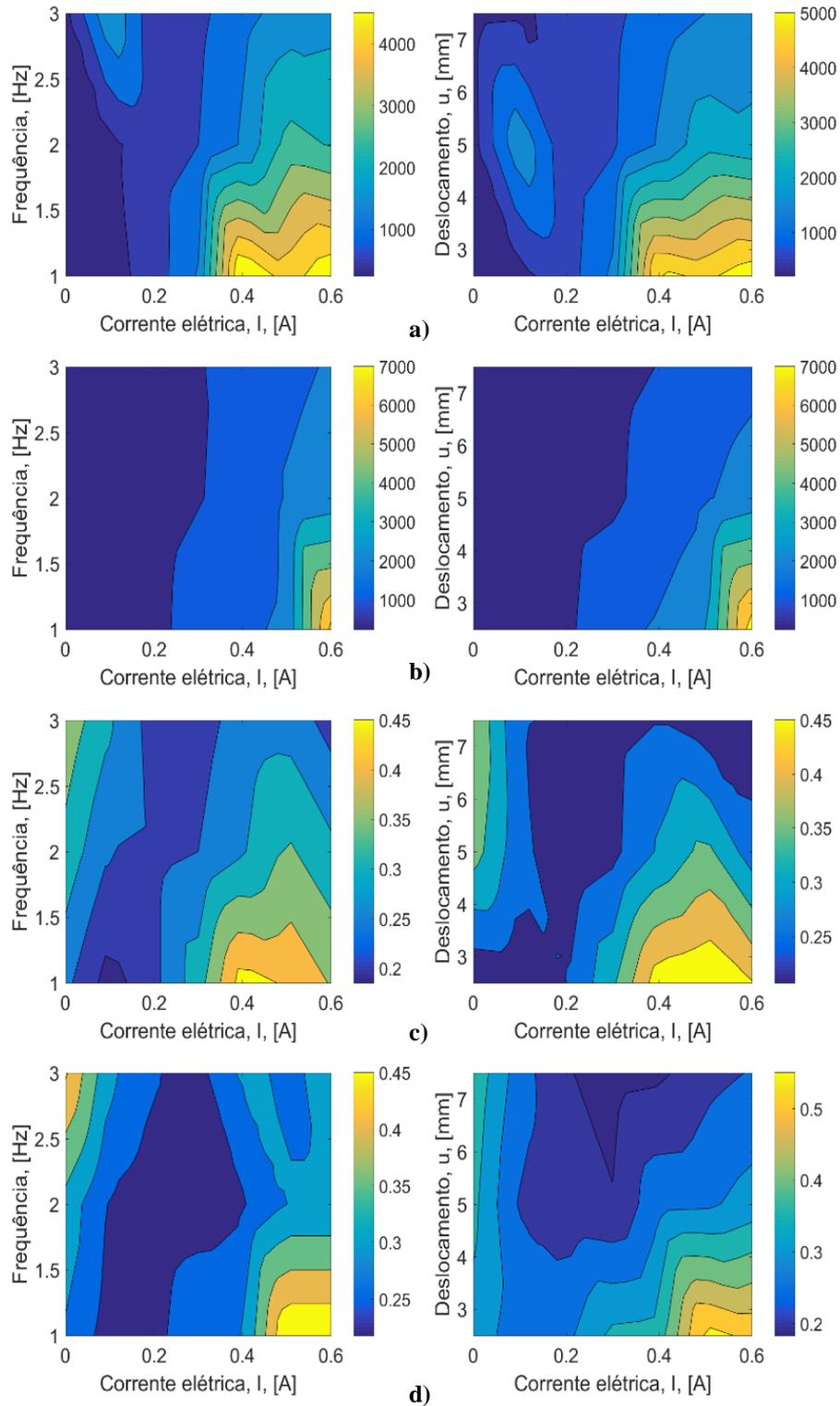
| Corrente [A] | Condição dinâmica |            | Parâmetros   |           |           |        |             |                          |                          |                           |        |          |          |        |        |        |        |        |
|--------------|-------------------|------------|--------------|-----------|-----------|--------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | $ u_{max} $ [mm]  | freq. [Hz] | $f_{0w}$ [N] | $I_0$ [A] | $I_1$ [A] | $a_0$  | $a_1$ [m/s] | $a_2$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_3$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_4$ [m/s] <sup>-1</sup> | $k_0$  | $k_{1c}$ | $k_{1e}$ | $k_2$  | $k_3$  | $k_4$  | $k_5$  | $k_6$  |
| 0            | 2,5               | 1          | 28,7         | -0,199    | 0,492     | 22247  | 6,02        | -45,8                    | 1,450                    | 11,65                     | 1638   | 19,99    | 37,71    | 527,6  | -67,9  | -0,091 | -0,260 | 0,006  |
|              | 5,0               | 1          | 27,9         | 0,098     | 0,514     | -1746  | 5,74        | -17,9                    | 0,189                    | -7,0                      | -121,7 | 9,96     | 9,80     | 44,7   | 47,7   | -0,064 | -0,004 | 0,014  |
|              | 7,5               | 1          | 17,4         | -0,013    | -0,046    | -98,2  | 27,5        | 1,802                    | -1,877                   | 2,343                     | -28,0  | 9,59     | -0,683   | -0,750 | 9,58   | -0,061 | 0,021  | 0,042  |
|              | 2,5               | 2          | 44,3         | -0,991    | 0,459     | 43473  | -28,9       | -37,6                    | 10,97                    | 22,3                      | 3120   | 20,67    | 28,8     | 105,9  | -26,0  | -0,071 | -0,141 | 0,008  |
|              | 5,0               | 2          | 27,6         | 0,221     | 0,658     | 2638   | 3,126       | 21,3                     | 0,999                    | -16,3                     | 90,6   | 3,887    | 5,351    | 520,6  | 26,3   | -0,054 | -0,163 | 0,007  |
|              | 7,5               | 2          | 22,1         | 0,045     | 0,148     | 5322   | 7,18        | -0,464                   | -1,185                   | -4,246                    | 151,5  | 8,10     | 7,28     | -5,914 | 19,4   | -0,041 | 0,010  | 0,010  |
|              | 2,5               | 3          | 4,761        | 0,057     | 0,031     | -172,4 | 49,6        | -7,27                    | 0,126                    | 3,159                     | -29,8  | 14,0     | 20,5     | 295,3  | -50,7  | -0,076 | -0,211 | 0,012  |
|              | 5,0               | 3          | 9,25         | -0,102    | -1,311    | -1666  | 17,9        | -0,247                   | -1,297                   | -7,67                     | -59,0  | 7,09     | 5,222    | 377,0  | -29,1  | -0,047 | 0,056  | 0,017  |
|              | 7,5               | 3          | 27,4         | -0,024    | -0,166    | -0,318 | 1,018       | 1,738                    | -0,479                   | -2,018                    | -7,10  | 12,2     | 8,34     | 63,8   | -2,313 | -0,036 | 0,040  | 0,022  |
| 0,1          | 2,5               | 1          | 3,255        | 0,003     | -0,065    | 949,4  | 8,07        | 0,045                    | -1,022                   | 18,5                      | 44,8   | 9,4      | 2,534    | 37,2   | 3,69   | 0,089  | 0,066  | 0,018  |
|              | 5,0               | 1          | 4,007        | 0,093     | -0,160    | -397,3 | 3,660       | 4,210                    | -1,936                   | 3,143                     | -59,1  | 11,72    | 3,840    | 37,5   | 12,18  | 0,010  | 0,096  | 0,018  |
|              | 7,5               | 1          | 1,427        | -0,113    | -0,172    | 1157   | -0,328      | 1,313                    | -0,022                   | -2,614                    | 57,5   | 2,309    | 3,822    | 102,9  | 2,882  | 0,340  | -0,053 | -0,000 |
|              | 2,5               | 2          | 0,573        | -0,218    | -0,162    | 14,0   | 12,2        | 7,28                     | -13,9                    | -11,5                     | -30,7  | 8,80     | 4,182    | 113,4  | 1,455  | 0,253  | 0,027  | 0,022  |
|              | 5,0               | 2          | 2,264        | 0,142     | -0,180    | 5797   | -12,8       | 2,475                    | -2,533                   | -5,836                    | 232,0  | 5,486    | 6,48     | 95,9   | 2,170  | 0,170  | -0,070 | -0,000 |
|              | 7,5               | 2          | 3,752        | 0,173     | 0,004     | -6,93  | 6,86        | 5,115                    | -0,903                   | -15,6                     | -10,9  | 1,438    | 1,497    | 41,7   | 26,8   | 0,003  | -0,062 | 0,003  |
|              | 2,5               | 3          | 3,078        | 0,075     | 0,121     | 7634   | 5,195       | 23,2                     | -1,373                   | -13,8                     | 474,6  | 2,942    | 5,258    | 121,5  | 13,6   | 0,016  | -0,166 | 0,002  |
|              | 5,0               | 3          | 2,757        | 0,085     | -0,353    | 1826   | -4,441      | 0,040                    | -0,033                   | 0,769                     | 58,2   | 7,96     | 6,40     | 59,4   | 8,48   | 0,019  | -0,013 | 0,013  |
|              | 7,5               | 3          | 7,80         | -0,084    | -0,207    | 3397   | -3,742      | 0,042                    | -1,668                   | 2,707                     | 155,4  | 11,5     | 3,013    | 23,5   | 2,253  | 0,109  | 0,201  | 0,037  |
| 0,2          | 2,5               | 1          | 6,040        | 0,081     | -0,019    | 1643   | 4,686       | 0,729                    | -0,103                   | -0,872                    | 225,3  | 10,31    | 5,178    | 36,9   | 2,990  | 0,185  | 0,021  | 0,020  |
|              | 5,0               | 1          | 5,413        | -0,023    | -0,106    | 2747   | 2,694       | 1,338                    | -0,668                   | 2,818                     | 241,7  | 6,875    | 7,356    | 40,9   | 2,817  | 0,152  | 0,007  | 0,002  |
|              | 7,5               | 1          | 9,40         | 0,073     | -0,278    | -266,7 | 8,31        | 3,532                    | -0,978                   | -4,393                    | -40,8  | 5,103    | 4,992    | 23,3   | 2,801  | 0,105  | -0,010 | 0,005  |

**Tabela 18 (continuação) – Resumo dos parâmetros obtidos para o amortecedor MR sem folga de fixação, para o modelo de amortecimento de WANG et al. (2004).**

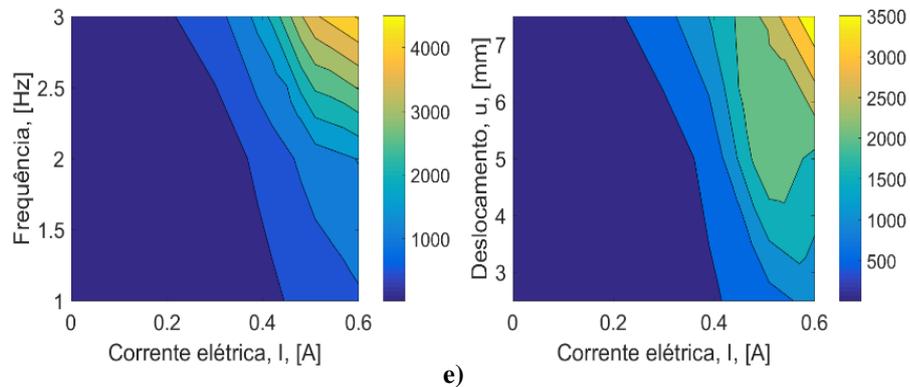
| Corrente [A] | Condição dinâmica |            | Parâmetros   |           |           |        |             |                          |                          |                           |       |          |          |        |       |        |        |        |  |
|--------------|-------------------|------------|--------------|-----------|-----------|--------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------|----------|--------|-------|--------|--------|--------|--|
|              | $u_{max}$ [mm]    | freq. [Hz] | $f_{0w}$ [N] | $I_0$ [A] | $I_1$ [A] | $a_0$  | $a_1$ [m/s] | $a_2$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_3$ [A <sup>-1</sup> ] | $a_4$ [m/s] <sup>-1</sup> | $k_0$ | $k_{1c}$ | $k_{1e}$ | $k_2$  | $k_3$ | $k_4$  | $k_5$  | $k_6$  |  |
| 0,2          | 2,5               | 2          | 7,74         | 0,005     | -0,063    | 3317   | -9,490      | 12,2                     | -4,442                   | -15,4                     | 342,0 | 3,652    | 5,643    | 35,9   | 2,760 | 0,165  | -0,042 | -0,010 |  |
|              | 5,0               | 2          | 5,612        | 0,084     | -0,122    | 1963   | 8,22        | 4,916                    | -1,232                   | 0,958                     | 114,7 | 6,19     | 6,89     | 39,5   | 3,278 | 0,086  | -0,037 | -0,002 |  |
|              | 7,5               | 2          | 12,1         | 0,024     | -0,011    | 1608   | -4,811      | 4,788                    | -2,077                   | 3,817                     | 76,6  | 6,496    | 6,248    | 26,5   | 2,191 | 0,447  | -0,027 | 0,002  |  |
|              | 2,5               | 3          | 8,68         | -0,060    | 0,632     | 3118   | -7,87       | 8,77                     | -0,022                   | 8,06                      | 262,9 | 9,97     | 12,31    | 23,96  | 2,365 | 0,684  | -0,051 | -0,001 |  |
|              | 5,0               | 3          | 4,948        | -0,039    | 0,023     | 1469   | -33,4       | 0,030                    | -0,057                   | 8,83                      | 75,4  | 10,67    | 9,49     | 98,3   | 2,134 | 1,016  | 0,026  | 0,007  |  |
|              | 7,5               | 3          | 2,718        | 0,050     | 0,060     | 1644   | 6,84        | 4,425                    | -1,385                   | 6,02                      | 69,1  | 8,07     | 7,53     | 59,2   | 3,770 | 0,057  | -0,006 | 0,002  |  |
| 0,3          | 2,5               | 1          | 11,8         | 0,084     | -0,060    | 943,0  | -0,703      | 0,045                    | -0,005                   | -1,173                    | 176,0 | 18,8     | -0,957   | 28,214 | 4,12  | 0,289  | 0,146  | 0,068  |  |
|              | 5,0               | 1          | 7,48         | 0,111     | -0,047    | 1672   | 1,828       | 3,748                    | -0,006                   | 0,853                     | 226,3 | 4,96     | 3,326    | 58,8   | 10,80 | 0,0285 | 0,038  | 0,006  |  |
|              | 7,5               | 1          | 5,649        | 0,024     | -0,035    | 2702   | 10,38       | 2,370                    | -0,976                   | -6,19                     | 277,1 | 3,707    | 2,003    | 50,9   | 7,32  | 0,026  | 0,061  | 0,015  |  |
|              | 2,5               | 2          | 8,425        | 0,065     | 0,045     | 1512   | 2,516       | 0,008                    | -1,447                   | 11,1                      | 244,6 | 6,27     | 4,357    | 50,3   | 4,863 | 0,079  | 0,0261 | 0,008  |  |
|              | 5,0               | 2          | 7,36         | 0,082     | 0,229     | 3008   | 14,6        | 3,475                    | -0,021                   | 6,79                      | 310,6 | 5,147    | 3,806    | 33,4   | 3,068 | 0,142  | 0,015  | 0,004  |  |
|              | 7,5               | 2          | 9,28         | 0,042     | -0,136    | 32,5   | 3,756       | 6,95                     | -0,675                   | 3,075                     | -8,15 | 4,457    | 3,838    | 38,8   | 2,327 | 0,266  | -0,001 | 0,006  |  |
|              | 2,5               | 3          | 3,975        | 0,051     | -0,027    | 1883   | 2,376       | 6,141                    | -1,747                   | -3,141                    | 256,0 | 2,999    | 3,309    | 104,4  | 9,812 | 0,028  | -0,003 | -0,003 |  |
|              | 5,0               | 3          | 16,4         | 0,059     | 0,018     | 1641   | 0,299       | 3,059                    | -3,495                   | 3,882                     | 130,7 | 4,527    | 3,848    | 23,7   | 2,964 | 0,174  | 0,009  | 0,007  |  |
|              | 7,5               | 3          | 3,850        | 0,083     | -0,282    | 1323   | 9,58        | 3,761                    | -0,099                   | 2,935                     | 80,1  | 3,805    | 3,314    | 49,3   | 5,081 | 0,034  | 0,000  | 0,000  |  |
| 0,4          | 2,5               | 1          | 3,899        | 0,068     | -0,065    | 1119   | 2,705       | 0,024                    | -0,021                   | 6,15                      | 338,5 | 9,56     | 4,384    | 128,9  | 3,890 | 0,091  | 0,100  | 0,025  |  |
|              | 5,0               | 1          | 7,61         | 0,100     | -0,144    | 827,7  | 2,687       | 2,851                    | -0,704                   | 2,692                     | 118,2 | 8,07     | 3,379    | 70,0   | 3,633 | 0,090  | 0,077  | 0,018  |  |
|              | 7,5               | 1          | 9,70         | 0,040     | -0,157    | 1414   | 6,77        | 4,295                    | -0,006                   | 3,066                     | 175,9 | 4,876    | 1,816    | 47,1   | 7,96  | 0,030  | 0,043  | 0,016  |  |
|              | 2,5               | 2          | 8,340        | 0,012     | -0,190    | 1269   | 3,564       | 0,010                    | -2,583                   | 1,901                     | 253,9 | 4,118    | 4,097    | 56,9   | 4,031 | 0,072  | -0,004 | -0,002 |  |
|              | 5,0               | 2          | 4,738        | 0,024     | 0,023     | 3443   | 12,1        | 0,019                    | -1,646                   | 3,725                     | 458,1 | 3,149    | 3,192    | 69,6   | 3,832 | 0,093  | -0,017 | 0,000  |  |
|              | 7,5               | 2          | 6,89         | 0,040     | -0,023    | 3084   | 4,127       | 2,055                    | -1,392                   | 5,139                     | 291,8 | 4,423    | 3,244    | 64,0   | 3,782 | 0,071  | 0,003  | 0,008  |  |
|              | 2,5               | 3          | 3,461        | -0,048    | 0,147     | 1820   | 8,89        | 0,866                    | -8,36                    | -5,765                    | 332,1 | 1,505    | 1,702    | 120,7  | 8,74  | 0,116  | -0,016 | -0,002 |  |
|              | 5,0               | 3          | 6,46         | 0,127     | 0,037     | 2804   | 19,2        | 3,924                    | -0,016                   | 4,063                     | 295,7 | 3,631    | 3,095    | 28,3   | 6,32  | 0,040  | 0,009  | 0,007  |  |
|              | 7,5               | 3          | 6,59         | 0,000     | 0,013     | 3099   | 17,3        | 5,000                    | -1,159                   | 3,515                     | 241,9 | 3,911    | 2,603    | 11,4   | 5,617 | 0,036  | 0,019  | 0,015  |  |
| 0,5          | 2,5               | 1          | 10,05        | 0,064     | -0,038    | 834,4  | -2,67       | 0,578                    | -0,005                   | 4,086                     | 305,4 | 8,75     | 1,424    | 73,2   | 3,297 | 0,232  | 0,063  | 0,051  |  |
|              | 5,0               | 1          | 10,91        | 0,291     | 0,006     | 0,108  | -0,049      | 0,004                    | -2,743                   | -4,332                    | -31,7 | 5,004    | 5,125    | 73,8   | 8,75  | 0,030  | 0,013  | 0,006  |  |
|              | 7,5               | 1          | 6,51         | 0,038     | -0,112    | 682,3  | 5,499       | 0,006                    | -1,279                   | 11,40                     | 83,3  | 2,864    | 3,720    | 101,0  | 3,247 | 0,124  | -0,021 | 0,003  |  |
|              | 2,5               | 2          | 13,45        | 0,038     | -0,124    | -0,546 | 3,944       | 4,879                    | -0,230                   | 12,75                     | -31,9 | 1,942    | 1,748    | 53,7   | 2,844 | 0,314  | -0,007 | 0,015  |  |
|              | 5,0               | 2          | 5,356        | 0,319     | -0,104    | 648,9  | 8,76        | 0,018                    | -0,211                   | -5,184                    | 71,0  | 1,828    | 3,424    | 85,0   | 4,810 | 0,076  | -0,064 | -0,004 |  |
|              | 7,5               | 2          | 6,57         | -0,009    | -0,010    | 1356   | 0,313       | 0,332                    | -0,006                   | 6,01                      | 122,2 | 4,312    | 4,513    | 96,6   | 3,218 | 0,206  | -0,026 | 0,010  |  |
|              | 2,5               | 3          | 1,950        | -0,174    | 0,269     | 844,6  | 15,8        | 5,093                    | -2,469                   | 11,7                      | 138,5 | 7,39     | 4,161    | 152,2  | 3,194 | 0,479  | 0,016  | 0,039  |  |
|              | 5,0               | 3          | 5,387        | 0,013     | -0,156    | 1999   | 0,017       | 3,954                    | -2,020                   | 5,043                     | 217,2 | 2,893    | 3,914    | 125,2  | 2,683 | 0,208  | -0,045 | 0,011  |  |
|              | 7,5               | 3          | 6,08         | 0,012     | -0,071    | 2891   | 10,15       | 4,130                    | -1,853                   | 3,609                     | 218,1 | 3,245    | 2,924    | 42,2   | 3,512 | 0,100  | -0,012 | 0,009  |  |
| 0,6          | 2,5               | 1          | 109,3        | 0,982     | 0,569     | 927,2  | -54,6       | 2,932                    | -0,006                   | -42,7                     | 149,0 | 2,650    | 39,4     | 46,9   | 3,867 | 0,232  | -0,393 | -0,198 |  |
|              | 5,0               | 1          | 23,3         | 0,250     | -0,134    | -4986  | 12,2        | 5,091                    | -7,03                    | -0,454                    | -1005 | -0,361   | 6,500    | 58,0   | 1,934 | 0,315  | -0,122 | -0,021 |  |
|              | 7,5               | 1          | 16,2         | 0,151     | -0,179    | 578,3  | -1,264      | 6,04                     | -2,620                   | 2,398                     | 60,0  | 2,561    | 3,903    | 82,8   | 3,236 | 0,106  | -0,059 | 0,013  |  |
|              | 2,5               | 2          | 12,6         | 0,045     | -0,102    | 1077   | 3,951       | 1,475                    | -0,440                   | 10,68                     | 210,3 | 4,814    | 1,340    | 60,3   | 6,377 | 0,068  | 0,012  | 0,053  |  |
|              | 5,0               | 2          | 11,1         | 0,114     | -0,056    | 2025   | 4,595       | 0,007                    | -1,750                   | -0,728                    | 250,4 | 3,642    | 3,614    | 56,5   | 4,572 | 0,086  | -0,006 | 0,022  |  |
|              | 7,5               | 2          | 9,399        | 0,024     | -0,108    | 2008   | -4,855      | 10,62                    | -3,955                   | -2,118                    | 185,2 | 1,934    | 2,184    | 111,6  | 7,46  | 0,028  | -0,043 | 0,011  |  |
|              | 2,5               | 3          | 9,881        | 0,055     | -0,166    | 7,26   | -5,750      | 0,009                    | -2,688                   | 9,121                     | -19,9 | 3,85     | 3,76     | 88,2   | 3,243 | 0,167  | -0,030 | 0,037  |  |
|              | 5,0               | 3          | 7,44         | 0,067     | 0,058     | 2297   | 10,40       | 5,284                    | -0,002                   | 4,907                     | 255,3 | 2,878    | 2,342    | 68,1   | 6,61  | 0,138  | -0,017 | 0,024  |  |
|              | 7,5               | 3          | 8,61         | 0,071     | -0,014    | 2069   | 9,04        | 3,879                    | -0,002                   | 2,764                     | 168,0 | 3,745    | 1,860    | 43,5   | 4,871 | 0,181  | 0,032  | 0,034  |  |

Considerando os parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade em relação a amplitude do deslocamento e da frequência tem-se:

**Figura 71 – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de  $C_{n1}$  em frequência e amplitude de deslocamento; b) evolução de  $C_{n2}$  em frequência e deslocamento; c) evolução de  $n_{n1}$  em frequência e deslocamento; d) evolução de  $n_{n2}$  em frequência e deslocamento e e) evolução de  $ERRO_F$  em frequência e deslocamento.**



**Figura 71 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos. a) evolução de  $C_{n1}$  em frequência e amplitude de deslocamento; b) evolução de  $C_{n2}$  em frequência e deslocamento; c) evolução de  $n_{n1}$  em frequência e deslocamento; d) evolução de  $n_{n2}$  em frequência e deslocamento e e) evolução de  $ERRO_F$  em frequência e deslocamento.**



As curvas de nível que aparecem na **Figura 71** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de n-ésima potência da velocidade obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

Com base na análise da **Tabela 17** ou da **Figura 71** pode-se observar e concluir que:

- $C_{n1}$ : este cresce à medida que a corrente elétrica de excitação é aumentada e quando a amplitude do deslocamento e frequência são menores. Os extremos da **Figura 71a** permitem observar que em frequências maiores o parâmetro se mantém na faixa de magnitude de 1500 até uma corrente de 0,3A, apresentando posteriormente uma mudança para ordem de 2000 mas, nos menores valores da frequência e do deslocamento o parâmetro mantém-se na faixa de 1000 até uma corrente de 0,3A e aumenta significativamente até atingir seu máximo em 0,6A;
- $C_{n2}$ : análogo ao comportamento de  $C_{n1}$  sendo que o aumento do parâmetro agora torna-se mais substancial com um pouco mais de corrente: a partir de 0,4A. Os extremos da **Figura 71b** permitem tal observação, apresentando extremo de crescimento no canto inferior direito;
- $n_{n1}$ : apresentou crescimento disperso em algumas faixas de corrente, frequência e amplitude de deslocamento mas é bem definido em termos de crescimento ao longo da redução da amplitude do deslocamento e da frequência. O pico da **Figura 71c** ocorre também no canto inferior direito na corrente 0,4A para frequência e na faixa de 0,4A a 0,6A para o deslocamento. Quando a frequência de 1Hz foi aplicada não houve crescimento nem queda significativa deste parâmetro quando a corrente foi

aumentada de 0,5A para 0,6A, já para a amplitude de deslocamento de 2,5mm este parâmetro cresceu de 0,4A para 0,5A e depois sofreu queda em 0,6A;

- $n_{n2}$ : análogo ao comportamento de  $n_{n1}$  onde, de modo, apresentou crescimento à medida que a corrente foi aumentada em ensaios de baixa frequência e baixa amplitude de deslocamento;
- $ERRO_F$ : apresentou comportamento bem definido, com valor mínimo em corrente de excitação nula, na amplitude de deslocamento mínimo (2,5mm) e frequência de 1Hz. Conforme a **Figura 71e** os mínimos valores do parâmetro encontram-se no canto inferior esquerdo e os máximos localizam-se no canto superior esquerdo.

Em termos gerais, as curvas de tendência permitiram concluir um comportamento característico de crescimento dos parâmetros  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$  do modelo de n-ésima potência da velocidade à medida que a corrente de excitação foi aumentada, sendo que os máximos valores dos parâmetros se encontram na condição de baixa amplitude de deslocamento e baixa frequência, 2,5mm e 1Hz, respectivamente. Não é completamente seguro adotar este aspecto comportamental em termos de extrapolação para frequências não aplicadas experimentalmente, cabendo neste caso um conveniente e necessário procedimento experimental envolvendo frequências intermediárias de até 3Hz, bem como acima desta. Ensaios envolvendo maiores amplitudes de deslocamentos também seriam adequados para averiguação comportamental deste crescimento apenas salvo a observação da restrição física do amortecedor: sua abertura de curso máximo (condição de projeto do mesmo).

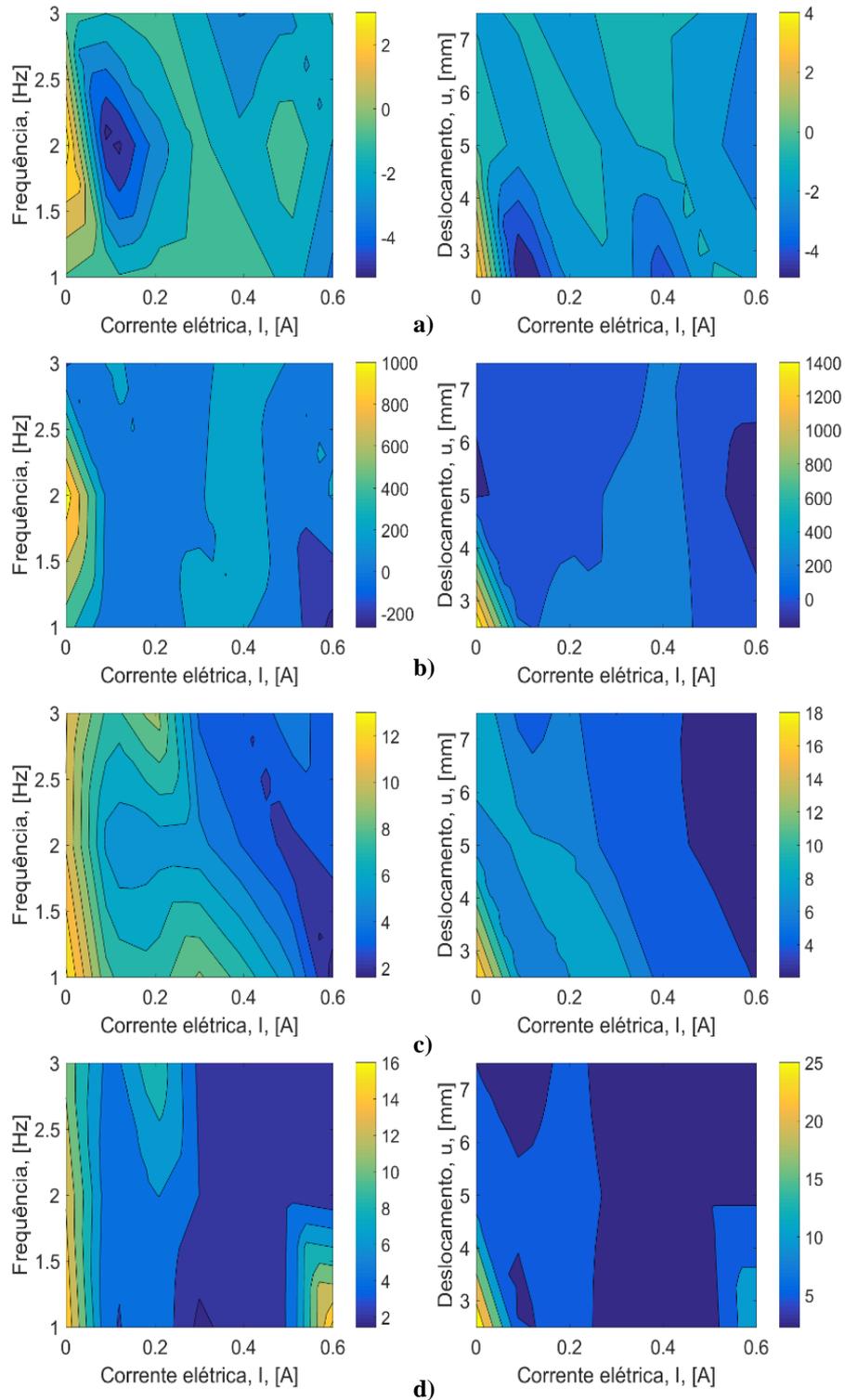
A função de erro permitiu observar que a identificação paramétrica do amortecedor MR pelo modelo de amortecimento de n-ésima potência da velocidade torna-se menos eficaz à medida que a corrente de excitação, frequência e deslocamento aumentam, portanto, este modelo mostrou-se recomendado apenas para representar o elemento físico em baixas faixas destes.

Os principais parâmetros do modelo de WANG et al. (2004) são:

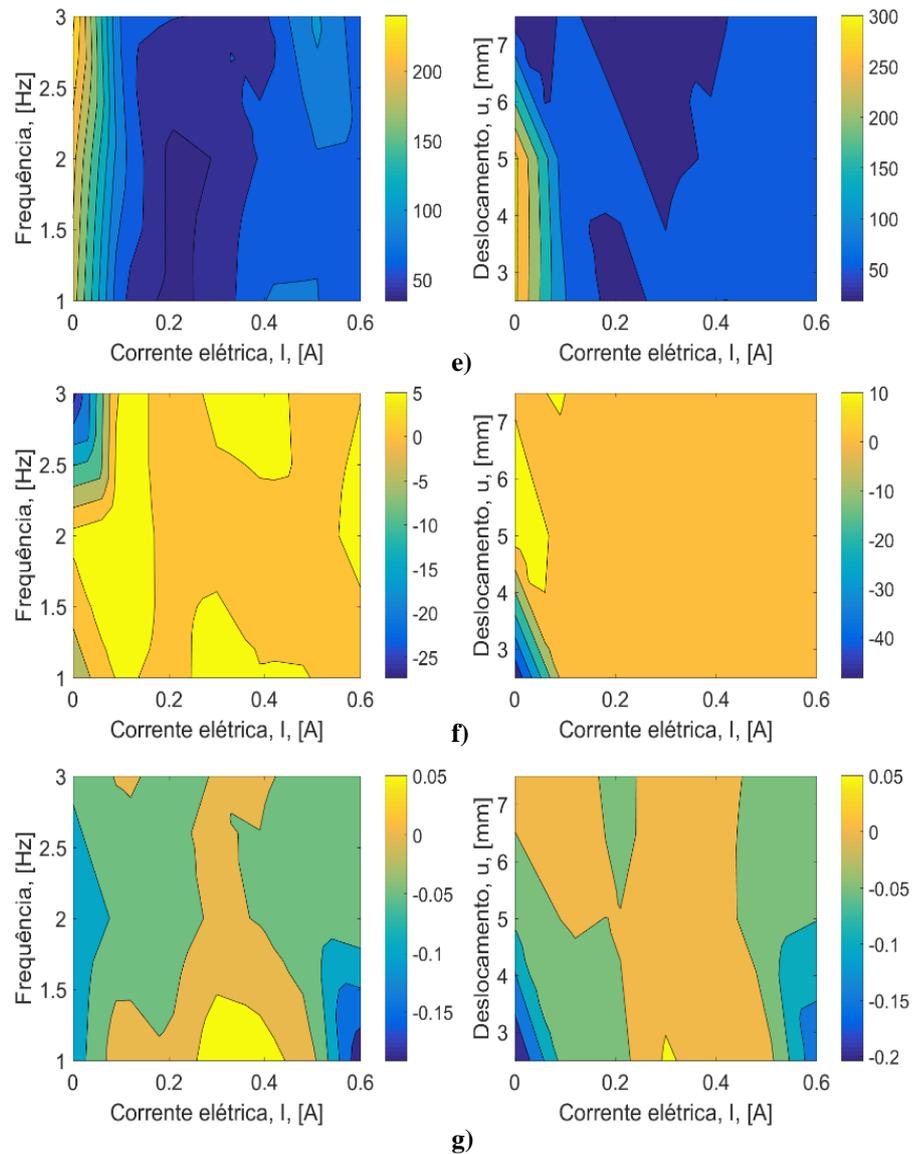
- $a_3$ : relaciona-se com a abertura da histerese;
- $k_0$ : relaciona-se com a inclinação de toda a curva;
- $k_{1c}$ : relaciona-se com a queda da extrema direita;
- $k_{1e}$ : relaciona-se com a queda da extrema esquerda;
- $k_2$ : relaciona-se com a amplitude;
- $k_3$ : relaciona-se também com a abertura (e fechamento) da histerese;
- $k_5$ : relaciona-se com a mudança vertical.

E em relação à amplitude de deslocamento e a frequência destes tem-se:

**Figura 72 – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: principais parâmetros do modelo de WANG et al. (2004) obtidos. a) evolução de  $a_3$  em frequência e deslocamento; b) evolução de  $k_0$  em frequência e deslocamento; c) evolução de  $k_{1c}$  em frequência e deslocamento; d) evolução de  $k_{1e}$  em frequência e deslocamento; e) evolução de  $k_2$  em frequência e deslocamento; f) evolução de  $k_3$  em frequência e deslocamento e g) evolução de  $k_5$  em frequência e deslocamento.**



**Figura 72 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: principais parâmetros do modelo de WANG et al. (2004) obtidos. a) evolução de  $a_3$  em frequência e deslocamento; b) evolução de  $k_0$  em frequência e deslocamento; c) evolução de  $k_{1c}$  em frequência e deslocamento; d) evolução de  $k_{1e}$  em frequência e deslocamento; e) evolução de  $k_2$  em frequência e deslocamento; f) evolução de  $k_3$  em frequência e deslocamento e g) evolução de  $k_5$  em frequência e deslocamento.**



As curvas de nível que aparecem na **Figura 72** apenas representam uma visão quantitativa (e não qualitativa) do comportamento geral de cada parâmetro do modelo de WANG et al. (2004) obtidos de modo a proporcionar uma ideia prévia de evolução ou regressão geral do parâmetro.

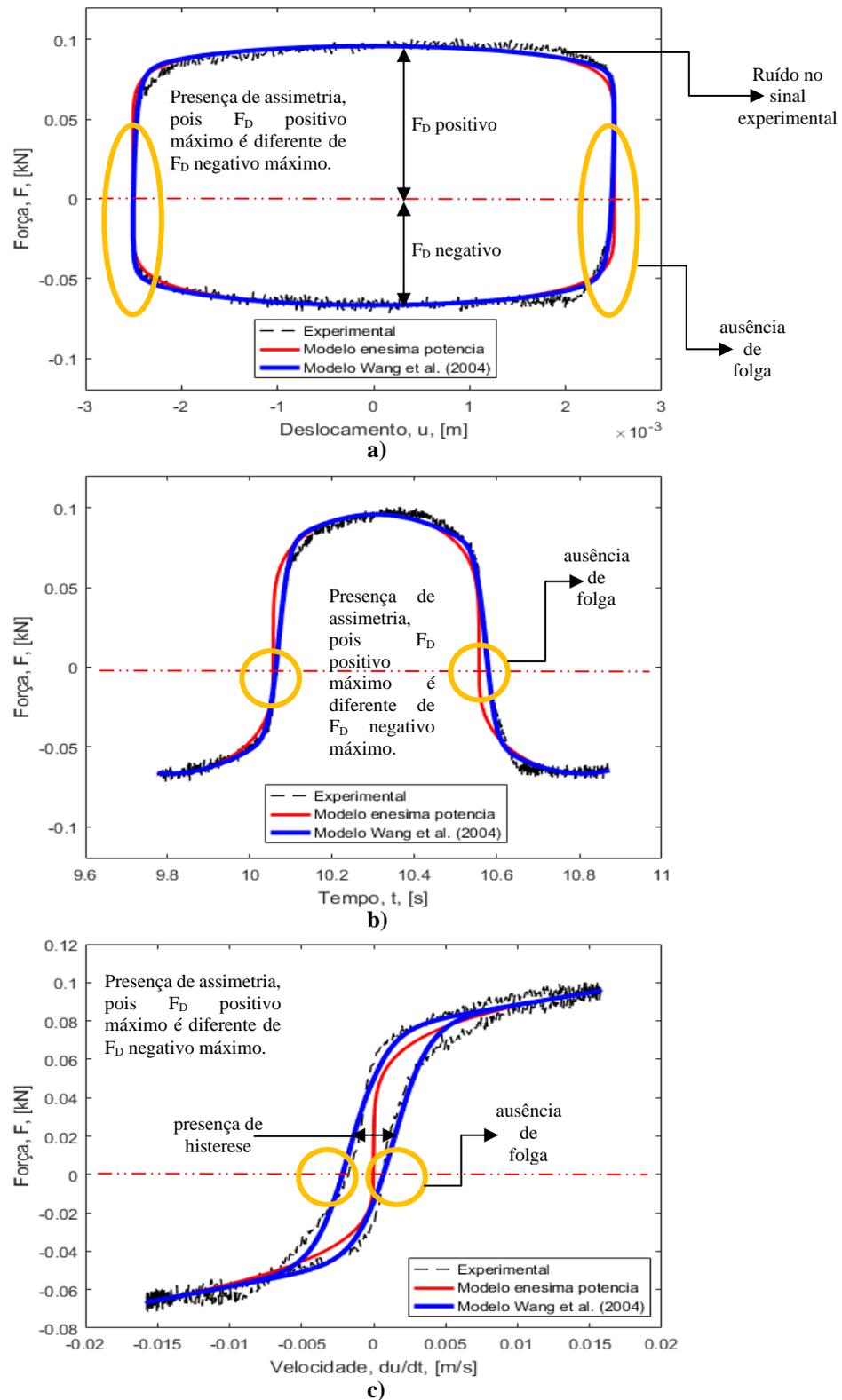
Com base na análise da **Tabela 18** ou da **Figura 72** pode-se observar e concluir que:

- $a_3$ : apresentou crescimento disperso em algumas faixas de corrente, frequência e amplitude de deslocamento mas é bem definido em termos de crescimento ao longo da redução da corrente elétrica e da amplitude do deslocamento. O pico da **Figura 72a** ocorre no lado esquerdo na corrente 0A para frequência 2Hz e em 2,5mm;
- $k_0$  : análogo ao comportamento de  $a_3$ ;
- $k_{1c}$ : também análogo aos comportamentos de  $a_3$  e  $k_0$  sendo o pico definido em corrente 0A e amplitude de deslocamento e frequência mínimos. A **Figura 72** permite tal observação, apresentando extremo de crescimento no canto inferior direito;
- $k_{1e}$ : análogo ao comportamento de  $k_{1c}$ ;
- $k_2$ : apresentou comportamento disperso em algumas faixas de corrente, frequência e amplitude de deslocamento mas é bem definido em termos de decaimento ao longo da redução da amplitude e aumento da frequência na ausência de corrente elétrica;
- $k_3$ : Os picos da **Figura 72f** ocorrem nos cantos inferior esquerdo e direito e uma particularidade apresentada nesta figura é que, em relação à amplitude de deslocamento, este influi no parâmetro apenas numa faixa de excitação de 0A a 0,1A e acima deste valor o parâmetro estabiliza e não sofre alteração, tornando-se função apenas da frequência aplicada;
- $k_5$ : apresentou um comportamento particular de pico numa faixa de corrente intermediária, de 0,3A a 0,4A. Seu crescimento conforme mostra a **Figura 72g** é relacionado à redução da frequência e da amplitude do deslocamento aplicados. O valor de pico encontra-se em 0,3A, 1Hz e 2,5mm.

Em termos gerais, as curvas de tendência permitiram concluir um comportamento característico de queda dos parâmetros em relação ao aumento da corrente elétrica, exceto para o parâmetro  $k_3$  cujo comportamento mostrou-se o oposto. Em termos de aumento de amplitude de deslocamento, este promove uma redução genérica dos parâmetros, exceto para o parâmetro  $k_3$  e em termos de aumento de frequência idem.

A **Figura 73** apresenta o primeiro resultado, como exemplo explicativo, para o amortecedor MR na condição de ausência de folga, amplitude de deslocamento 2,5mm e frequência 1Hz, demonstrando claramente a representação do fenômeno de histerese.

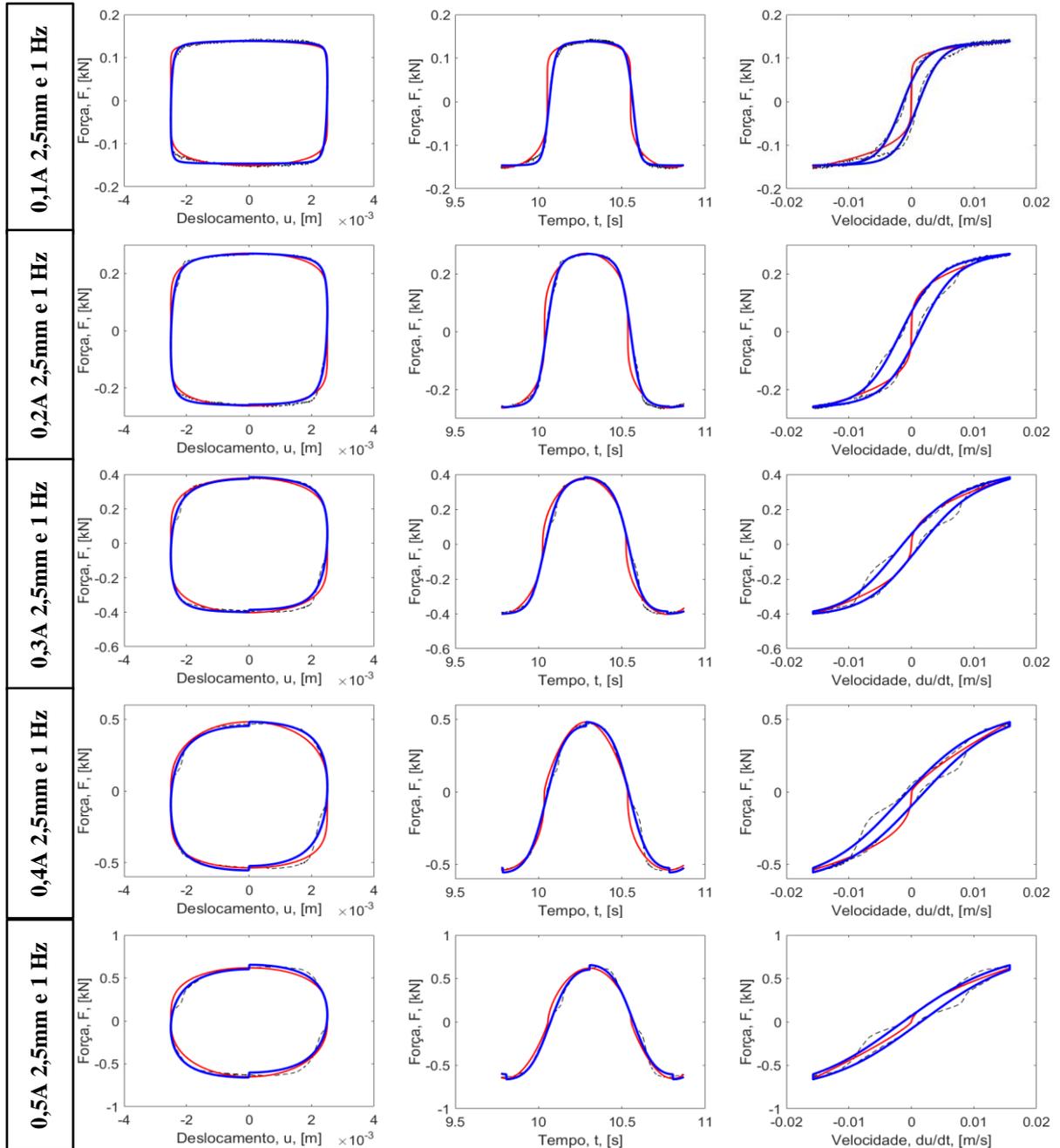
**Figura 73 – Primeiro resultado (exemplo) para o amortecedor MR sem folga de fixação: amplitude de deslocamento de  $\pm 2,5\text{mm}$  e frequência 1Hz.**



A **Figura 74** apresenta os demais resultados obtidos para o amortecedor MR sem folga de fixação, em termos de curvas de força por deslocamento, força por tempo e força por

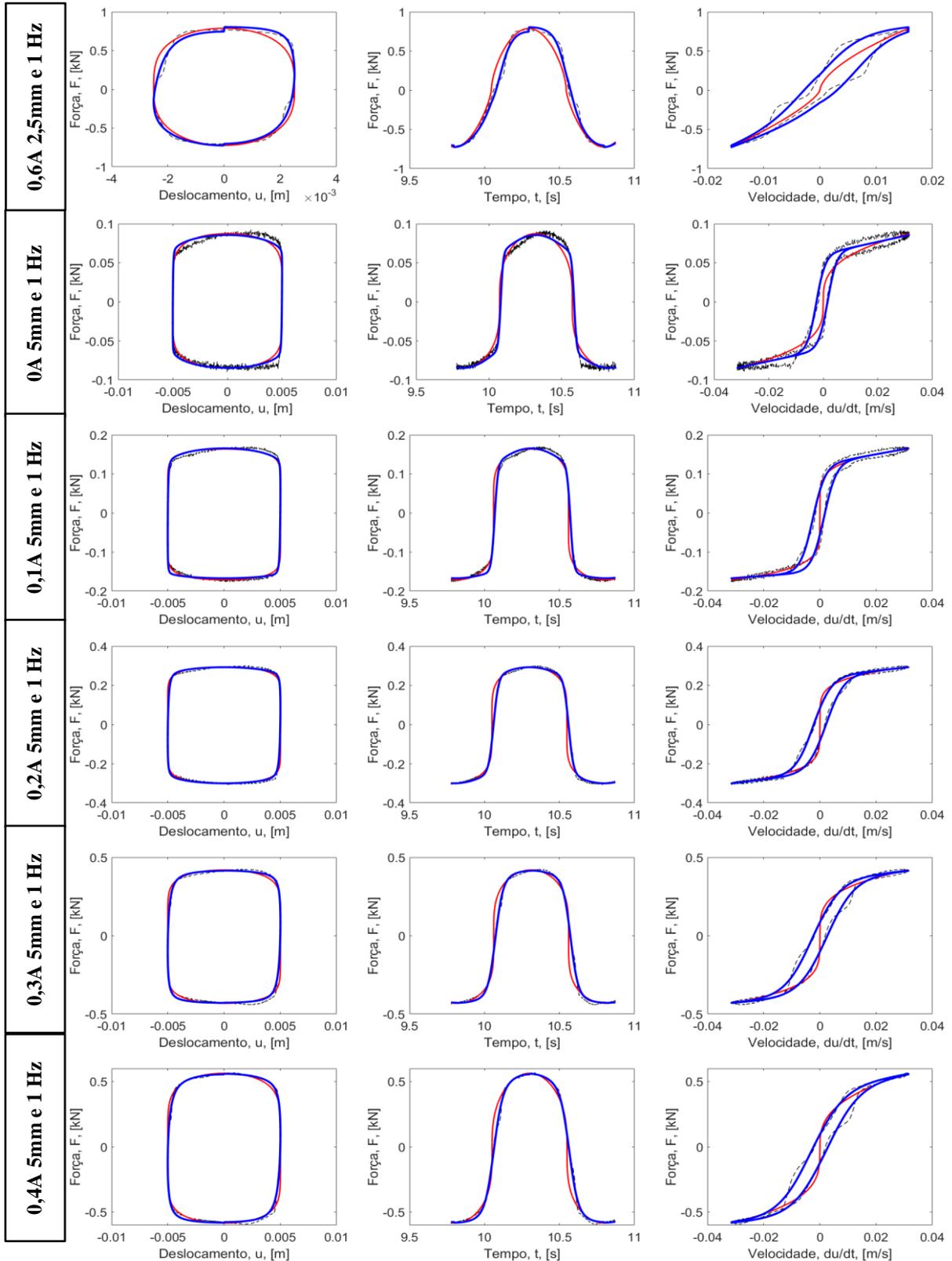
velocidade para todas as condições propostas de variação dos parâmetros de corrente de excitação, amplitude de deslocamentos e frequências.

**Figura 74 – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



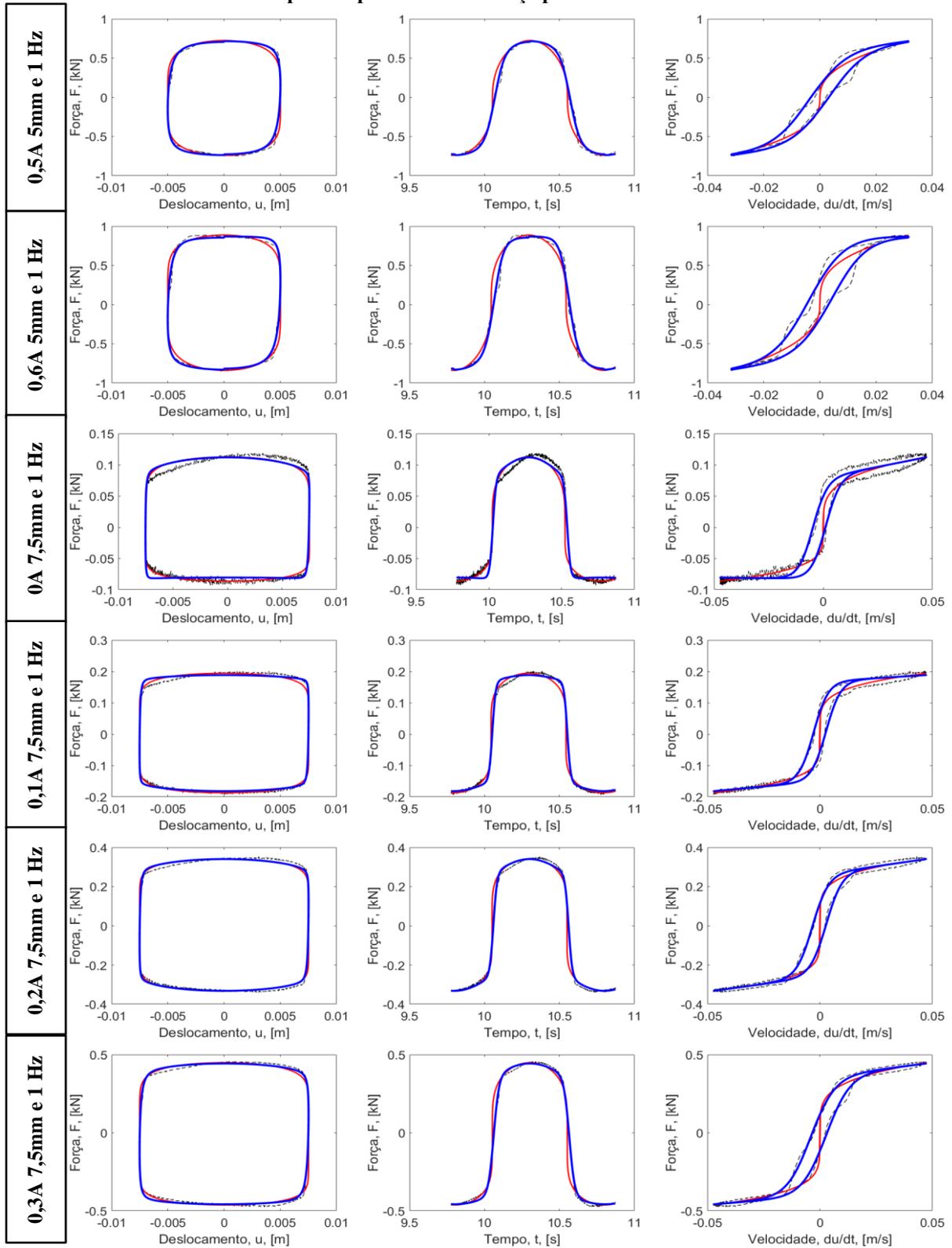
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



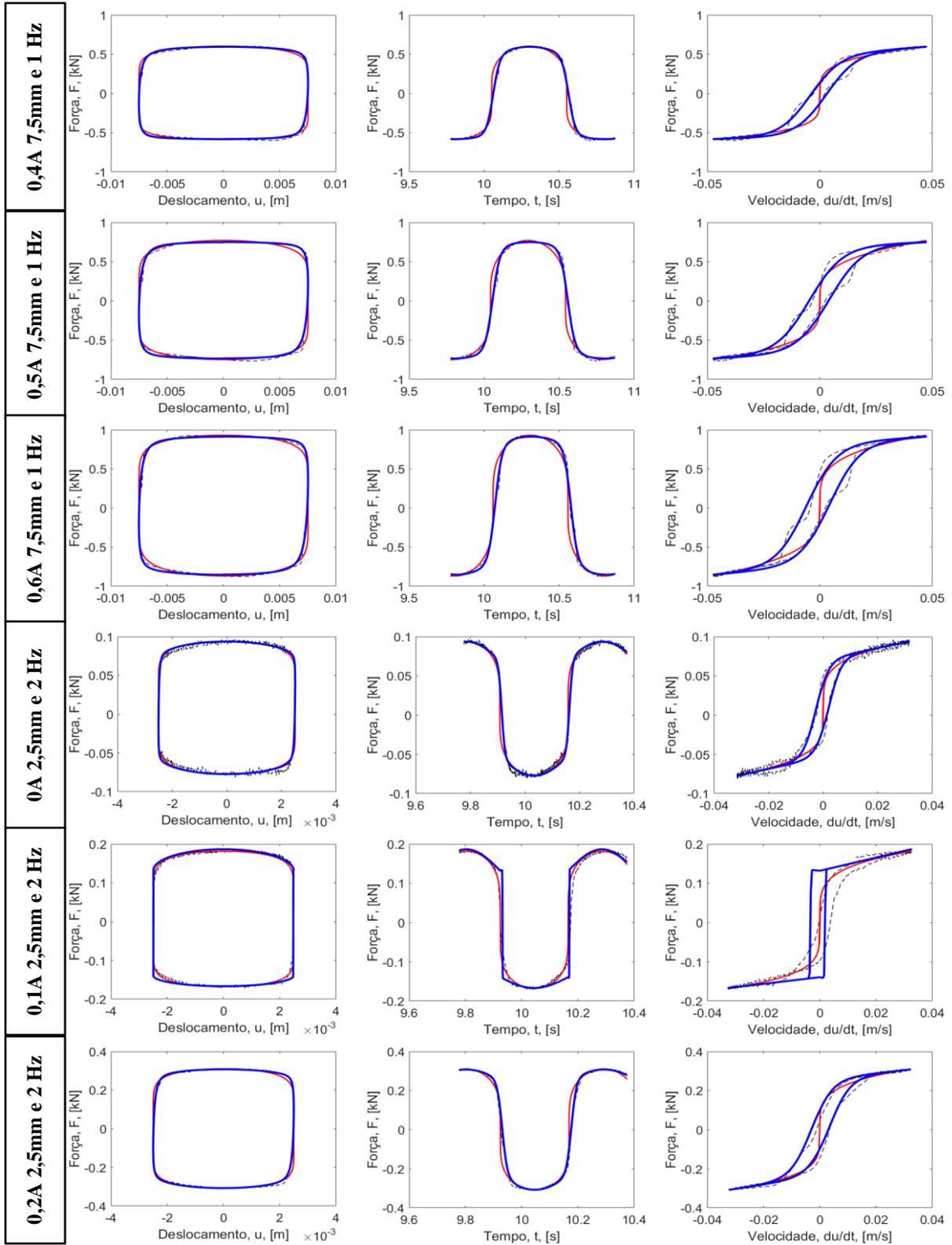
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
 linha vermelha cheia fina representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
 linha azul cheia grossa representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



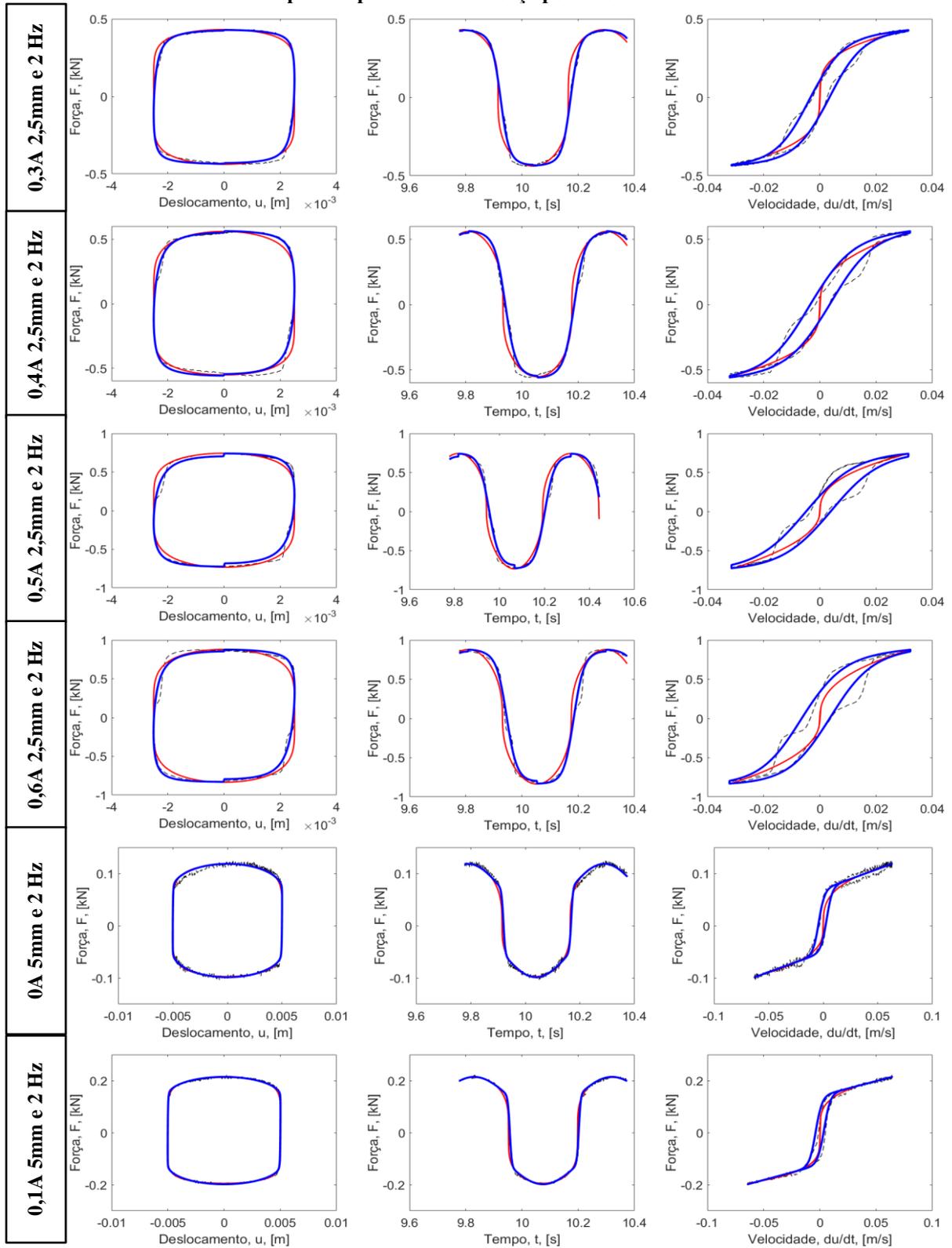
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



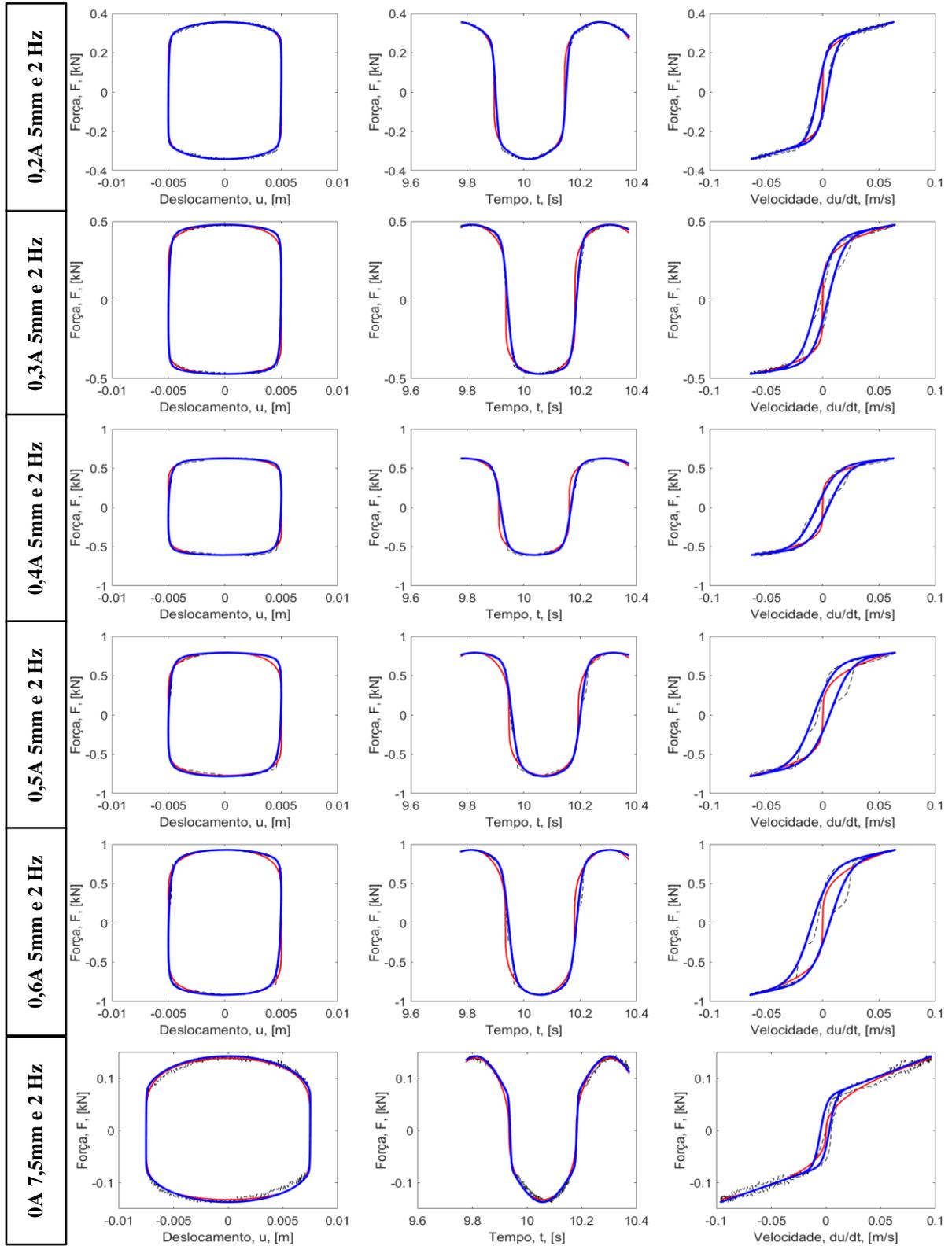
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais, linha vermelha cheia fina representa modelo de n-ésima potência da velocidade e linha azul cheia grossa representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



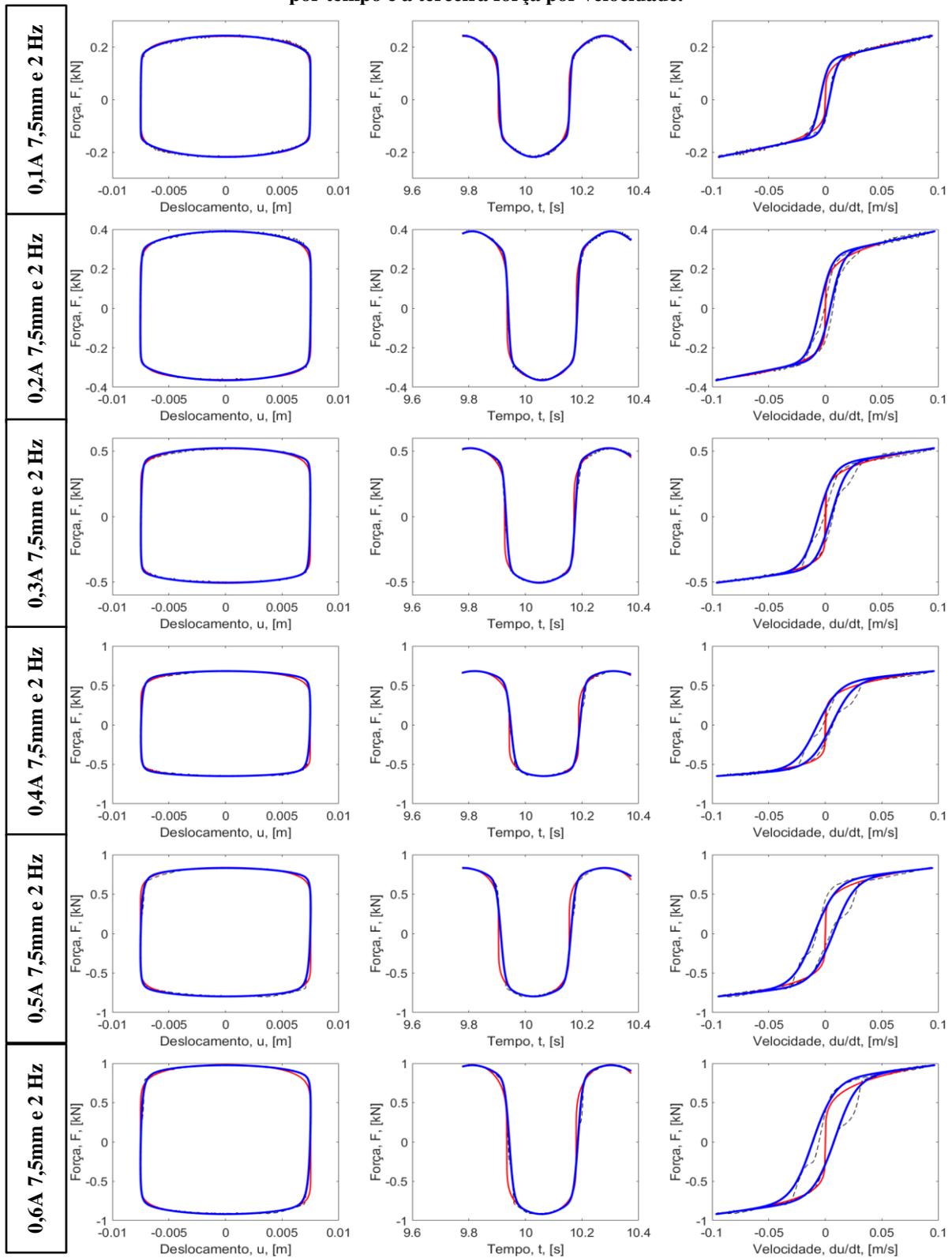
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



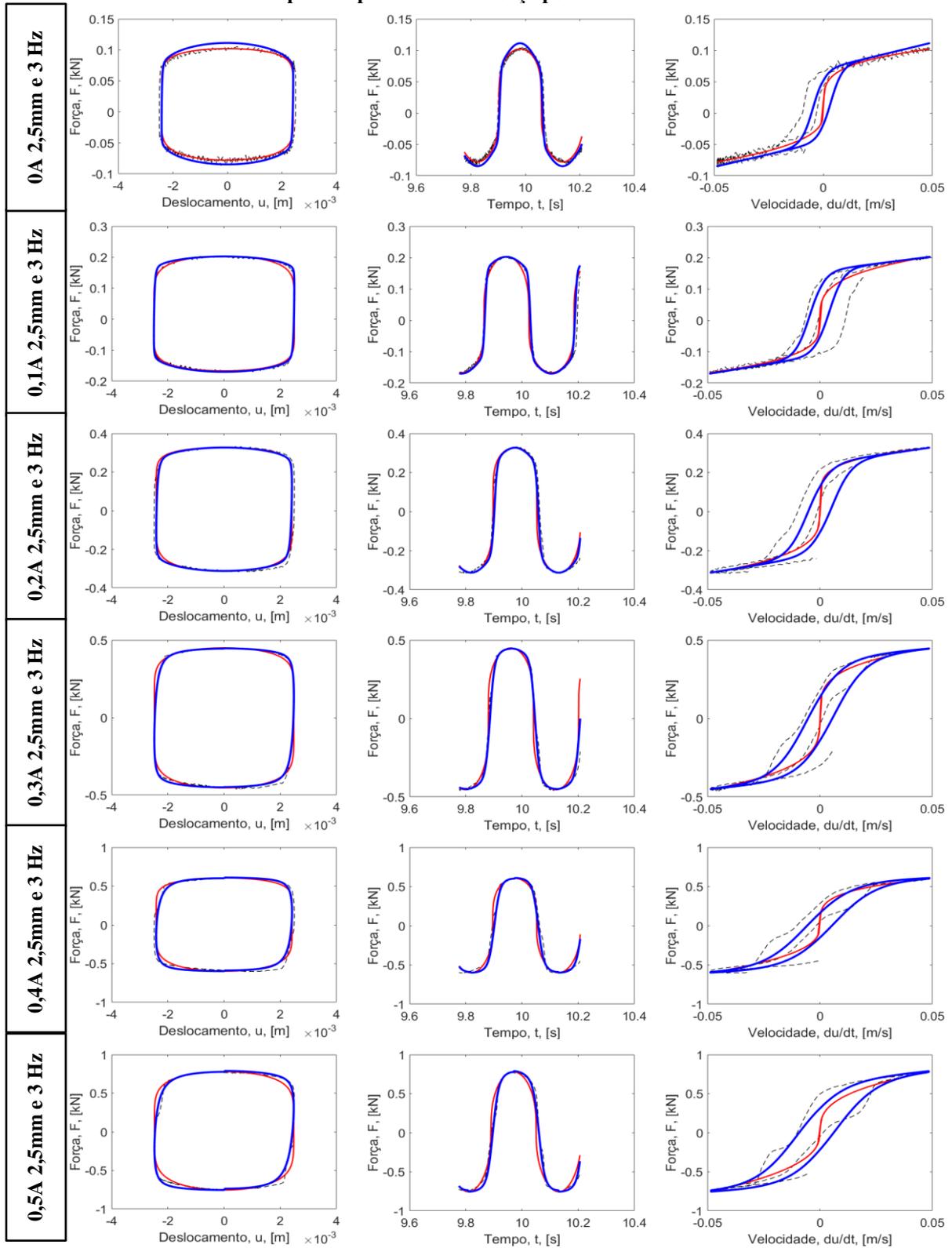
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



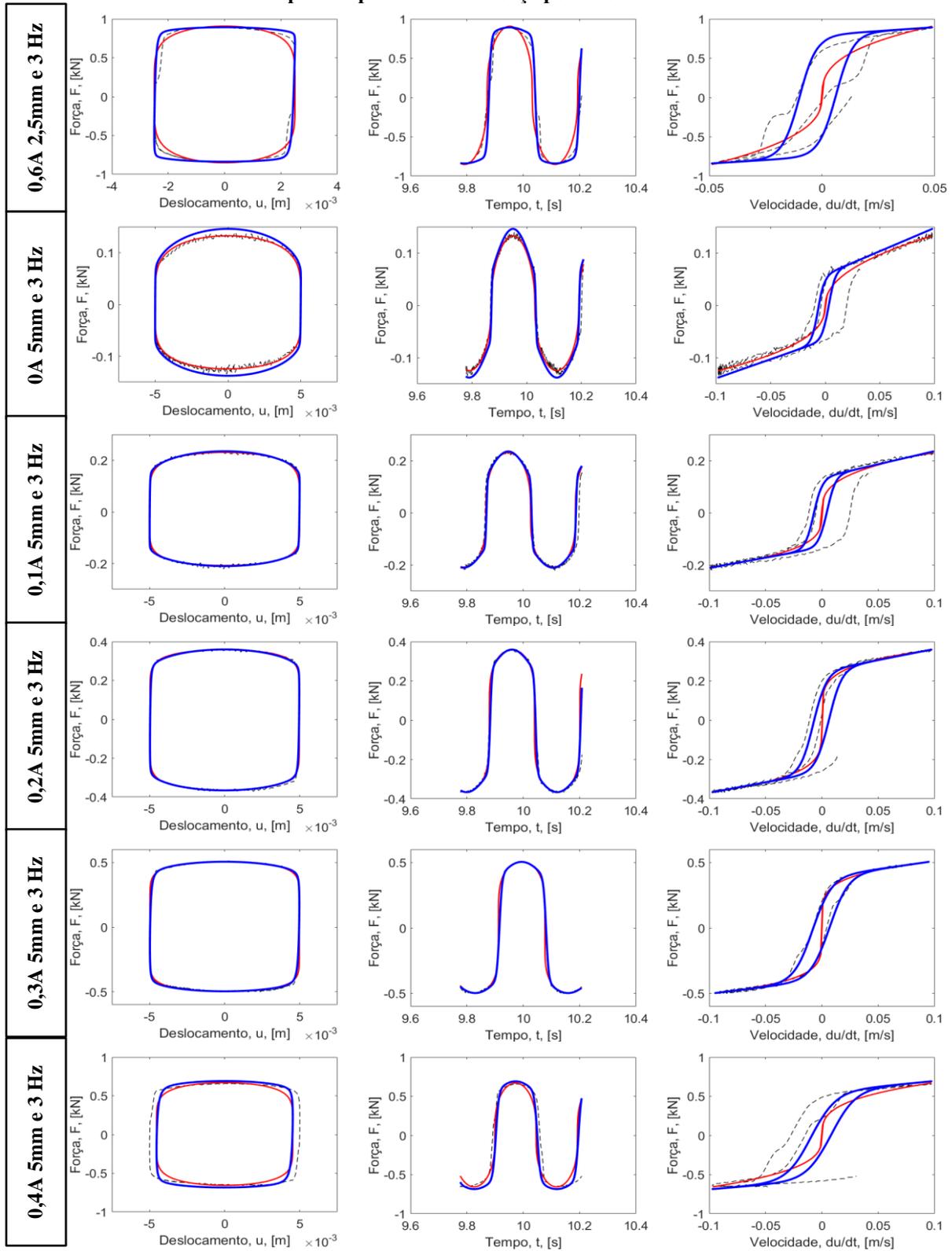
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
 linha vermelha cheia fina representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
 linha azul cheia grossa representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



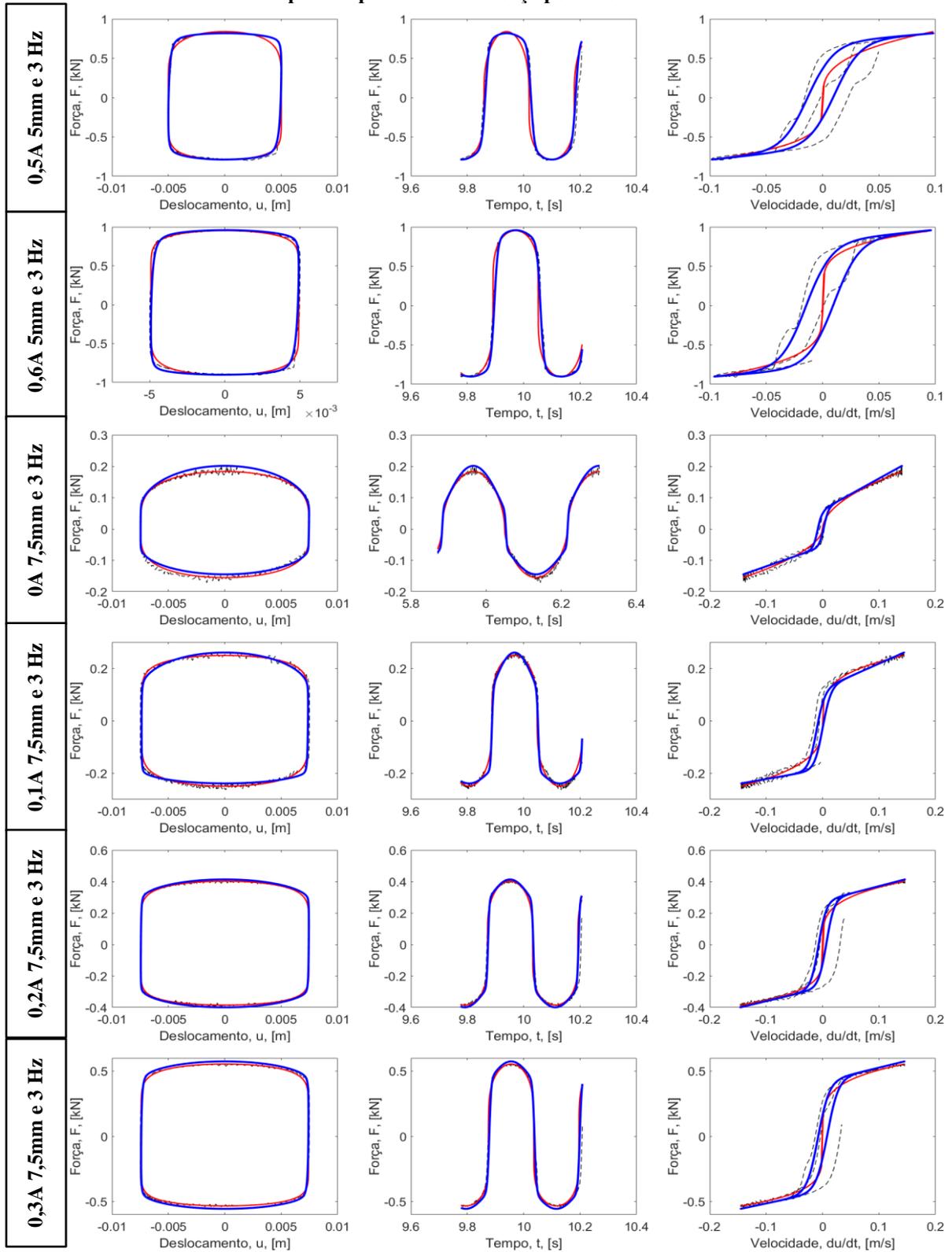
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



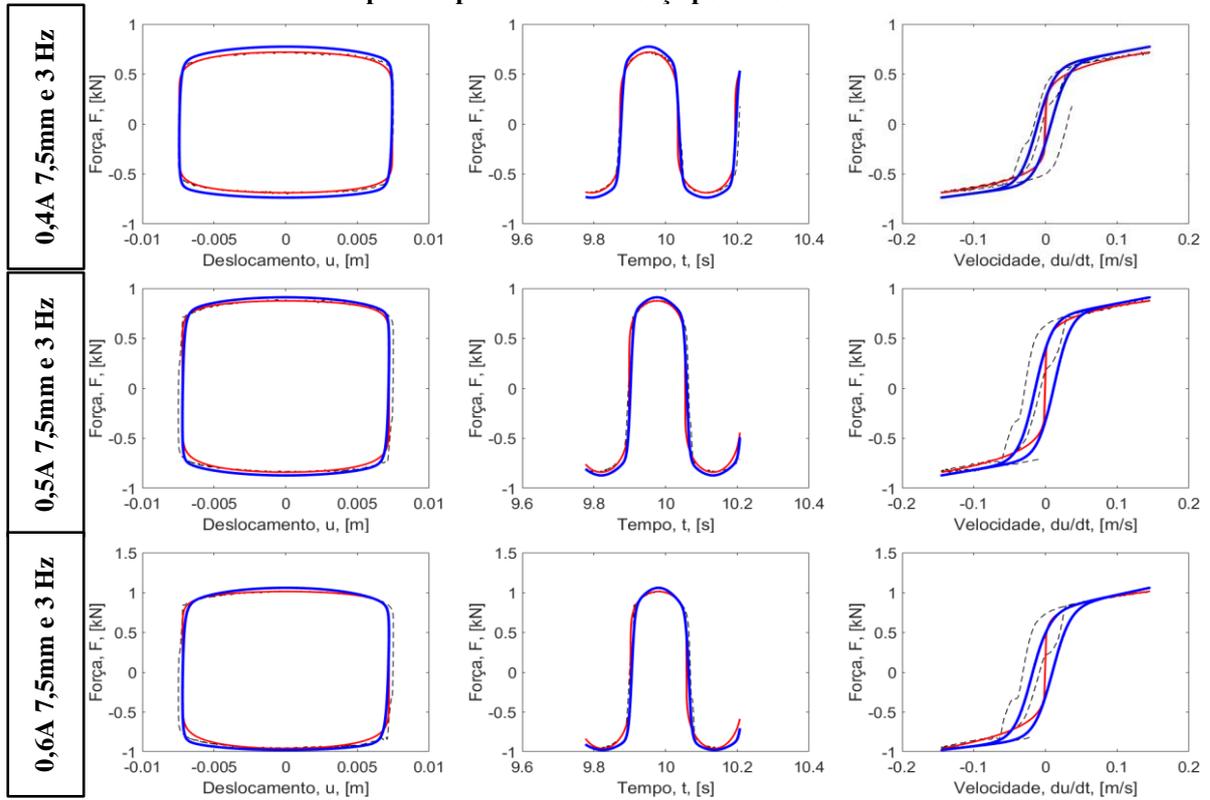
**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de n-ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

**Figura 74 (continuação) – Resultados para o amortecedor MR sem folga de fixação: primeira coluna representa força por deslocamento, a segunda força por tempo e a terceira força por velocidade.**



**Legenda:** linha preta tracejada representa dados experimentais,  
**linha vermelha cheia fina** representa modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade e  
**linha azul cheia grossa** representa modelo Wang et al. (2004).

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerados os objetivos da tese foi possível desenvolver e aplicar a metodologia proposta para identificação paramétrica dos três amortecedores com não linearidades baseado em dois modelos paramétricos já existentes, modelo da n-ésima potência da velocidade e modelo de WANG et al. (2004), e em um novo modelo simplificado. Houve a proposição, desenvolvimento e implementação de um novo modelo paramétrico simplificado capaz de representar as não linearidades de folga e assimetria de amortecedores AP e AH, com fator limitante de não possuir capacidade para detecção de histerese.

Com base nestes, foi possível descrever o comportamento dinâmico dos amortecedores estudados contemplando seus comportamentos característicos não lineares:

- Amortecedor seco AP em condição de assimetria, com e sem folga na fixação e com efeito de temperatura externa do corpo;
- Amortecedor viscoso AH em condições similares em não linearidade aos do AP;
- Amortecedor magnetoreológico MR em condições de assimetria e histerese.

As condições propostas de ensaios dos amortecedores adotados (frequências da ordem de até 5Hz, corrente elétrica de excitação da ordem de até 0,6A e amplitude de deslocamento da ordem de até  $\pm 7,5$ mm) representam uma faixa diversificada em termos de aplicabilidade industrial, principalmente em equipamentos envolvendo torques substanciais em rotações baixas, cicladoras mecânicas, bombas de óleo de sistemas eletromecânicos de lubrificação, geradores de funções médico-hospitalares, equipamentos de laboratório (máquinas de teste de fadiga em compressão e tração e fadiga dinâmica multiaxial) e outros. Outra peculiaridade em termos das frequências ensaiadas é a questão das características oscilatórias do corpo humano: estudos ergonômicos relacionam as frequências da ordem de até 5Hz a problemas em vértebras cervicais, estômago, mãos, coração e cintura escapular, portanto, o estudo de elementos mecânicos de sistemas que possuirão interação com o usuário e suas respostas dinâmicas torna-se importante.

Em termos de efeito de temperatura externa do corpo dos amortecedores, esta permitiu mensurar e quantificar a sua correlação com a força de amortecimento decorrente das condições dinâmicas experimentais nos amortecedores seco e viscoso, AP e AH, respectivamente, tanto em variações de frequência de excitação e quanto nas de amplitude de deslocamento.

Esta tese apresenta como contribuição principal a proposição do modelo paramétrico simplificado de folga e a discretização do efeito da temperatura externa do corpo de amortecedores em relação à força de amortecimento atuante em elementos amortecedores de grande empregabilidade no setor industrial em geral. Uma contribuição secundária a citar é a revisão propriamente dita da literatura em termos dos diversos modelos de amortecimento, permitindo a observação das particularidades de cada.

O modelo simplificado de folga apresenta aplicabilidade na engenharia mecânica em termos, por exemplo, de manutenção preditiva de sistemas dinâmicos que possuam o elemento amortecedor. Uma vez obtida a curva experimental de força e deslocamento, através de uma detecção computacional, é possível quantizar o valor da folga nos pontos característicos de sua ocorrência. A detecção e monitoramento da folga pode significar substancial economia de recursos de manutenção, aumento da vida útil do elemento/sistema, bem como benefícios no quesito segurança de operação.

### **7.1. Amortecedor AP e sua Modelagem**

Para este amortecedor seco de construção monotubo (fluido de trabalho suposto como sendo ar) foi possível identificar, como a pouco mencionado, suas características físicas de não linearidades de assimetria, presença de folga e histerese, pela plotagem e observação inicial dos dados experimentais. Este procedimento inicial foi de suma importância para identificação preliminar para tomada de decisão sobre qual modelo adotar para representar adequadamente o comportamento do amortecedor. Uma vez selecionados os modelos, o passo seguinte foi realizar uma identificação paramétrica adequada e eficiente e para isso um controle de erro obrigatoriamente teve que ser empregado.

O modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência de velocidade apresentou-se como opção para representar o amortecedor AP na condição sem folga e sua modelagem mais próxima dos dados experimentais quanto mais baixas as frequências de excitação. Como conclusão a este assume-se dizer que este modelo não é recomendável para representar frequências médias e altas, sendo mais adequado para representar modelos de frequência, principalmente da ordem de 1Hz. Em termos paramétricos, os parâmetros envolvidos neste modelo ( $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$ ) apresentam comportamento característico de crescimento ou decaimento em algumas combinações de deslocamento e frequência, mas já em outras nem tanto. De forma geral um ajuste linear primário permite observar que o comportamento de decaimento paramétrico é dominante ao longo do aumento do deslocamento. Para uma

conclusão mais segura sob este aspecto torna-se conveniente e necessário um procedimento experimental envolvendo frequências intermediárias de até 5Hz, bem como acima desta e ensaios envolvendo maiores deslocamentos também seriam adequados para averiguação comportamental, apenas salvo a observação da restrição física do amortecedor: abertura de curso máximo do amortecedor (condição de projeto do mesmo).

O novo modelo simplificado de amortecimento proposto nesta tese permitiu a identificação dos seis parâmetros necessários para descrever o comportamento deste amortecedor na condição de assimetria e folga de fixação, apresentando energias (trabalho) da ordem de 1,2% tanto para folga de 0,35mm quanto para a de 1,35mm. De modo geral os parâmetros apresentaram comportamento inversamente proporcional (queda) com a amplitude do deslocamento, em todas as três frequências de trabalho (1Hz, 3Hz e 5Hz) mas a observação feita a pouco também deve ser considerada como válida: deve-se adotar cautela em assumir que frequências intermediárias às ensaiadas apresentarão supostamente o mesmo comportamento daquelas verificadas experimentalmente, pois estão envolvidas não linearidades e estas podem modificar substancialmente a resposta do sistema.

Pela análise do ensaio de longa duração sem folga (600 segundos, o equivalente a 1800 ciclos de trabalho), a adoção de ciclos intermediários permitiu uma análise mais detalhada dos parâmetros do modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade incluindo em termos da variável temperatura externa do corpo do atuador. Em geral ocorreu um aumento dos parâmetros do modelo ao longo da evolução dos ciclos de trabalho, possibilitando verificar de forma nítida a característica deste amortecedor: aumento da temperatura externa do corpo relaciona-se com o aumento da força de amortecimento, o que reitera o seu aspecto construtivo de atrito seco predominante.

## **7.2. Amortecedor AH e sua Modelagem**

Para este amortecedor viscoso de construção bitubo (fluido de trabalho suposto como óleo ISO VG 15) foi também possível identificar sua assimetria (bem mais característica do que no amortecedor AP), histerese, ausência e presença de folga apenas pela plotagem e observação inicial dos dados experimentais. Como já mencionado este procedimento inicial é de suma importância.

O procedimento de identificação foi análogo ao realizado em AP, sendo que o modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência de velocidade apresentou-se como opção para representar também este amortecedor na condição sem folga e sua modelagem mais próxima

dos dados experimentais quão mais baixas as frequências de excitação e amplitude dos deslocamentos. Como conclusão a este assume-se dizer que este modelo também não é recomendável para representar frequências médias e altas, sendo mais adequado para representar modelos de frequência, principalmente da ordem de 1Hz. Em termos paramétricos, os parâmetros envolvidos neste modelo ( $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$ ) apresentaram comportamento característico mais nítido de queda nas combinações de deslocamento e frequência. Para uma conclusão mais segura sob este aspecto torna-se conveniente e necessário um procedimento experimental envolvendo frequências intermediárias de até 5Hz, bem como acima desta e ensaios envolvendo maiores deslocamentos também seriam adequados para averiguação comportamental, apenas salvo a observação da restrição física do amortecedor: abertura de curso máximo do amortecedor (condição de projeto do mesmo).

O novo modelo simplificado de amortecimento proposto nesta tese permitiu a identificação dos seis parâmetros necessários para descrever o comportamento deste amortecedor na condição de assimetria e folga de fixação, apresentando energias (trabalho) da ordem de 1% tanto para folga de 1,1mm e de 3% para folga de 2,4mm (isso desprezando-se dois dos ensaios realizados: deslocamento 2,5mm e frequência 5Hz e deslocamento 7,5mm e frequência também 5Hz, que possivelmente apresentaram condições adversas em sua execução). O comportamento característico dos parâmetros do modelo foi crescimento ao longo aumento do deslocamento, em todas as três frequências de trabalho (1Hz, 3Hz e 5Hz) mas a observação feita a pouco também deve ser considerada como válida: deve-se adotar cautela em assumir que frequências intermediárias às ensaiadas apresentarão supostamente o mesmo comportamento daquelas verificadas experimentalmente, pois estão envolvidas não linearidades e estas podem modificar substancialmente a resposta do sistema.

Pela análise do ensaio de longa duração sem folga (580 segundos, o equivalente a 1740 ciclos de trabalho), a adoção de ciclos intermediários permitiu uma análise mais detalhada dos parâmetros do modelo de n-ésima potência da velocidade incluindo em termos da variável temperatura externa do corpo do atuador. Houve um decaimento dos parâmetros do modelo ao longo da evolução dos ciclos de trabalho, possibilitando verificar de forma nítida a característica deste amortecedor: aumento da temperatura externa do corpo relaciona-se com a redução da força de amortecimento, o que reitera o seu aspecto construtivo de atrito viscoso predominante.

### 7.3. Amortecedor MR e sua Modelagem

Para este amortecedor de construção pressuposta como monotubo (fluido de trabalho suposto como óleo ISO VG 40) foi também possível identificar sua assimetria (bem mais característica do que no amortecedor AP), histerese e ausência de folga apenas pela plotagem e observação inicial dos dados experimentais. Como já mencionado este procedimento inicial é de suma importância.

O procedimento de identificação foi análogo aos realizados em AP e AH, sendo que o modelo de amortecimento de  $n$ -ésima potência de velocidade apresentou-se como opção para representar também este amortecedor na condição sem folga e também sua modelagem mais próxima dos dados experimentais quanto mais baixas as frequências de excitação e amplitudes de deslocamentos. Como conclusão a este assume-se dizer que este modelo também não é recomendável para representar frequências médias e altas, sendo mais adequado para representar modelos de frequência, principalmente da ordem de 1Hz. Em termos paramétricos, os parâmetros envolvidos neste modelo ( $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $n_{n1}$  e  $n_{n2}$ ) apresentaram comportamento característico queda nas combinações de deslocamento e frequência crescentes. A função  $ERRO_F$  mostrou um comportamento diretamente proporcional ao crescimento da frequência e da amplitude de deslocamento: maiores frequências resultam em maiores valores de erro e maiores amplitudes de deslocamento também aumentam o erro. A observação feita aos dois outros amortecedores também é válida para este: deve-se proceder com relativo cuidado ao adotar o modelo de  $n$ -ésima potência da velocidade em condições dinâmicas envolvendo frequências acima da ordem de 1Hz e amplitudes de deslocamento acima de 2,5mm.

O modelo de amortecimento de WANG et al. (2004) permitiu a identificação dos dezesseis parâmetros necessários para descrever o comportamento deste amortecedor nas condições de assimetria histerese propostas, apresentando comportamentos bem próximos aos ensaiados. O comportamento característico dos sete principais parâmetros do modelo foi inversamente proporcional à corrente de excitação: à medida que a corrente aumentou os parâmetros reduziram-se, em todas as três frequências de trabalho (1Hz, 2Hz e 3Hz), exceto para o parâmetro  $k_5$  que se apresentou de modo oposto. O modelo mostrou-se válido para representar o comportamento histerético e assimétrico do amortecedor em uma faixa bem razoável de variações da corrente elétrica e da amplitude de deslocamentos.

#### 7.4. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos a desenvolver seguindo a presente linha de pesquisa desta tese, sugere-se que as condições de ensaio poderiam ser eventualmente modificadas em trabalhos futuros, maior compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, através da variação de parâmetros tais como:

- Incremento do efeito de histerese ao modelo proposto nesta tese;
- Variação dos fluidos utilizados nos amortecedores e extrapolação para maior gama de substâncias (óleos industriais, fluidos diversos e misturas de), incluindo variação do MRF para os dois outros tipos disponíveis industrialmente do fabricante ©LORD ou outro fabricante;
- Realização de ensaios laboratoriais para levantamento das curvas experimentais do comportamento dos MRF em termos de viscosidade cinemática por temperatura e/ou viscosidade dinâmica por temperatura para maiores esclarecimentos sobre este;
- Inclusão do efeito de folga no suporte inferior e verificar as condições de folga isoladamente e posteriormente juntas;
- Idealização e execução de sistemas compostos de mais de um amortecedor e submetê-los à condição dinâmica com e sem incidência de folga;
- Idealização e execução de sistemas compostos: amortecedor e outros elementos adversos, tais como elemento mola e/ou inerter;
- Idealização e execução da condição dinâmica de cada amortecedor para verificação e quantificação da condição de não linearidade em situação induzida de vazamento do fluido do amortecedor ao longo da ciclagem, incluindo verificação do ganho de parâmetro temperatura ao longo do processo;
- Idealização e execução da condição dinâmica de cada amortecedor adicionando fator de assimetria geométrica na fixação;
- Medição da temperatura interna do fluido no amortecedor para quantizar o comportamento do fluido em relação ao comportamento da temperatura externa do corpo do atuador
- Combinação das variações acima enumeradas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luiz Antônio. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas à Sistemas Reais**. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Departamento de Engenharia Eletrônica, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2004.

ALMEIDA, M. P. de; COSTA, U. M. S. Exemplo de Histerese com um Sistema de Massa-Mola. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, nº 1, p. 49-53, 2000.

ANDERSON, D. A., TANNEHILL, J. C., PLETCHER, R. H., **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências - Elaboração, Rio de Janeiro, 2002, 24 p.

\_\_\_\_\_, **NBR 6024**: Informação e documentação – Numeração progressiva das seções de um documento - Apresentação, Rio de Janeiro, 2012, 8 p.

\_\_\_\_\_, **NBR 6027**: Informação e documentação – Sumário - Apresentação, Rio de Janeiro, 2012, 7 p.

\_\_\_\_\_, **NBR 6158**: Sistema de tolerâncias e ajustes, Rio de Janeiro, 1995, 79 p.

\_\_\_\_\_, **NBR 10520**: Informação e documentação – Citações em documentos - Apresentação, Rio de Janeiro, 2002, 7 p.

\_\_\_\_\_, **NBR 14724**: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos - Apresentação, Rio de Janeiro, 2011, 11 p.

ASTROM, Karl Johan; WIT, Carlos Canuda de. Revisiting the LuGre friction model. **IEEE Control Systems Magazine**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 28(6), p. 101-114, 2008.

AVRAAM, More Thomas. **MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device**. Thesis (Doctorate's) – Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, 2009.

BELZA, T. et al. Electrorheological and Dielectric Properties of Urea/SiO<sub>2</sub> Nanocomposite Suspensions Modified by N, N-Dimethylformamide. **Proceedings of the 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.

BOADA, M. J. L.; CALVO, J. A.; DÍAZ, V. Modeling of a magnetorheological damper by recursive lazy learning. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, vol. 46, p. 479-485, 2011.

BONSOR, Kevin. O que é o fluido MR. **howstuffworks – comotudofunciona**. [2014?]. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/estruturas-inteligentes1.htm>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. Editora Prentice Hall, 2ª ed., 2008, 431 p.

BUTZ, Torsten; VON STRYK, Oscar. Modelling and Simulation of Rheological Fluid Devices. **Sonderforschungsbereich 438: Mathematische Modellierung, Simulation und Verifikation in Materialorientierten Prozessen und Intelligenten Systemen**. Technische Universität München, Universität Augsburg. Preprint SFB-438-9911, 1999.

CAO, L. et al. Variable friction device for structural control based on duo-servo vehicle brake: Modeling and experimental validation. **Journal of Sound and Vibration**, Gothenburg, vol. 348, p. 41-56, 2015.

CASALOTTI, Arnaldo; LACARBONARA, Walter. Nonlinear Vibration Absorber Optimal Design via Asymptotic Approach. **Procedia IUTAM 19: Symposium Analytical Methods in Nonlinear Dynamics**. ELSEVIER, p. 65-74, 2016.

CASTRO, B. M.; BUENO, D. D.; JUNIOR, W. L. P.; **Estudo de Modelamento de Amortecedores com Folga em sua Conexão**. Relatório Interno EMBRAER: Área Temática Aeronáutica, 2016.

CHOI, Seung-Bok; HAN, Young-Min. **Magnetorheological Fluid Technology: Applications in Vehicles Systems**. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2012.

CHOPRA, Anil K. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. Prentice Hall, 4<sup>th</sup> Edition, 2012, 980 p.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; **Amortecimento: classificação e métodos de determinação**. Informativo Técnico-Científico ITC04-Amortecimento, ATCP Engenharia Física, São Carlos, 2010.

COSTA, Eduarda; BRANCO, P. J. Costa. Continuum electromechanics of a magnetorheological damper including the friction force effects between the MR fluid and device walls: Analytical modelling and experimental validation. **Sensor and Actuators A: Physical**. ELSEVIER, vol. 155, p. 82-88, 2009.

CRAIG JR, R. R. **Structural Dynamics – An Introduction to Computer Methods**. 1ª ed. Singapore. John Wiley & Sons, 1981.

CVETICANIN, L. Oscillators with nonlinear elastic and damping forces. **Computers and Mathematics with Applications**, vol. 62, p. 1745-1757, 2011.

DIXON, John C. **The Shock Absorber Handbook**. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons. Wiley-Professional Engineering Publishing Series. England, 2007.

DEGENER, M. Effect of Structural Damping on the Dynamic Response of Spacecraft. **Agard Conference Proceedings: Damping Effects in Aerospace Structures**, n° 277, 1979.

DE LIMA, Alexandre Silva. **Identificação Experimental de um Sistema Magneto-Reológico**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

DE SILVA, Clarence W. **Vibration Damping, Control, and Design**. The University of British Columbia, Taylor & Francis Group, LLC, Vancouver, Canada, 2007.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ISF-213: Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Conjunto Trilho e Dormente**, [2015?], 6 p.

DO, T. N. et al. A new approach of friction model for tendon-sheath actuated surgical systems: Nonlinear modelling and parameter identification. **Mechanism and Machine Theory**, vol. 85. Elsevier Ltd, p. 14-24, 2015.

EMORY, Christopher Wyatt. **Prediction of Limit Cycle Oscillation in an Aeroelastic System using Nonlinear Normal Modes**. Thesis (Doctorate's). Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 2010.

FERNANDES, Júlio C. de Moraes. **Influência das Não Linearidades Geométricas em Sistemas de Suspensão com Amortecimento Assimétrico sob Excitação Harmônica**, Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Unesp, Bauru, 2015.

FILHO, Luiz A. Gagg. **Controle Semi-Ativo de Vibrações com Fluido Magnetoreológico Utilizando LMIs e Lógica Nebulosa Otimizada por Algoritmo Genético**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Unesp, Ilha Solteira, 2013.

FORMICA, Giovanni; TALÒ, Michela; LACARBONARA, Walter. Nonlinear modeling of carbon nanotube composites dissipation due to interfacial stick-slip. **International Journal of Plasticity**, vol. 53, p. 148-163, 2013.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 4ª ed. revista, Rio de Janeiro, 1998.

GEFFEN, V. Van. **A study of friction models and friction compensation**. DCT 118, 2009.

GONÇALVES, Angela M. S. **O problema de min-max com restrições pelo método de Nelder-Mead**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, 2013.

GORDANINEJAD, F. et al. Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. **Proceedings of the 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.

GUO, Pengfei. **Damping System Designs Using Nonlinear Frequency Analysis Approach**, Thesis (Doctorate's) – University of Sheffield, Faculty of Engineering, UK, 2012.

HVOLDAL, Mads; OLESEN, Casper. **Friction Modelling and Parameter Estimation for Hydraulic Asymmetrical Cylinders**. Thesis (Master's) – Aalborg University, Denmark, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 3448: Industrial liquid lubricants – ISO viscosity classification**, Switzerland, 1992, 12 p.

KAMINSKI, Paulo Carlos. **Desenvolvendo Produtos: Planejamento, Criatividade e Qualidade**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2000.

KHAN, Zulfiqar A.; CHACKO, Vivek; NAZIR, Hammad. A review of friction models in interacting joints for durability design. **Tsinghua Journals and Springer Journal: Friction** **5(1)**, p. 1-22, 2017.

KOTINDA, Giovanni Iamin; JÚNIOR, Valder Steffen. Estruturas Inteligentes: Fluido Magneto Reológico. **13º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia de Uberlândia, 2003.

KWOK, N. M. et al. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identifications using particle swarm optimization. **ScienceDirect – Sensors and Actuators A**, vol. 132, p. 441-451, 2006.

\_\_\_\_\_. Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA. **ScienceDirect – ISA Transactions**, vol. 46, p. 167-179, 2007.

LIU, Y. F. et al. Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system. **Mechanical Sciences**, v. 6, p. 15-28, 2015.

MOOSAPOUR, Mina; HAJABASI, Mohammad Ali; EHTESHAMI, Hossein. Thermoelastic damping effect analysis in micro flexural resonator of atomic force microscopy. **Applied Mathematical Modelling**, 2013.

NAYFEH, Ali Hasan; MOOK, Dean T. **Nonlinear Oscillations**. John Wiley & Sons Inc., 1995.

NGUYEN, Quoc-Hung; CHOI, Seung-Bok. **Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms**. Smart Actuation and Sensing Systems – Recent Advances and Future Challenges, INTECH, Chapter 14, 2012.

ON, Tommy; LAVIGNE, Peter A.; LAMBROS, John. Development of plastic nonlinear waves in one-dimensional ductile granular chains under impact loading. **Mechanics of Materials**, vol. 68, p. 263-281, 2013.

OTTENS, H. H. Mathematical Formulation of Damping for Structural Response Analysis. **Agard Conference Proceedings: Damping Effects in Aerospace Structures**, vol. 277, p. 1-1 a 1-9, 1979.

PASCHOAL, Eduardo Fontes. **Controle Semi-Ativo de Vibrações Usando Lógica Nebulosa e Fluido Magnetoreológico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Unesp, Ilha Solteira, 2011.

PHILLIPS, Camilo; HASHASH, Youssef M. A. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 29, p. 1143-1158, 2009.

PRETI, Rodrigo de Oliveira. **Modelagem e Simulação de um sistema Hidráulico Proposto para Funcionar como um Amortecedor para Pequenas Amplitudes**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2007.

PROVENZA, Francesco. **PRO-TEC: projetista de máquinas**, Editora F. Provenza, 71ª ed., São Paulo, 1996.

PUTHANPURAYIL, Arun M.; DHAKAL, Rajesh P.; CARR, Athol J. Modelling of In-Structure Damping: A Review of the State-of-the-art. **Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering**, Auckland, New Zealand, 2011.

RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations**, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

\_\_\_\_\_. **Vibration of Continuous Systems**, John Wiley & Sons Inc., 2007.

RAS, A.; BOUMECHRA, N. Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria University, 2016.

RICHARDS, Russell. **Comparison of Linear, Nonlinear, Hysteretic and Probabilistic MR Damper Models**. Thesis (Master's). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2007.

RODRÍGUEZ, Manuel Martínez. **Analysis of Structural Damping**, Thesis (Master's Degree) – Luleå University of Technology, Sweden, 2006.

RUZICKA, Jerome E.; DERBY, Thomas F. **Influence of Damping in Vibration Isolation**, The Shock and Vibration Information Center, United States Department of Defence, Naval Research Laboratory, 1971.

SAITO, S. et al. The Influences of the Material and Geometrical Properties of Sliding Plate on ER Effect of Gel-Structured ERF. **Proceedings of the 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.

SAPINSKI, Bogdan. Parametric Identifications of MR Linear Automotive Size Damper. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, vol. 3, 2002.

SAPINSKI, Bogdan; FILUS, Jacek. Analysis of Parametric Models of MR Linear Damper. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, vol. 44, p. 215-240, 2003.

SAVARESI, Sergio M.; BITTANTI, S.; MONTIGLIO, M. Identification of semi-physical and black-box non-linear models: the case of MR-dampers for vehicles control. **Automatica**, vol. 41, p. 113-127, 2005.

SIDPARA, Ajay. Magnetorheological finishing: a perfect solution to nanofinishing requirements. **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers – Optical Engineering: Special Section on Optical Fabrications, Testing and Metrology**, vol. 55.

SILVEIRA, Marcos; WIERCIGROCH, Marian. Low dimensional models for stick-slip vibration of drill-strings. **Journal of Physics: Conference Series 181: Proceedings of the 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis**. IOP Publishing Ltd, 2009.

SPENCER, B. F. et al. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. **Journal of Mechanical Engineering**, vol. 123(3), p. 230-238, 1997.

SUN, Y-H et al. A comprehensive experimental setup for identification of friction model parameters. **Mechanism and Machine Theory**, vol. 100, Elsevier Ltd, p. 338-357, 2016.

TANG, Bin; BRENNAN, M. J. A Comparison of the Effects of Nonlinear Damping on the Free Vibration of a Single-Degree-of-Freedom System. **Journal of Vibration and Acoustics**, vol. 134, 2012.

THOMSON, William T. **Theory of Vibration with Applications**. Fourth Edition, Prentice Hall, 1993.

TRUONG, Dinh Quang; AHN, Kyoung Kwan. Nonlinear black-box models and force-sensorless damping control for damping systems using magneto-rheological fluid dampers. **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 167, p. 556-573, 2011.

TUSSET, Ângelo Marcelo. **Controle Ótimo Aplicado em Modelo de suspensão Veicular Não-Linear Controlada Através de Amortecedor Magneto-Reológico**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

WANG, E. R. et al. Modeling Asymmetric Hysteretic Properties of an MR Fluids Damper. **43<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control**, p. 4643-4648, 2004.

WANG, Shuo. **Control of a Uni-Axial Magnetorheological Vibration Isolator**, Thesis (Doctorate's). The University of Toledo, 2011.

WANG, G. et al. Modeling and experimental investigation of a novel arc-surfaced frictional damper. **Journal of Sound and Vibration**, Gothenburg, vol. 389, p. 89-100, 2017.

WOJEWODA, J. et al. Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 366, p. 747-765, 2007.

WOODHOUSE, J. Linear Damping Models of Structural Vibration. **Journal of Sound and Vibration**, Gothenburg, vol. 215, n. 3, p. 547-569, 1998.

WU, Z. et al. Identification of nonlinear viscous damping and Coulomb friction from the free response data. **Journal of Sound and Vibration**, Gothenburg, vol. 304, p. 407-414, 2007.

XIA, Pin-Qi. An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 266, p. 1009-1023, 2003.

XIE, S. et al. Identification of nonlinear hysteretic systems by artificial neural network. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2012.

YANG, G. et al. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. **Engineering Structures**, vol. 24, p. 309-323, 2002.

YANG, Meng-Gang; LI, Chun-Yang; CHEN, Zheng-Qing. A new simple non-linear hysteretic model for MR damper and verifications of seismic response reduction experiment. **Engineering Structures**, vol. 52, p. 434-455, 2013.

YANG, Shaopu; SHEN, Yongjun. Recent advances in dynamics and control of hysteretic nonlinear systems. **Chaos, Solutions and Fractals**, vol. 40, p. 1808-1822, 2009.

ZEILMANN, A. P. et al. Teoria e Experimentação no Estudo sobre Atritos em Atuadores Robóticos. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Mecánica Computacional**, vol. XXIX, p. 2689-2708, Buenos Aires, 2010.

ZHANG, William; ZHANG, Hu. Modeling and Analysis of Nonlinear Damping Mechanisms in Vibrating Systems. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 36, n. 9, p. 829-848, Gothenburg, 1994.

## APÊNDICE A. CODIFICAÇÃO DOS ENSAIOS

Este apêndice tem por objetivo a apresentação dos códigos idealizados e utilizados para os dados experimentais digitais para eventual disponibilização destes, como complemento didático desta tese.

As codificações de referência para os arquivos digitais gerados foram as seguintes:

| Ensaio | Código do Amortecedor | Posição [x10 <sup>-1</sup> mm] | frequência [Hz] | amplitude [x10 <sup>-1</sup> mm] | I [x10 <sup>-1</sup> A] |
|--------|-----------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|
|--------|-----------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|

| Ensaio | Código de Sequência de Temperatura |
|--------|------------------------------------|
|--------|------------------------------------|

*Exemplo:* Os arquivos digitais **E61-MR-30-2-75-6.dat** e **E61-096.csv** gerados referem-se ao ensaio com as seguintes características:

- ✓ Ensaio: E61;
- ✓ Amortecedor: MR;
- ✓ Posição  $P = 3,0\text{mm}$  (eixo aberto 3,0mm para fora do corpo);
- ✓ Frequência de ciclagem = 2Hz;
- ✓ Amplitude de deslocamento =  $\pm 7,5\text{mm}$ ;
- ✓ Corrente elétrica = 0,6A;
- ✓ Arquivo de sequência de medição de temperatura: 096.

O arquivo digital .dat conterà quatro (04) colunas que representam, respectivamente: tempo inicial [s], deslocamento axial [mm], força axial [kN] e tempo final [s].

### AP.A1. Ensaio E10: Amortecedor AP (LU JIN modelo LJ400AX)

Para o amortecedor AP sem mola e sem folga de fixação:

**Tabela 19 - Arquivos digitais gerados no ensaio E10.**

| a [mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|--------|------------------|------------------|------------------|
| 1,0    | E10-AP-15-1-10-0 | E10-AP-15-3-10-0 | E10-AP-15-5-10-0 |
| 2,5    | E10-AP-15-1-25-0 | E10-AP-15-3-25-0 | E10-AP-15-5-25-0 |
| 4,0    | E10-AP-15-1-40-0 | E10-AP-15-3-40-0 | E10-AP-15-5-40-0 |

### AP.A2. Ensaio E12: Amortecedor AP (LU JIN modelo LJ400AX)

Para o amortecedor AP sem mola e com folga de fixação de aproximadamente 0,35mm:

**Tabela 20 - Arquivos digitais gerados no ensaio E12.**

| a<br>[mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| 1,0       | E12-AP-15-1-10-0 | E12-AP-15-3-10-0 | E12-AP-15-5-10-0 |
| 2,5       | E12-AP-15-1-25-0 | E12-AP-15-3-25-0 | E12-AP-15-5-25-0 |
| 4,0       | E12-AP-15-1-40-0 | E12-AP-15-3-40-0 | E12-AP-15-5-40-0 |

**AP.A3. Ensaio E13: Amortecedor AP (LU JIN modelo LJ400AX)**

Para o amortecedor AP sem mola e com folga de fixação de aproximadamente 1,35mm:

**Tabela 21 - Arquivos digitais gerados no ensaio E13.**

| a<br>[mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| 1,0       | E13-AP-15-1-10-0 | E13-AP-15-3-10-0 | E13-AP-15-5-10-0 |
| 2,5       | E13-AP-15-1-25-0 | E13-AP-15-3-25-0 | E13-AP-15-5-25-0 |
| 4,0       | E13-AP-15-1-40-0 | E13-AP-15-3-40-0 | E13-AP-15-5-40-0 |

**AP.A4. Ensaio E22: Amortecedor AH (SCUD modelo 10010006 com Mola Retirada)**

Para o amortecedor AH sem mola e sem folga de fixação:

**Tabela 22 - Arquivos digitais gerados no ensaio E22.**

| a<br>[mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| 2,5       | E22-AH-25-1-25-0 | E22-AH-25-3-25-0 | E22-AH-25-5-25-0 |
| 5,0       | E22-AH-25-1-50-0 | E22-AH-25-3-50-0 | E22-AH-25-5-50-0 |
| 7,5       | E22-AH-25-1-75-0 | E22-AH-25-3-75-0 | E22-AH-25-5-75-0 |

**AP.A5. Ensaio E23: Amortecedor AH (SCUD modelo 10010006 com Mola Retirada)**

Para o amortecedor AH sem mola e com folga de fixação de aproximadamente 1,1mm:

**Tabela 23 - Arquivos digitais gerados no ensaio E23.**

| a<br>[mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| 2,5       | E23-AH-25-1-25-0 | E23-AH-25-3-25-0 | E23-AH-25-5-25-0 |
| 5,0       | E23-AH-25-1-50-0 | E23-AH-25-3-50-0 | E23-AH-25-5-50-0 |
| 7,5       | E23-AH-25-1-75-0 | E23-AH-25-3-75-0 | E23-AH-25-5-75-0 |

**AP.A6. Ensaio E24: Amortecedor AH (SCUD modelo 10010006 com Mola Retirada)**

Para o amortecedor AH sem mola e com folga de fixação de aproximadamente 2,4mm:

**Tabela 24 - Arquivos digitais gerados no ensaio E24.**

| a<br>[mm] | 1Hz              | 3Hz              | 5Hz              |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| 2,5       | E24-AH-25-1-25-0 | E24-AH-25-3-25-0 | E24-AH-25-5-25-0 |
| 5,0       | E24-AH-25-1-50-0 | E24-AH-25-3-50-0 | E24-AH-25-5-50-0 |
| 7,5       | E24-AH-25-1-75-0 | E24-AH-25-3-75-0 | E24-AH-25-5-75-0 |

**AP.A7. Ensaio E61: Amortecedor MR (©LORD mod. RD-8040-1 curso curto)**

Para o amortecedor MR sem mola e sem folga de fixação:

**Tabela 25 - Arquivos digitais gerados no ensaio E61.**

|             | a<br>[mm] | 1Hz              | 2Hz              | 3Hz              |
|-------------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| <b>0A</b>   | 2,5       | E61-MR-30-1-25-0 | E61-MR-30-2-25-0 | E61-MR-30-3-25-0 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-0 | E61-MR-30-2-50-0 | E61-MR-30-3-50-0 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-0 | E61-MR-30-2-75-0 | E61-MR-30-3-75-0 |
| <b>0,1A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-1 | E61-MR-30-2-25-1 | E61-MR-30-3-25-1 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-1 | E61-MR-30-2-50-1 | E61-MR-30-3-50-1 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-1 | E61-MR-30-2-75-1 | E61-MR-30-3-75-1 |
| <b>0,2A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-2 | E61-MR-30-2-25-2 | E61-MR-30-3-25-2 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-2 | E61-MR-30-2-50-2 | E61-MR-30-3-50-2 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-2 | E61-MR-30-2-75-2 | E61-MR-30-3-75-2 |
| <b>0,3A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-3 | E61-MR-30-2-25-3 | E61-MR-30-3-25-3 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-3 | E61-MR-30-2-50-3 | E61-MR-30-3-50-3 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-3 | E61-MR-30-2-75-3 | E61-MR-30-3-75-3 |
| <b>0,4A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-4 | E61-MR-30-2-25-4 | E61-MR-30-3-25-4 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-4 | E61-MR-30-2-50-4 | E61-MR-30-3-50-4 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-4 | E61-MR-30-2-75-4 | E61-MR-30-3-75-4 |
| <b>0,5A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-5 | E61-MR-30-2-25-5 | E61-MR-30-3-25-5 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-5 | E61-MR-30-2-50-5 | E61-MR-30-3-50-5 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-5 | E61-MR-30-2-75-5 | E61-MR-30-3-75-5 |
| <b>0,6A</b> | 2,5       | E61-MR-30-1-25-6 | E61-MR-30-2-25-6 | E61-MR-30-3-25-6 |
|             | 5,0       | E61-MR-30-1-50-6 | E61-MR-30-2-50-6 | E61-MR-30-3-50-6 |
|             | 7,5       | E61-MR-30-1-75-6 | E61-MR-30-2-75-6 | E61-MR-30-3-75-6 |

**AP.A8. Ensaio E65: Amortecedor AH (SCUD modelo 10010006 com Mola Retirada)**

Para o amortecedor AH sem mola e sem folga de fixação, com longa duração de ensaio (mais 450 ciclos):

$$E65: \quad 0A, 3Hz \text{ e } \pm 7,5mm \quad \left\{ \begin{array}{l} E65-AH-25-3-75-0 \\ E65-001 \\ \text{Duração: 611s (1833 ciclos)} \end{array} \right.$$

**AP.A9. Ensaio E66: Amortecedor AP (LU JIN modelo LJ400AX)**

Para o amortecedor AP sem mola e sem folga de fixação, com longa duração de ensaio (mais 450 ciclos):

$$E66: \quad 0A, 3Hz \text{ e } \pm 4,0mm \quad \left\{ \begin{array}{l} E66-AP-15-3-40-0 \\ E66-001 \\ \text{Duração: 587s (1761 ciclos)} \end{array} \right.$$

## APÊNDICE B. PROPRIEDADES DE FLUIDOS LÍQUIDOS TÍPICOS PARA AMORTECEDORES: REFERÊNCIA AOS AMORTECEDORES AH E MR

### AP.B1. Amortecedor AH

Segundo DIXON (2007), o fluido líquido típico utilizado em amortecedores é o óleo mineral de baixa viscosidade e, em alguns casos particulares, empregam-se óleos sintéticos. A **Tabela 26** apresenta as propriedades típicas dos óleos utilizados em amortecedores:

**Tabela 26 – Propriedades típicas dos óleos utilizados em amortecedores.**

| Propriedade                              | Símbolo                                       | Valor Típico   |
|--|---|--|
| Densidade (massa específica) a 15°C      | $\rho$  | $\approx 860 \text{ kg/m}^3$                         |
| Viscosidade (absoluta) a 15°C            | $\mu$   | $\approx 40 \text{ mPa.s}$                           |
| Faixa de Temperatura                     | T   | $\approx -40 \text{ a } +130 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Faixa de pressão                         | FP  | $\approx 0 \text{ a } 20 \text{ MPa}$                |
| Compressibilidade                        | $\frac{\left(\frac{d\rho}{dP}\right)}{\rho}$  | $\approx 0,05 \text{ \%MPa}$                         |
| Condutividade Térmica                    | k   | $\approx 0,14 \text{ W/(m.K)}$                       |
| Capacidade Térmica                       | $c_p$   | $\approx 2,5 \text{ kJ/(kg.K)}$                      |
| Expansão Térmica                         | $-\frac{\left(\frac{d\rho}{dT}\right)}{\rho}$ | $\approx 0,1 \text{ \%/(}^\circ\text{C)}$            |
| Sensibilidade de Viscosidade-Temperatura | $\frac{\left(\frac{d\mu}{dT}\right)}{\mu}$    | $\approx -2 \text{ \%/(}^\circ\text{C)}$             |
| Sensibilidade de Viscosidade-Pressão     | $\frac{\left(\frac{d\mu}{dP}\right)}{\mu}$    | $\approx +3 \text{ \%MPa}$                           |
| Tensão Superficial                       | $\sigma_s$                                    | $\approx 25 \text{ mN/m}$                            |
| Coefficiente de Absorção de Ar           | $k_A$   | $\approx 1 \text{ kg/(m}^3.\text{MPa)}$              |

Fonte: DIXON, 2007.

Dividindo-se a viscosidade absoluta pela massa específica do fluido se obtém a viscosidade cinemática (dinâmica) do mesmo. Pelos dados apresentados na **Tabela 26** pode-se chegar à conclusão que:

$$v_{\text{óleo de amortecedor,15}^\circ\text{C}} = 46,51 \text{ mm}^2/\text{s} = 46,51 \text{ cSt} \quad \text{Eq. 98}$$

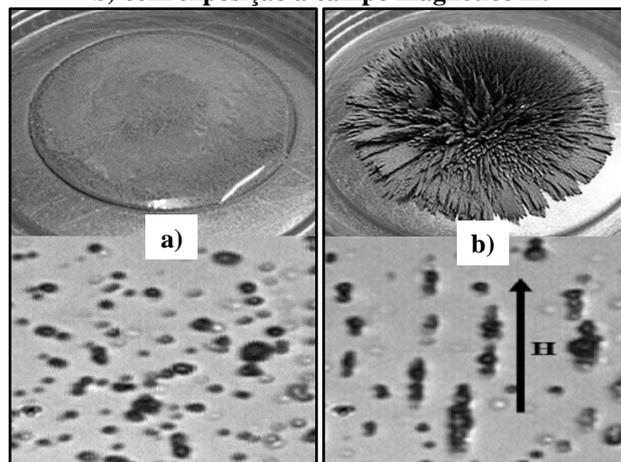
O valor de viscosidade cinemática da **Eq. 98** observado em relação aos valores fornecidos pela Norma ISO 3448:1992 classifica-o como provável óleo ISO VG 15 (vide **Figura 76**).

## AP.B2. Amortecedor MR

Sobre a composição básica comum de um MRF é possível enumerar três constituintes principais: (AVRAAM, 2009); (BONSOR, [2014?])

- Partículas de ferrocarbonila: Constituem de 20 a 40% do fluido e são partículas que variam de 3 a 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro;
- Líquido transportador (veículo): Normalmente um óleo hidrocarboneto;
- Aditivos patenteados: Tratam-se de substâncias supostamente sigilosas industrialmente que os fabricantes adicionam ao fluido para justificar uma série de melhorias nas propriedades do MRF, tal como inibição do depósito gravitacional das partículas de ferrocarbonila e promoção da suspensão das mesmas, aumento da oleosidade, modificação da viscosidade e redução do desgaste do elemento amortecedor.

**Figura 75 – Aspectos básicos do MRF: a) sem exposição a campo magnético  $H$ ; b) com exposição a campo magnético  $H$ .**



Fonte: Imagens superiores: SIDPARA, 2014; Imagens inferiores: COSTA & BRANCO, 2009.

Especificamente quanto ao aspecto de viscosidade neste tipo de fluido, esta recebe influência da corrente elétrica, temperatura, pressão e até mesmo é possível cogitar inicialmente que receba influência do tempo de aplicação do campo magnético. Conforme o estudo elaborado ROCHA et al. (2007) abordando a reologia (magnetoreologia) do petróleo do Recôncavo Baiano e Bacia de Campos, esta consideração parece bastante razoável, mesmo os autores afirmando que não foi possível estabelecer uma correlação entre esta redução de viscosidade aparente com o tempo de exposição e a intensidade do campo magnético.

Estudos sobre este aspecto devem ainda ser realizados para se obter uma posição mais concreta da variação da viscosidade dinâmica dos MRF em relação à temperatura e outras variáveis (tempo de exposição, intensidade de campo magnético, pressão e outros) mas, segundo DIXON (2007), a parte líquida de um MRF corresponde tipicamente a um óleo cuja densidade é  $800 \text{ kg/m}^3 = 0,8 \text{ g/cm}^3$  e a classificação deste pela Norma ISO 3448:1992 é ISO VG 40 (vide **Figura 76**).

O fabricante americano ©*LORD Corporation*, cujo AMR foi utilizado nos ensaios experimentais desta tese, fornece propriedades dos três fluidos magnetoreológicos (MRF) comercializados por ele. Baseado na informação de DIXON (2007) e pela da **Tabela 27**, especificamente no que se refere à informação de densidade, o MRF-122 EG possuirá, por consequência, uma densidade exclusiva de sólidos de 1,48 a 1,68  $\text{g/cm}^3$ .

**Tabela 27 – Propriedades dos fluidos magnetoreológicos (MRF) do fabricante ©LORD Corporation.**

| Propriedade                           | MRF-122 EG*                    | MRF-132 DG                     | MRF-140 CG                     |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Aparência                             | Líquido cinza escuro           | Líquido cinza escuro           | Líquido cinza escuro           |
| Viscosidade Plástica, $\eta$ , a 40°C | $0,042 \pm 0,020 \text{ Pa.s}$ | $0,112 \pm 0,020 \text{ Pa.s}$ | $0,280 \pm 0,070 \text{ Pa.s}$ |
| Faixa de Temperatura de Operação      | -40 a +130°C                   | -40 a +130°C                   | -40 a +130°C                   |
| Quantidade de sólido em peso          | 72%                            | 80,98%                         | 85,44%                         |
| Ponto de Ignição                      | > 150°C                        | > 150°C                        | > 150°C                        |
| Densidade                             | 2,28 a 2,48 $\text{g/cm}^3$    | 2,95 a 3,15 $\text{g/cm}^3$    | 3,54 a 3,74 $\text{g/cm}^3$    |

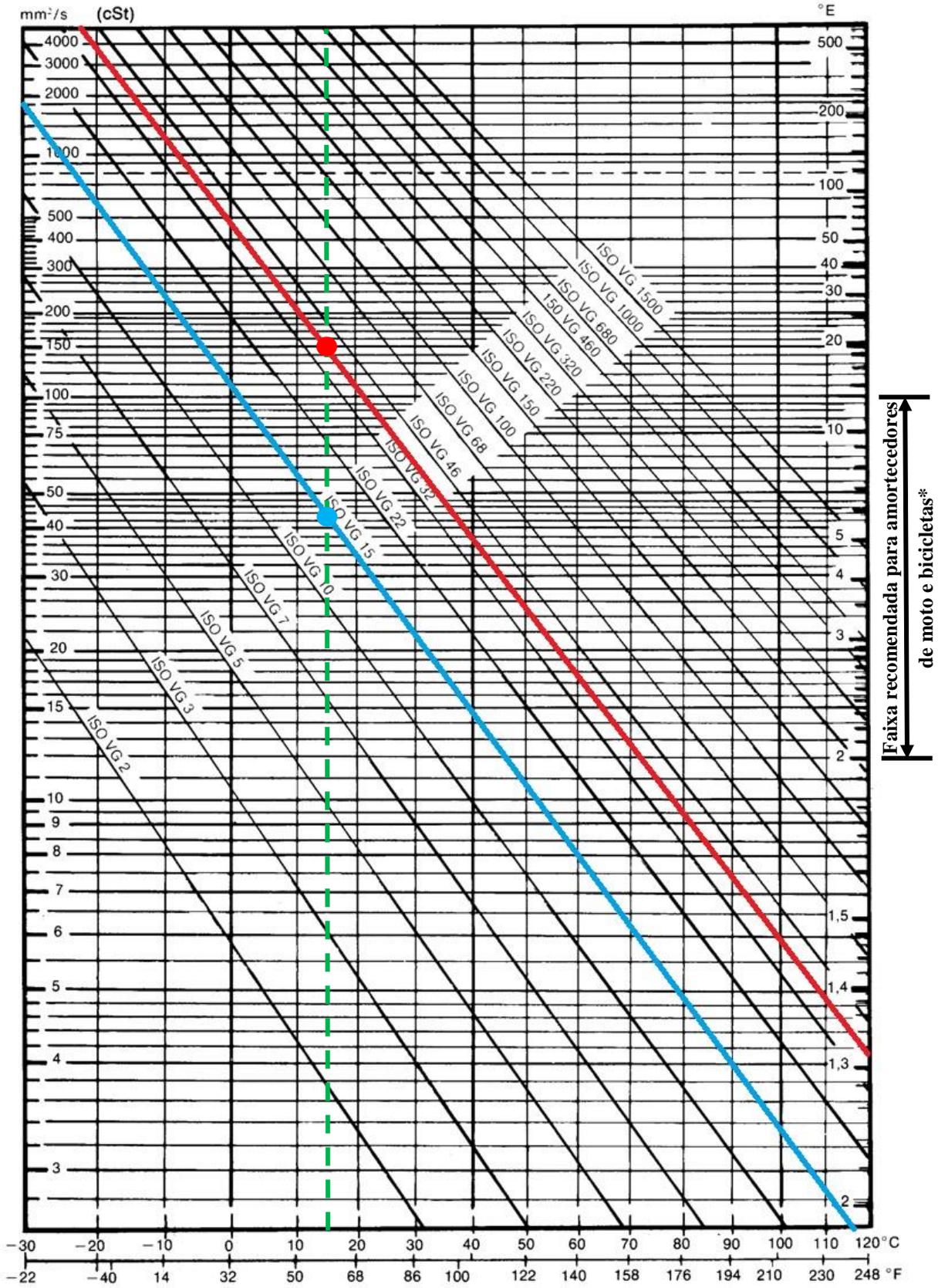
\* Fluido magnetoreológico do amortecedor MR (fabricante ©LORD mod. RD-8040-1, curso curto) utilizado experimentalmente no presente trabalho.

Fonte: Catálogos Técnicos ©LORD Corporation DS7027 Rev1 7/08, DS7015 Rev2 11/11 e DS7012 Rev1 7/08

### AP.B3. Norma ISO 3448:1992

A Organização Internacional para Padronização (ISO) apresenta em sua referência normativa 3448:1992 a relação de decaimento da viscosidade cinemática pela temperatura para óleos lubrificantes comuns:

Figura 76 – Norma ISO 3448:1992 para óleo lubrificantes padrão: Relação de enquadramento de viscosidade cinemática por temperatura.



\* <https://sites.google.com/site/iridethedirt/viscosidade-de-oleo-e-suspensoes>.

## APÊNDICE C. PROPRIEDADES COMPLEMENTARES DO AMORTECEDOR MR FABRICANTE ©LORD MOD. RD-8040-1 (CURSO CURTO)

Conforme dados fornecidos pelo fabricante (Catálogo Técnico DS7016, Rev. 06/09), as seguintes informações técnicas são relevantes para o mod. RD-8040-1 de curso curto: é compacto e adequado para aplicações industriais de suspensão, o amortecimento variável contínuo é controlado pelo aumento da resistência ao escoamento do MRF, em resposta à força campo magnético, seu tempo de resposta é rápido: responde em menos de 15 milissegundos às mudanças no campo magnético, é durável: proporciona excelente estabilidade a longo prazo e devem ser armazenados dentro da faixa de -40 a +100°C (-40 a +212°F).

Em relação às suas propriedades elétricas:

**Tabela 28 – Propriedades elétricas do amortecedor MR fabricante ©LORD mod. RD-8040-1 (curso curto).**

| Propriedade   | Valor       |
|---|-------------|
| Corrente Elétrica de Entrada em modo contínuo por 30 segundos | 1A (máximo) |
| Corrente Elétrica de Entrada em modo intermitente             | 2A (máximo) |
| Tensão Elétrica de Entrada                                    | 12V (DC)    |
| Resistência Elétrica em temperatura ambiente                  | 5Ω          |
| Resistência Elétrica em 71°C (160°F)                          | 7Ω          |

Fonte: Catálogo técnico ©LORD DS7016 Rev. 06/09.

Em relação às suas propriedades mecânicas:

**Tabela 29 – Propriedades mecânicas do amortecedor MR fabricante ©LORD mod. RD-8040-1 (curso curto).**

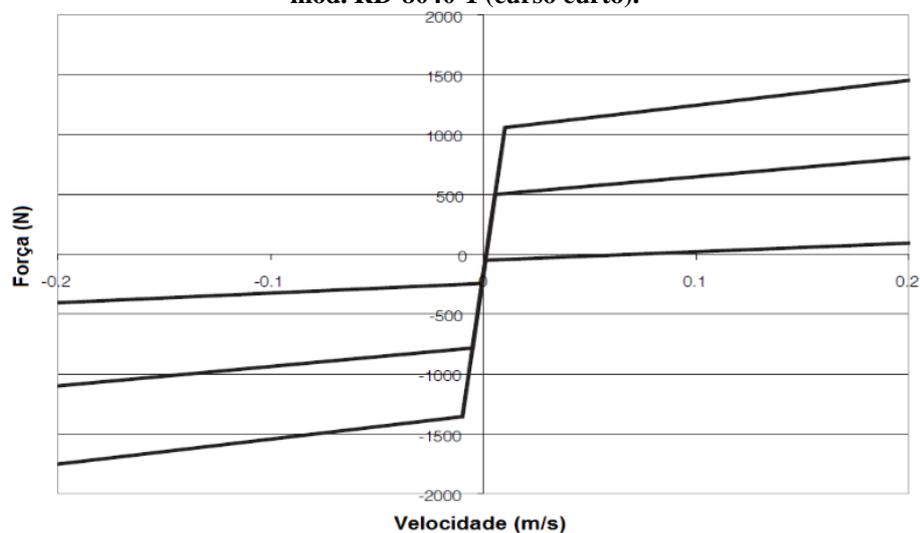
| Propriedade  | Valor               |
|--|---------------------|
| Curso  | 55mm                |
| Comprimento Total com curso máximo                     | 208mm               |
| Diâmetro do Corpo                                      | 42,1mm              |
| Diâmetro do Eixo                                       | 10mm                |
| Carga de Tração  | 8896N (máx.)        |
| Força de Amortecimento com velocidade de 0,05m/s em 1A | <2447N              |
| Força de Amortecimento com velocidade de 0,20m/s em 0A | <667N               |
| Temperatura de Operação                                | 71°C (160°F) (máx.) |

Fonte: Catálogo técnico ©LORD DS7016 Rev. 06/09.

O amortecedor opera acoplado a um *kit* controlador do mesmo fabricante denominado “*Wonder Box*” e conforme dados fornecidos (Catálogo Técnico UI7000, Rev. 05/06), as seguintes informações técnicas são relevantes:

- ✓ O kit é desenvolvido para aplicação em produtos com fluidos MR;
- ✓ Permite operação com pulso por controle manual ou externo, sendo que o sistema manual necessita de um potenciômetro (amperímetro).

**Figura 77 – Respostas de força por velocidade do amortecedor MR ©LORD mod. RD-8040-1 (curso curto).**



Fonte: Catálogo técnico ©LORD DS7016 Rev. 06/09.

Em relação às suas propriedades técnicas do *kit* controlador:

**Tabela 30 – Propriedades técnicas do *kit* controlador ©LORD mod. “*Wonder Box*”.**

| Propriedade  | Valor            |
|--|------------------|
| <b>Dimensões Físicas (Comprimento x Espessura x Largura)</b> | 63,5x27,9x88,9mm |
| <b>Tipo de Entrada</b>                                       | 2,1mm fêmea      |
| <b>Largura de Modulação de Pulso (PWM)</b>                   | 30kHz            |
| <b>Corrente Elétrica de Saída</b>                            | 2A (máx.)        |
| <b>Fonte de Alimentação</b>                                  | 12V (DC)         |

Fonte: Catálogo técnico ©LORD UI7000 Rev. 05/06.

## APÊNDICE D. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS PARA AP, AH E MR

Em termos geométricos, com a utilização do instrumento ME4 (referência à **Tabela 3**) foi possível obter as informações aqui mensuradas, com concordância com o diagrama esquemático de base apresentado na **Figura 4**.

### AP.D1. Amortecedor AP

Após finalizados os ensaios experimentais, o amortecedor AP foi submetido a um procedimento de desmontagem (corte com lixadeira elétrica rotativa) para medição e constatação de seus aspectos geométricos e construtivos. A **Figura 78** apresenta o amortecedor AP já desmontado:



Fonte: próprio autor.

A **Tabela 31** apresenta um resumo construtivo obtido para o amortecedor AP:

**Tabela 31 – Resumo dos parâmetros geométricos e aspectos construtivos obtidos para o amortecedor AP.**

| Descrição  | Parâmetro / Aspecto construtivo | Valor obtido em medição        |
|--|---------------------------------|--------------------------------|
| Diâmetro externo do corpo                            | $D_{ext}$                       | 25,4 mm (roscado)              |
| Diâmetro interno do corpo                            | $D_{int}$                       | 20,0 mm                        |
| Diâmetro do pistão                                   | $D$                             | 19,9 mm                        |
| Distância entre o pistão e a parede interna do corpo | $d = (D_{int} - D)/2$           | 0,05 mm                        |
| Altura do pistão                                     | $L$                             | 7,4 mm                         |
| Fluido de trabalho                                   | --                              | provável ar (amortecedor seco) |
| Construção   | --                              | monotubo                       |

## AP.D2. Amortecedor AH

Após finalizados os ensaios experimentais o amortecedor AH também foi submetido a um procedimento de desmontagem (corte com lixadeira elétrica rotativa) para medição e constatação de seus aspectos geométricos e construtivos. A **Figura 79** apresenta o amortecedor AH já desmontado:



Fonte: próprio autor.

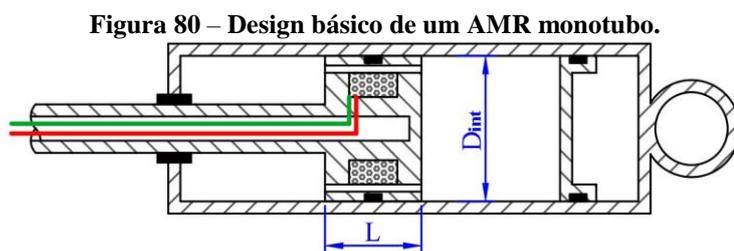
A **Tabela 32** apresenta um resumo construtivo obtido para o amortecedor AH:

**Tabela 32 – Resumo dos parâmetros geométricos e aspectos construtivos obtidos para o amortecedor AH.**

| Descrição   | Parâmetro / Aspecto construtivo | Valor obtido em medição                       |
|---|---------------------------------|---|
| <b>Diâmetro externo do corpo externo</b>                    | $D_{ext1}$                      | 28,2 mm                                       |
| <b>Diâmetro interno do corpo externo</b>                    | $D_{int1}$                      | 26,0 mm                                       |
| <b>Diâmetro externo do corpo interno</b>                    | $D_{ext2}$                      | 23,1 mm                                       |
| <b>Diâmetro interno do corpo interno</b>                    | $D_{int2}$                      | 21,0 mm                                       |
| <b>Diâmetro do pistão</b>                                   | $D$                             | 20,9 mm                                       |
| <b>Distância entre o pistão e a parede interna do corpo</b> | $d = (D_{int} - D)/2$           | 0,05 mm                                       |
| <b>Altura do pistão (válvula)</b>                           | $L$                             | 12,2 mm                                       |
| <b>Fluido de trabalho</b>                                   | --                              | provável ISO VG 15 e gás (ar e/ou nitrogênio) |
| <b>Construção</b>   | --                              | bitubo  |

### AP.D3. Amortecedor MR

Este amortecedor não foi submetido a procedimento de desmontagem para medição e constatação de seus aspectos geométricos e construtivos devido ao seu substancial custo de aquisição e, portanto, alguns de seus parâmetros geométricos são desconhecidos. A forma construtiva base considerada ao amortecedor MR foi a descrita por DIXON (2007), mostrada na **Figura 80**:



Fonte: Baseado em DIXON, 2007.

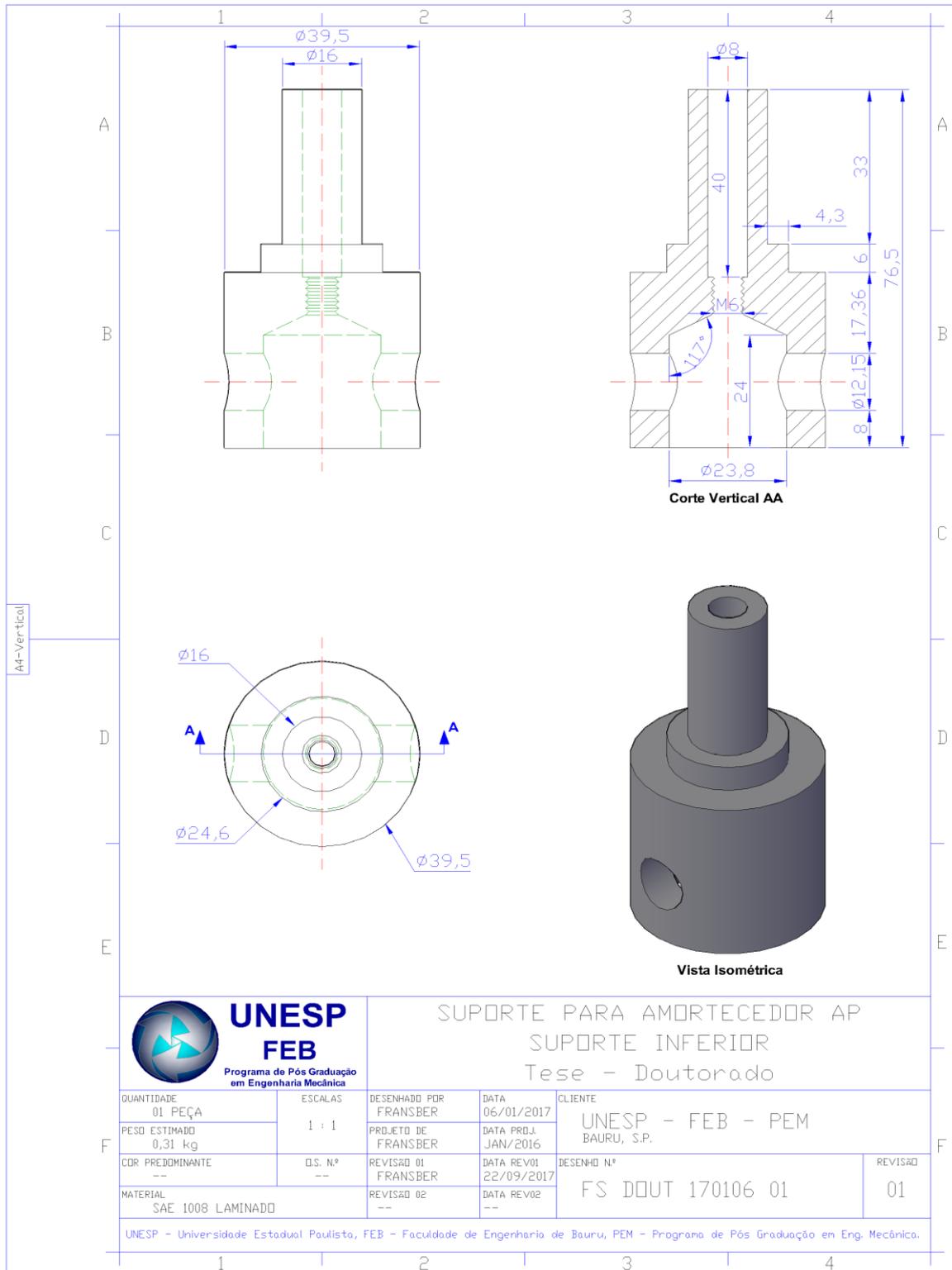
A **Tabela 33** apresenta um resumo construtivo obtido para o amortecedor MR:

**Tabela 33 – Resumo dos parâmetros geométricos e aspectos construtivos obtidos para o amortecedor MR.**

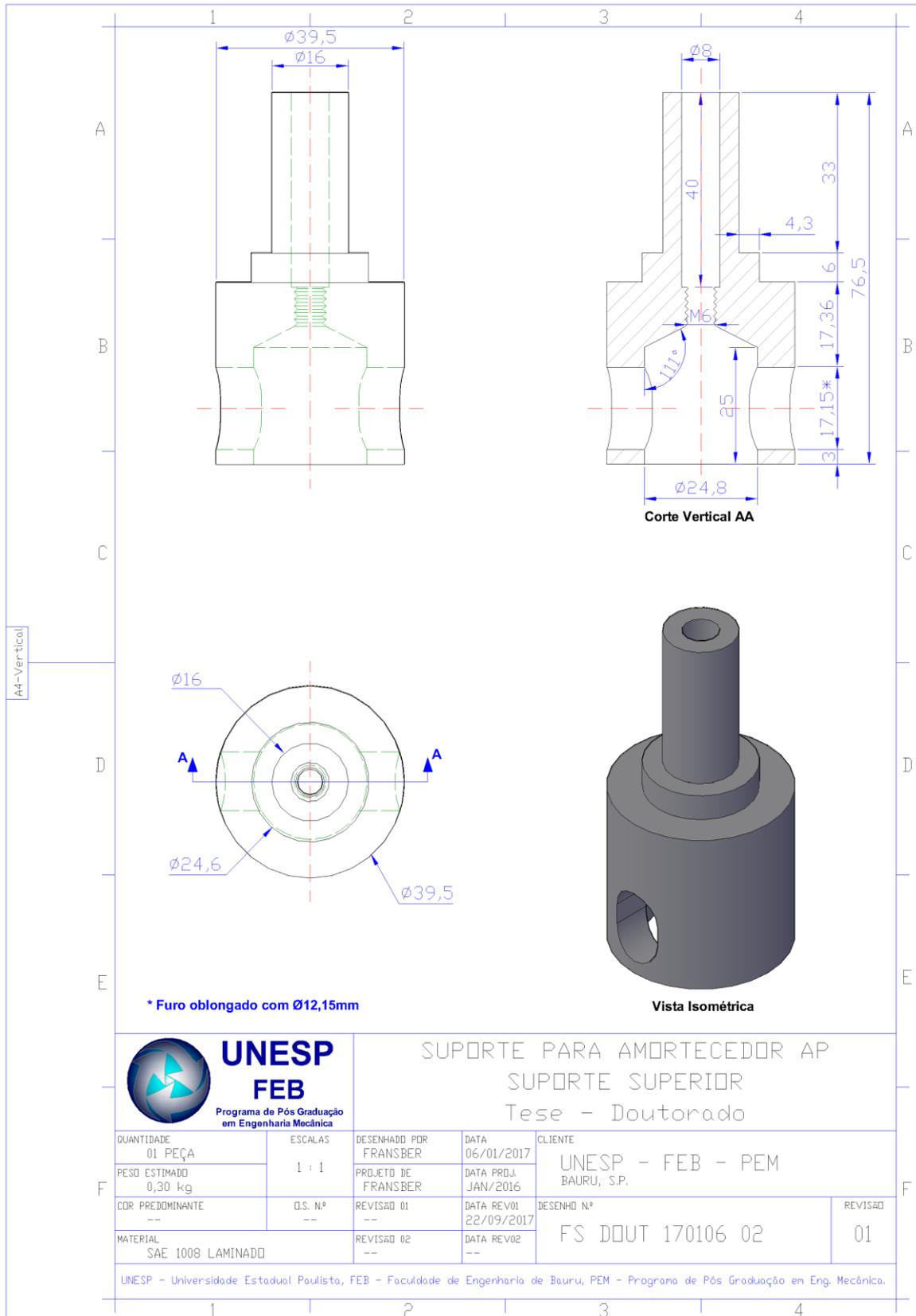
| Descrição  | Parâmetro / Aspecto construtivo | Valor obtido em medição |
|--|---------------------------------|-------------------------|
| Diâmetro externo do corpo                            | $D_{ext}$                       | 41,4 mm                 |
| Diâmetro interno do corpo                            | $D_{int}$                       | --                      |
| Diâmetro do pistão                                   | $D$                             | 10 mm                   |
| Distância entre o pistão e a parede interna do corpo | $d = (D_{int} - D)/2$           | --                      |
| Altura do pistão                                     | $L$                             | 7,4 mm                  |
| Fluido de trabalho                                   | --                              | MRF-122 EG              |
| Construção   | --                              | monotubo (pressuposto)  |

## APÊNDICE E. DESENHOS DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO DOS AMORTECEDORES AP, AH E MR

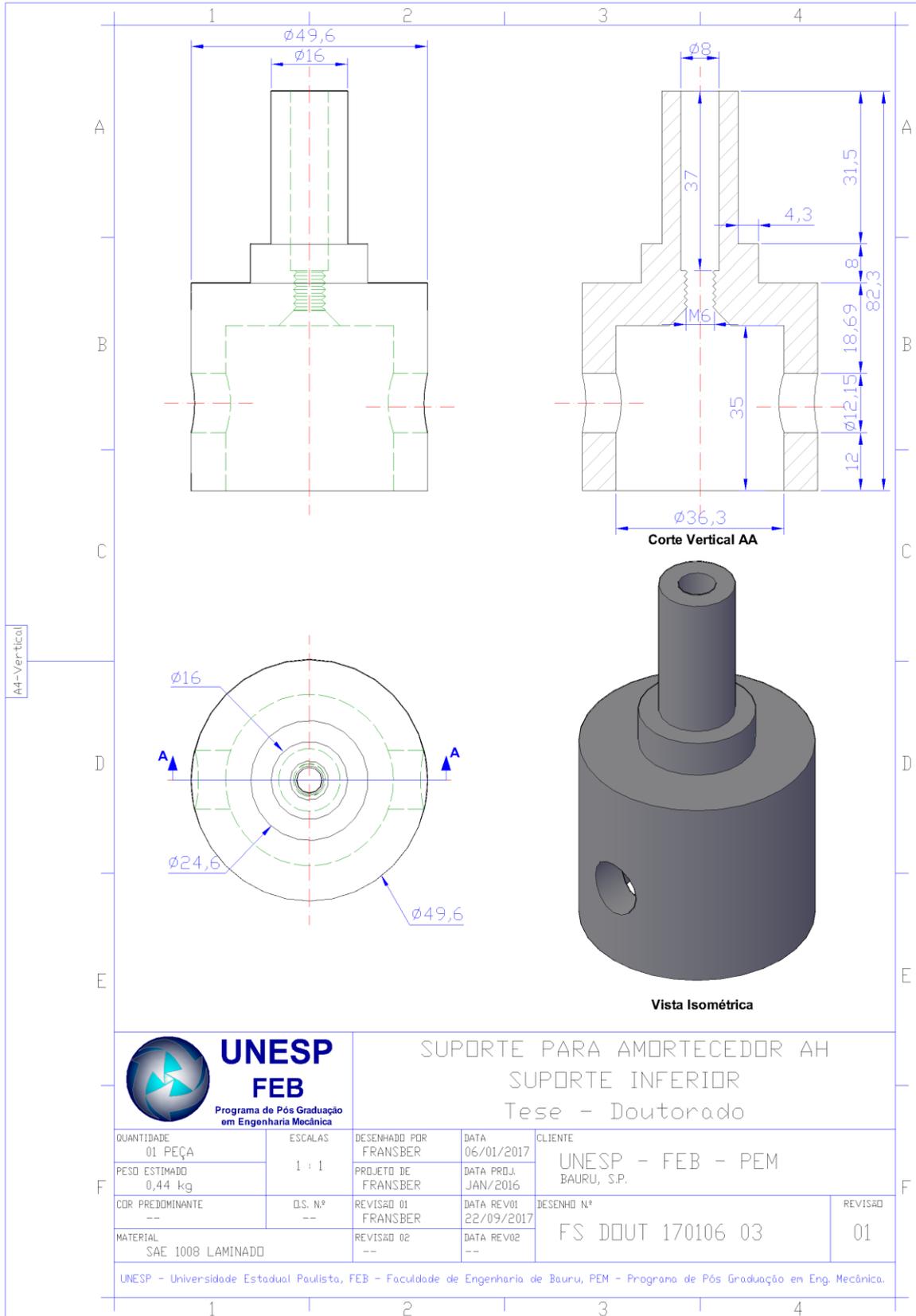
**Figura 81 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor AP em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte inferior (com furo reto).**



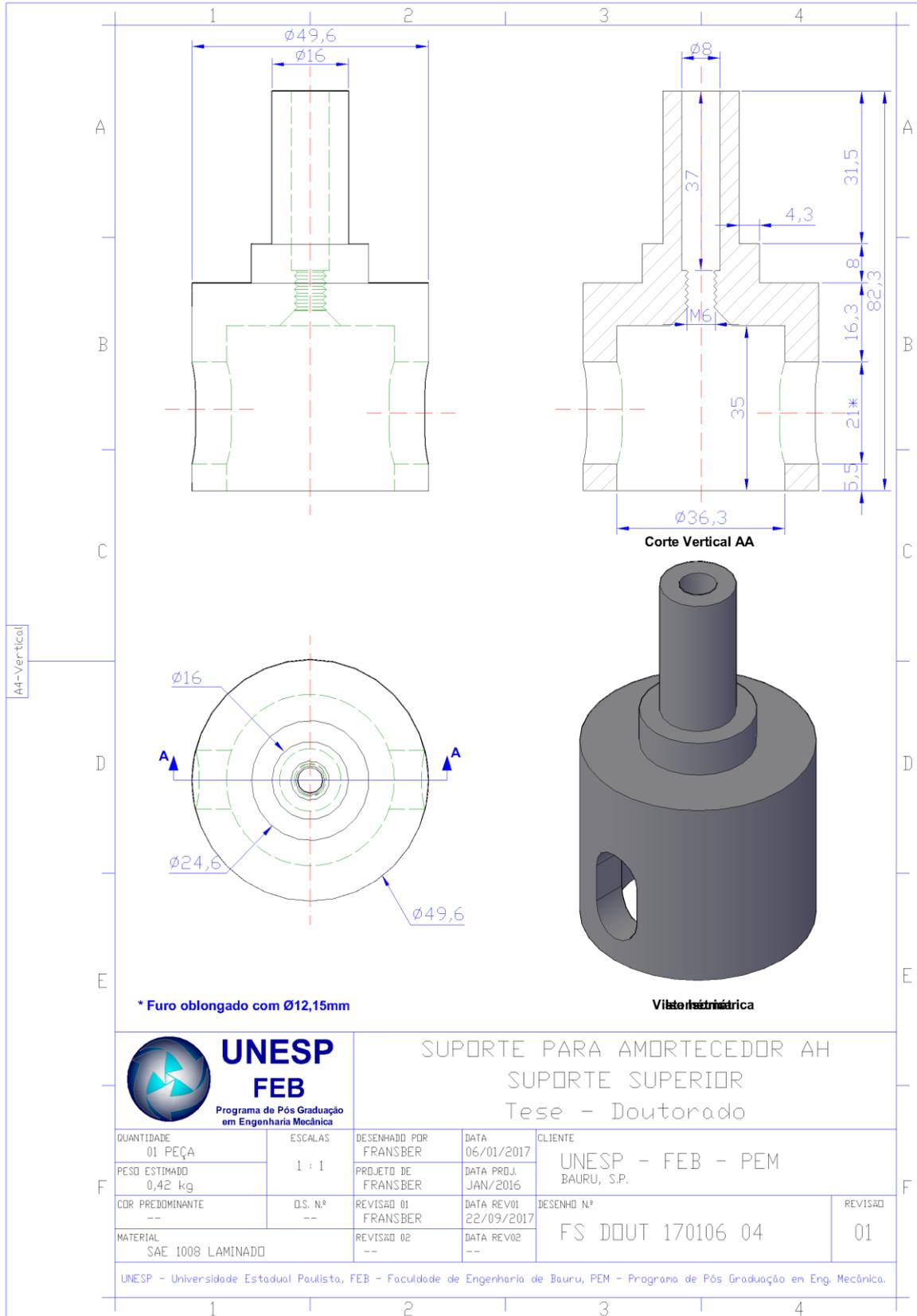
**Figura 82 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor AP em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte superior (com furo oblongo).**



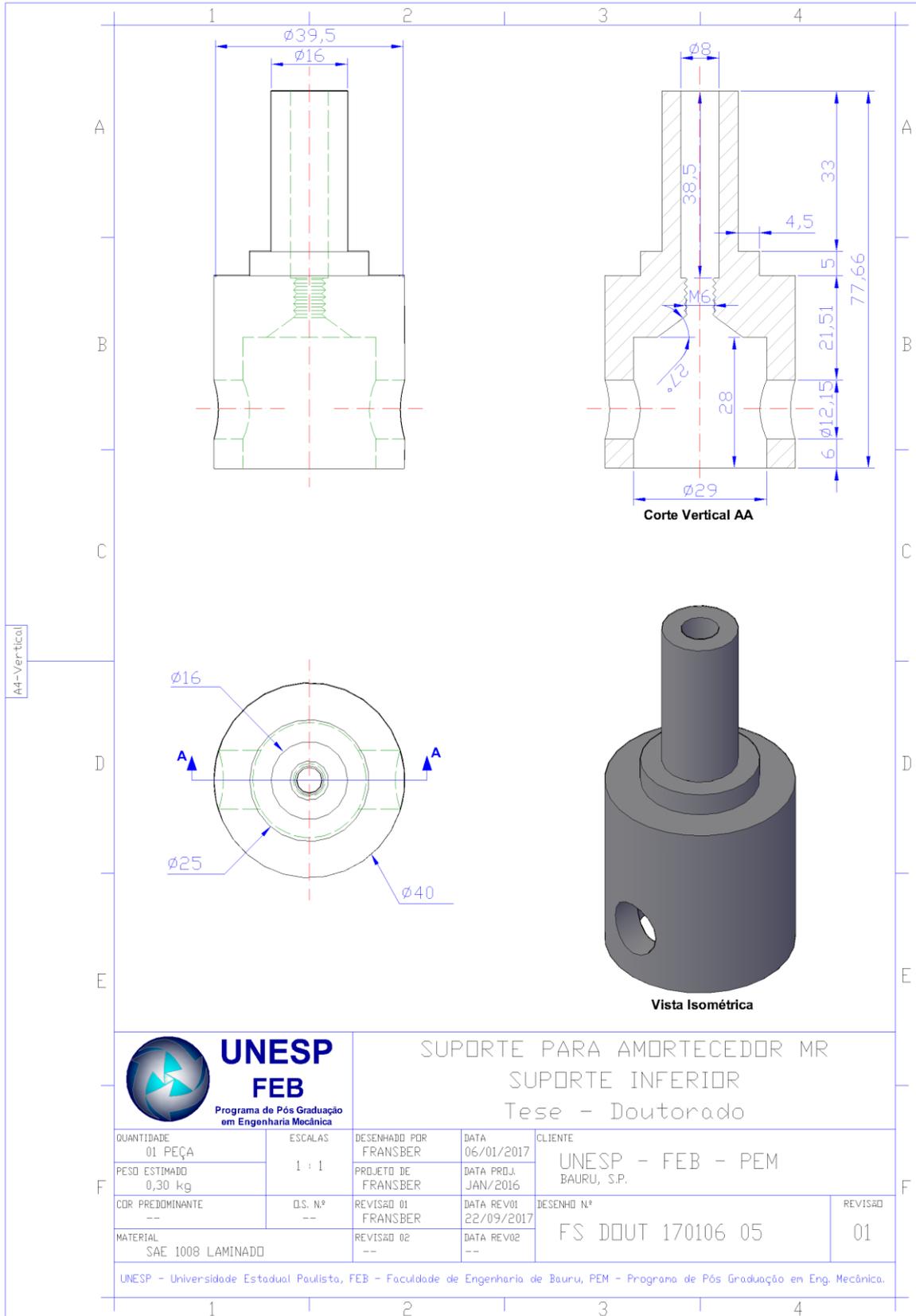
**Figura 83 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor AH em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte inferior (com furo reto).**



**Figura 84 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor AH em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte superior (com furo oblongo).**



**Figura 85 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor MR em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte inferior (com furo reto).**



**Figura 86 – Suportes de adaptação para fixação do amortecedor MR em máquina de ensaios MTS mod. 647: suporte superior (com furo oblongo).**

