



## ESTUDO DE UM MANCAL MAGNÉTICO ELETRODINÂMICO

Marcelo de Almeida Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(es): Richard Magdalena Stephan  
Guilherme Gonçalves Sotelo

Rio de Janeiro  
Março de 2014

ESTUDO DE UM MANCAL MAGNÉTICO ELETRODINÂMICO

Marcelo de Almeida Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

---

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

---

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.

---

Prof. Janaina Gonçalves de Oliveira, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2014

Lopes, Marcelo de Almeida.

Estudo de um Mancal Magnético Eletrodinâmico.  
/Marcelo de Almeida Lopes. – Rio de Janeiro:  
UFRJ/COPPE, 2014.

XV, 84 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Guilherme Gonçalves Sotelo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de  
Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 66 – 70.

1. Levitação Eletrodinâmica. 2. Mancal Eletrodinâmico. 3.  
Mancal Homopolar. I. Stephan, Richard Magdalena *et al.* II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de  
Engenharia Elétrica. III. Título.

Aos meus pais que me cederam amor e educação.  
Ao meu irmão que me influenciou de forma construtiva.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Paulo e Sandra pelo apoio e dedicação, que consolidaram a minha formação pessoal.

Ao meu irmão Bruno, por estar presente em minha vida me motivando e auxiliando a cada dia.

À minha namorada Thainan, pelo incentivo e momentos de distração.

Aos meus amigos e familiares pelos momentos de descontração vitais para meu entusiasmo.

Aos colegas do LASUP e LABMAQ, especialmente ao Elkin e Felipe Costa, pela colaboração durante o trabalho.

Aos meus professores orientadores. Obrigado pelo apoio, incentivo e paciência.

Aos demais professores que participaram em minha formação, pelo esforço e vontade de ensinar.

## EPÍGRAFE

“Nada é mais interessante e honroso que a participação na construção de uma sociedade, cuja alma é única e sã.”

Marcelo Lopes

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO DE UM MANCAL MAGNÉTICO ELETRODINÂMICO

Marcelo de Almeida Lopes

Março/2014

Orientadores: Richard Magdalena Stephan  
Guilherme Gonçalves Sotelo

Programa: Engenharia Elétrica

Mancais magnéticos podem ser uma solução para casos específicos, por exemplo, onde há imposição de alta velocidade de operação. Nesta linha, apresenta-se o mancal eletrodinâmico, que possui componentes bastante difundidos no mercado e de geometria amigável do ponto de vista da construção mecânica. Neste trabalho, serão apresentadas as características da levitação eletrodinâmica, proporcionando ao leitor o conhecimento do comportamento das forças associadas para diferentes valores de parâmetros. Todo o estudo encontra-se suportado em cálculos analíticos e simulações numéricas, além de resultados experimentais. Por fim, será descrito o comportamento do mancal eletrodinâmico radial homopolar projetado e construído, cuja proposta se baseia na minimização das perdas e maximização das forças. Esta última observada tanto quando da operação excêntrica quanto na presença de velocidade radial. Detalhes do ponto de vista de projeto e operação serão descritos ao longo do trabalho.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## STUDY OF AN ELETRODYNAMIC BEARING

Marcelo de Almeida Lopes

March/2014

Advisors: Richard Magdalena Stephan  
Guilherme Gonçalves Sotelo

Department: Electrical Engineering

Magnetic bearings may be a solution for specific operations, for instance, at high speed. One type of magnetic bearing is the called electrodynamic bearing, which has a feasible geometry and widespread components in industry. This work presents the characteristics of electrodynamic levitation, namely the forces behavior for different parameters, obtained by analytical calculations, numerical simulations as well as experimental tests. Finally, the design and construction of a radial homopolar electrodynamic bearing will be detailed, whose propose is to minimize losses and to maximize restoring forces. This last one is present in case of an eccentric operation as well as when the rotor has a radial velocity. More details about design and construction will be seen in this work.



## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1.	Motivação do Trabalho .....	2
1.2.	Objetivo do Trabalho .....	3
1.3.	Organização do Trabalho .....	3
2	Mancais Eletromagnéticos.....	5
2.1.	Ativos, Passivos e Híbridos .....	5
2.2.	Mancais Magnéticos com Eletroímãs (Ativos).....	7
2.3.	Mancais Magnéticos de Ímãs Permanentes (Passivos).....	10
2.4.	Mancais Magnéticos Supercondutores (Ativos ou Passivos) .....	10
2.5.	Mancais Eletrodinâmicos.....	12
3	Levitação Eletrodinâmica .....	13
3.1.	Princípio de Funcionamento .....	13
3.2.	Método das Imagens .....	16
3.3.	Força de Levitação e de Arraste.....	17
4	Sistema Condutor-Ímã Permanente .....	21
4.1.	Bancada de Testes.....	21
4.2.	Simulação do Sistema Ímã-Disco .....	24
4.3.	Resultados de Simulação e Experimentais .....	26
5	Mancal Eletrodinâmico.....	35
5.1.	Mancal Homopolar x Heteropolar .....	35
5.2.	Indução de Correntes .....	37
5.3.	Características do EDB .....	40
5.4.	Rigidez e Amortecimento .....	42
6	Sistema EDB Homopolar .....	45

6.1. Simulações Computacionais do EDB pelo MEF .....	45
6.1.1. Geometria do Mancal .....	46
6.1.2. Método de Cálculo .....	46
6.1.3. Construção da Malha .....	48
6.2. Bancada para Levantamento da Rigidez.....	50
6.3. Resultados e Discussões .....	54
6.3.1. Sistema não-otimizado .....	54
6.3.2. Sistema otimizado .....	58
7 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	63
7.1. Conclusões Gerais.....	63
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	65
Referências Bibliográficas.....	66
Apêndice A - Cálculo da força em um MM .....	71
Apêndice B - Código para simulação do EDB .....	73

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Fig. 2. 1. Diagrama de um sistema ativo e passivo, f. 7
- Fig. 2. 2. Composição das forças e correntes em um mancal magnético ativo, f. 8
- Fig. 2. 3. Composição de um sistema mancal magnético ativo, f. 9
- Fig. 2. 4. Estator de um mancal supercondutor, f. **Erro! Indicador não definido.**
- Fig. 3. 1. Força de Lorentz em um cabo condutor imerso em campo constante, f. 15
- Fig. 3. 2. Bobina levitada sobre uma placa condutora e sua respectiva bobina refletida, f. 16
- Fig. 3. 3. Força de levitação e de arraste analítica, f. 18
- Fig. 3. 4. Forças analíticas como função da corrente na bobina, f. 19
- Fig. 3. 5. Forças analíticas como função do entreferro, f. 19
- Fig. 3. 6. Forças analíticas como função da espessura do condutor, f. 20
- Fig. 3. 7. Forças analíticas como função do material do condutor, f. 20
- Fig. 5. 1. Ímã em anel com polarização (a) radial e (b) axial com concentradores de fluxo, f. 37
- Fig. 5. 2. Fluxo magnético em função da posição radial no EDB, f. 38
- Fig. 5. 3. Operação do EDB em modo descentralizado, f. 38
- Fig. 5. 4. Variação do fluxo magnético para uma excentricidade constante, f. 39
- Fig. 5. 5. Mapeamento de um ímã permanente em anel com polarização axial, f. 40
- Fig. 5. 6. Componentes da força em um EDB devido à excentricidade, f. 41
- Fig. 5. 7. Força resultante em um EDB com rotor descentralizado, f. 41
- Fig. 5. 8. Força resultante em um EDB com velocidade radial, f. 42
- Fig. 6. 1. Modelo computacional do EDB em três dimensões com corte, f. 46
- Fig. 6. 2. Vista isométrica da malha hexagonal do EDB com três ímãs, f. 48
- Fig. 6. 3. Vista superior da malha hexagonal do EDB com três ímãs, f. 49
- Fig. 6. 4. Esquemático do teste experimental do EDB, f. 51
- Fig. 6. 5. Bancada experimental, f. 52
- Fig. 6. 6. (a) Rotor e (b) estator do mancal eletrodinâmico, f. 53
- Fig. 6. 7. Alinhamento do mancal, f. 53
- Fig. 6. 8. Força colinear no EDB com a excentricidade, f. 55
- Fig. 6. 9. Força ortogonal no EDB com a excentricidade, f. 55

- Fig. 6. 10. Forças no EDB em função da rotação para uma excentricidade de 1 mm, f. 56
- Fig. 6. 11. Perdas no EDB, f. 57
- Fig. 6. 12. Força colinear no EDB em função da velocidade radial, f. 57
- Fig. 6. 13. Força ortogonal no EDB em função da velocidade radial, f. 58
- Fig. 6. 14. Estator do mancal eletrodinâmico em corte, f. 59
- Fig. 6. 15. Força colinear à direção de deslocamento para diferentes larguras do concentrador de fluxo com excentricidade de 1,5 mm, f. 59
- Fig. 6. 16. Força ortogonal à direção de deslocamento para diferentes larguras do concentrador de fluxo com excentricidade de 1,5 mm, f. 60
- Fig. 6. 18. Força colinear à direção de deslocamento para diferentes larguras do rotor para uma excentricidade de 0,5 mm, f. 61
- Fig. 6. 19. Força ortogonal à direção de deslocamento para diferentes larguras do rotor para uma excentricidade de 0,5 mm, f. 61
- Fig. 6. 20. Rigidez do EDB para um EDB otimizado (concentrador de fluxo com largura de 6 mm e largura do rotor de 9 mm) e não-otimizado, f. 62
- Fig. A. 1. Eletroímã simplificado, f. 71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1 – Parâmetros da bancada de testes do ímã e disco, f. 24

Tabela 6. 1 – Parâmetros do EDB, f. 50

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ex.	exemplo
e.g.	por exemplo
eq.	equação
fig.	Figura
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
A/D	Analógico/Digital
CNC	Comando Numérico Computadorizado
D/A	Digital/Analógico
EDB	Mancal Eletrodinâmico, do inglês, <i>Electrodynamic Bearing</i>
EDL	Levitação Eletrodinâmica, do inglês, <i>Electrodynamic Levitation</i>
EML	Levitação Eletromagnética, do inglês, <i>Electromagnetic Levitation</i>
FC	Resfriamento sob Campo, do inglês, <i>Field Cooling</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LABMAQ	Laboratório de Máquinas Elétricas
LASUP	Laboratório de Aplicações de Supercondutores
MEF	Método dos Elementos Finitos
MM	Mancal Magnético
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
PCI	Conector de Componentes Periféricos, do inglês, <i>Peripheral Component Interconnect</i>

SML Levitação Magnética Supercondutora, do inglês, *Superconductor  
Magnetic Levitation*

ZFC Resfriamento em Campo Nulo, do inglês, *Zero Field Cooling*

# Capítulo 1

## Introdução

Um antigo sonho dos seres humanos seria obter a capacidade de levitar ou mesmo aplicá-la a outros objetos, fato este comprovado pelo famoso truque de mágica sempre presente no repertório dos circos. Porém, mais do que somente um fato inusitado, não presente no dia-a-dia, a levitação possui benefícios para o setor de engenharia. Por isso, diversas técnicas de levitação já foram e têm sido propostas ao longo dos anos. Em suma, uma das grandes vantagens encontrada com a levitação é a redução considerável das perdas por atrito de um corpo em movimento comparativamente a um sistema não suspenso. Em outras palavras, a levitação é uma fabulosa proposta para sistemas que sofrem deslocamento. Como tudo na vida não possui apenas vantagens, sistemas de levitação não fogem à regra. Seus problemas práticos envolvem principalmente os custos financeiros e a faixa de operação tecnicamente viável. Em contrapartida, diversos estudos se pautam nestas técnicas com o objetivo de aperfeiçoá-las e, assim, garantir seu uso em sistemas como trens e, inclusive, mancais magnéticos (HE, 1994; SCHWEITZER, 2009).

Na década de 1970, iniciou-se a tentativa de desenvolvimento das técnicas de levitação magnéticas. São elas: a levitação eletrodinâmica (EDL), eletromagnética (EML) e a supercondutora (SML/SQL).

A levitação eletrodinâmica é baseada na Lei de Faraday e ocorre quando há corrente em meio a um campo magnético variante no tempo. Neste caso, a variação de campo se faz por dois motivos: ou pelo deslocamento físico do condutor em relação a um campo constante ou pela variação do campo observada pelo condutor estático. Esta última ocorre quando o campo é gerado por um eletroímã alimentado por corrente alternada, por exemplo. Em suma, o fato que deve ser destacado é que na levitação eletrodinâmica existem duas componentes de força,



sendo uma repulsiva e outra de arraste e ambas ocorrem de maneira a evitar variação de campo magnético. Usando esse princípio, podem ser construídos os trens de levitação (MagLev) eletrodinâmicos onde, a partir de determinada velocidade, as rodas perdem o contato com os trilhos, como é o caso da linha de teste em Yamanashi JR-MagLev (HE, 1994). Esta levitação é passiva e nela são necessários basicamente uma fonte de campo magnético e algum material condutor no qual serão induzidas correntes, também conhecidas como correntes de Foucault. Em geral, o material empregado é o alumínio ou o cobre.

Já a levitação eletromagnética é proposta através do controle da força de atração de um eletroímã sobre um material ferromagnético. A corrente ou tensão deste equipamento é controlada e, assim, o sistema permanece equilibrado sob determinado ponto de operação. Sua vantagem está presente no controle ativo do sistema e na grande força gerada. Com isso, distúrbios podem ser rejeitados sem grandes problemas. Porém, sua desvantagem está presente na necessidade do uso de fontes de alimentação e chaves eletrônicas de potência as quais podem implicar na disponibilidade e confiabilidade do sistema de levitação (RODRIGUEZ et al., 2005).

Na levitação supercondutora, são utilizados ímãs permanentes e supercondutores. O campo gerado pelos ímãs gera vórtices de fluxo no supercondutor, caracterizando seu estado misto, obtido em supercondutores do tipo II. A intensidade do campo externo está relacionada com o número de vórtices no supercondutor, que são responsáveis pela amplitude da força de interação entre os referidos corpos. O principal desafio da levitação supercondutora é a operação limitada dentre valores de campo, corrente e temperatura, sendo esta última geralmente controlada com o uso de nitrogênio líquido e um ambiente criostático. No entanto, sua vantagem é observada no fato de haver tanto uma força de repulsão quanto de atração, o que permite ao sistema a estabilidade passiva. No próximo capítulo serão apresentados maiores detalhes sobre as técnicas de levitação.

## **1.1. Motivação do Trabalho**

Até a presente data, haviam sido testadas no Laboratório de Máquinas Elétricas (LABMAQ) e no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) as técnicas de levitação eletromagnética (GOMES, 2007; KAUSS, 2008; RODRIGUEZ, 2013) e supercondutora (SOTELO, 2007; MOTTA, 2011; SASS, 2011). Entretanto, restava obter conhecimento sobre a levitação eletrodinâmica. Portanto, este trabalho foi constituído justamente com o objetivo de

eliminar esta carência. Além disso, a dificuldade no projeto e construção de sistemas eletromagnéticos ativos também motiva o desenvolvimento de um sistema de levitação eletrodinâmico passivo, o qual será explorado neste trabalho.

## **1.2. Objetivo do Trabalho**

Este trabalho possui como objetivo o levantamento do perfil das forças eletrodinâmicas e sua dependência com diferentes parâmetros. A partir daí será mostrado o desenvolvimento de um mancal passivo e seu desempenho.

Enfim, este trabalho visa gerar conhecimento à respeito da levitação eletrodinâmica de maneira didática, assim como apresentar a metodologia de projeto de mancais magnéticos cujo princípio de funcionamento seja baseado na técnica de levitação em questão.

## **1.3. Organização do Trabalho**

No Capítulo 2, será apresentada uma breve revisão teórica sobre os mancais magnéticos. Serão apresentados os tipos de mancais existentes e suas respectivas características.

No Capítulo 3, será descrito o princípio de funcionamento da levitação eletrodinâmica, que é o princípio físico básico do mancal eletrodinâmico, objeto deste estudo.

No Capítulo 4, será demonstrado um caso simples de levitação eletrodinâmica para iniciação do leitor no tema. Através de simulações computacionais e experimentos que empregam um ímã e um disco condutor, serão obtidas curvas que elucidam o comportamento do processo físico em pauta.

No Capítulo 5, serão mostradas as características de um mancal eletrodinâmico radial, o comportamento mecânico e a metodologia indicada para a simulação computacional. Este capítulo serve de base para o projeto a ser apresentado no próximo capítulo.

No Capítulo 6, será apresentado um mancal eletrodinâmico, projetado com o conhecimento adquirido nos capítulos anteriores, e seus respectivos resultados. Além do detalhamento da bancada experimental do mancal eletrodinâmico, serão descritas as

considerações sobre o modelo computacional adotado. Os resultados das simulações e experimentos serão detalhados no mesmo capítulo.

No Capítulo 7, serão apresentadas as conclusões e comentários sobre o trabalho. Além disso, serão listadas as sugestões para a continuidade deste trabalho.

# Capítulo 2

## Mancais Magnéticos

Em geral, as máquinas elétricas fazem uso de mancais mecânicos convencionais como mancais de elementos rolantes (no caso de motores de baixa potência) ou mancais hidrostáticos a óleo (no caso de máquinas de alta potência). Porém, algumas aplicações requerem o uso de mancais alternativos, como é o caso de sistemas de alto vácuo, com atmosfera explosiva, de elevada rotação ou com controle de vibrações (SCHWEITZER, 2009), por exemplo. Para tais aplicações, pode-se pensar no emprego de mancais baseados em levitação, como a eletromagnética. Esta última tem sido desenvolvida tanto academicamente quanto industrialmente devido às necessidades citadas anteriormente e outras.

Os mancais magnéticos podem ser tanto do tipo axial quanto radial. No entanto, um mancal magnético constituído com determinada tecnologia, por exemplo, com o emprego de supercondutores, pode ser mais adequado ao uso como mancais axiais do que o contrário (HULL, 2000).

Neste capítulo 2 serão apresentadas algumas das técnicas de levitação aplicadas a mancais, sendo no capítulo 3 apresentada especificamente a técnica eletrodinâmica, tema deste trabalho.

### 2.1. Ativos, Passivos e Híbridos

Sistemas eletromecânicos, como é o caso do mancal magnético, podem ser projetados para operarem através de diversas técnicas. Com isso, podem ser encontrados sistemas ativos, passivos ou híbridos. No primeiro caso, há a necessidade de uma malha de controle, com

sensores, reguladores e atuadores. Portanto, no sistema ativo, a vantagem se observa no domínio da dinâmica do sistema, com possibilidade de rejeitar perturbações, rastrear valores de referência e impor transitórios. Todavia, seu emprego geralmente está associado ao uso fontes de alimentação e outros componentes para o funcionamento do controlador, por exemplo, quando é implementado por meio de uma eletrônica embarcada. Neste caso, o sistema de controle é constituído por chaves eletrônicas, circuitos integrados, componentes elétricos etc. Por este motivo, este deve possuir maior volume, devendo sua aplicação ser avaliada em casos específicos, por exemplo, quando houver dificuldade ou restrição de fontes de alimentação, necessidade de maior confiabilidade etc. Outro fato importante a ser destacado é o custo de produção de um sistema ativo, que também deve ser analisado em relação a um sistema passivo.

Já o sistema passivo é autocontrolado. Ele emprega o comportamento físico natural determinado ao sistema via projeto, gerando estabilidade e o desempenho desejado, como é o caso do já citado trem de levitação Yamanashi JR-MagLev, que utiliza bobinas em forma de “oito” para gerar as forças necessárias para o posicionamento vertical e lateral da composição. Conforme este exemplo ilustra, sistemas passivos são geralmente mais simples que os ativos. Sua maior dificuldade é observada e.g. no desenvolvimento da geometria, isto é, na usinagem do produto para que o sistema desenvolvido tenha um comportamento mais próximo ao esperado. Sendo assim, é possível em muitos casos desenvolver um sistema de baixo custo e de grande confiabilidade, devido tanto ao menor número de componentes demandados quanto ao menor número de sistemas encadeados, como alimentação elétrica, dispositivos eletrônicos e programa de controle.

Os sistemas híbridos são uma alternativa a quem necessita de maior controle do sistema, mas ao mesmo tempo não deseja grande investimento em aparelhagem para o desenvolvimento do controle ou necessita reduzir o volume do sistema mancal. Com a proposta híbrida, a parcela do sistema que é passiva pode contribuir com a maior parte da demanda de potência necessária ao controle, enquanto a parcela ativa representaria a menor participação. Sendo assim, consegue-se um desempenho satisfatório com baixo custo. Na Figura 2. 1 é mostrado um pequeno diagrama comparativo entre o sistema ativo e passivo.

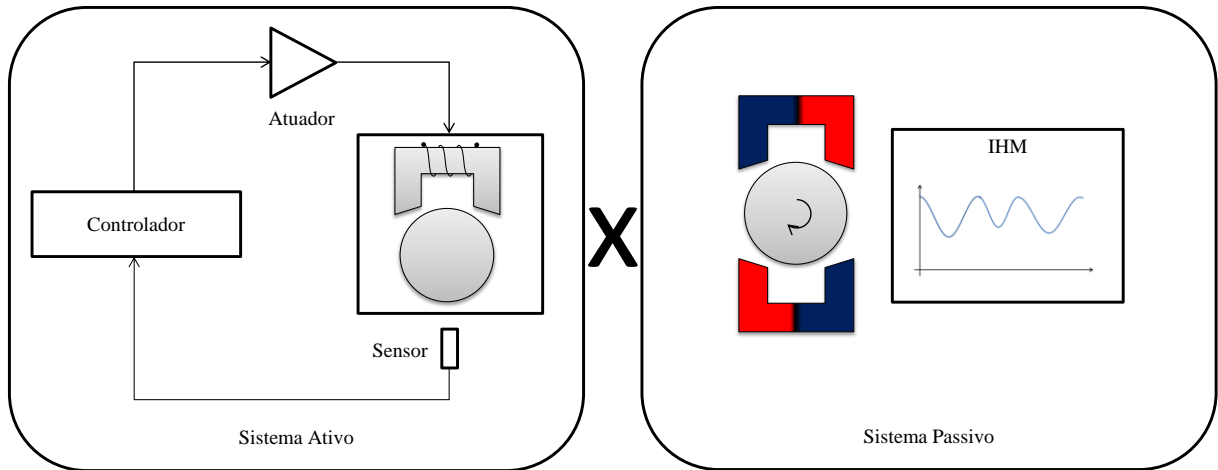


Figura 2. 1: Diagrama dos sistemas ativo e passivo.

## 2.2. Mancais Magnéticos com Eletroímãs (Ativos)

Este tipo de Mancais Magnético (MM) é considerado ativo e baseado no princípio da força magnética, força de atração obtida entre um eletroímã e um corpo ferromagnético próximos quando da injeção de corrente em tal eletroímã. Sua intensidade é dependente das variáveis corrente e entreferro, conforme mostra a Equação 2.1 (SCHWEITZER, 2009) a seguir.

$$F_{mag} = k \left( \frac{i}{h} \right)^2, \quad (2.1)$$

onde  $F_{mag}$  é a força magnética,  $k$  é uma constante,  $i$  é a corrente que circula na bobina do eletroímã e  $h$  é a distância do entreferro.

Conforme pode-se notar na Equação 2.1, a força magnética é uma função não-linear e, por isso, muitas das vezes é linearizada na modelagem matemática para determinação de seus parâmetros de controle, admitindo-se pequenas variações em torno do ponto de operação. Após a linearização, a força vertical exercida por um eletroímã se apresenta da seguinte forma:

$$F = mg + k_i \Delta i + k_h \Delta h, \quad (2.2)$$

onde  $m$  é a massa do objeto suspenso,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $k_i = k \left( \frac{2i_0}{h_0^2} \right)$  e

$$k_h = k \left( \frac{2i_0^2}{h_0^3} \right).$$

Na Figura 2. 2, pode-se observar um sistema mancal magnético completo, onde cada eletroímã gera uma força que atua em um eixo. Neste caso, um par de eletroímãs controla a força no eixo x enquanto o outro par trabalha com o posicionamento no eixo y. Seguindo neste pensamento, pode-se retratar o controle descentralizado, no qual a força na direção x é controlada de maneira independente da força na direção y, pois, neste caso, não há presença do Efeito Giroscópico, efeito que é função principalmente da velocidade de rotação e inércia do rotor. Já em um sistema rotativo, principalmente com elevada velocidade ou elevada inércia, tal efeito deve ter maior relevância sobre o sistema e, por isso, o projeto deve prever uma modelagem de forma centralizada (LOPES, 2010). Desta maneira, as forças x e y são interdependentes e o sistema de controle deve considerar o acoplamento entre as componentes de força. Portanto, sistemas com altas rotações são, em geral, mais complexos do que sistemas que operam em baixa rotação.

Uma característica apresentada na Figura 2. 2 é a operação do mancal radial no modo diferencial. Com esta configuração, é possível controlar apenas uma variável de corrente ( $i_{ctrl}$ ) para o posicionamento de cada eixo (RODRIGUES, 2005). Já a componente  $i_{lev}$  deve compensar o peso do rotor quando o eixo for horizontal e o mancal radial, por exemplo.

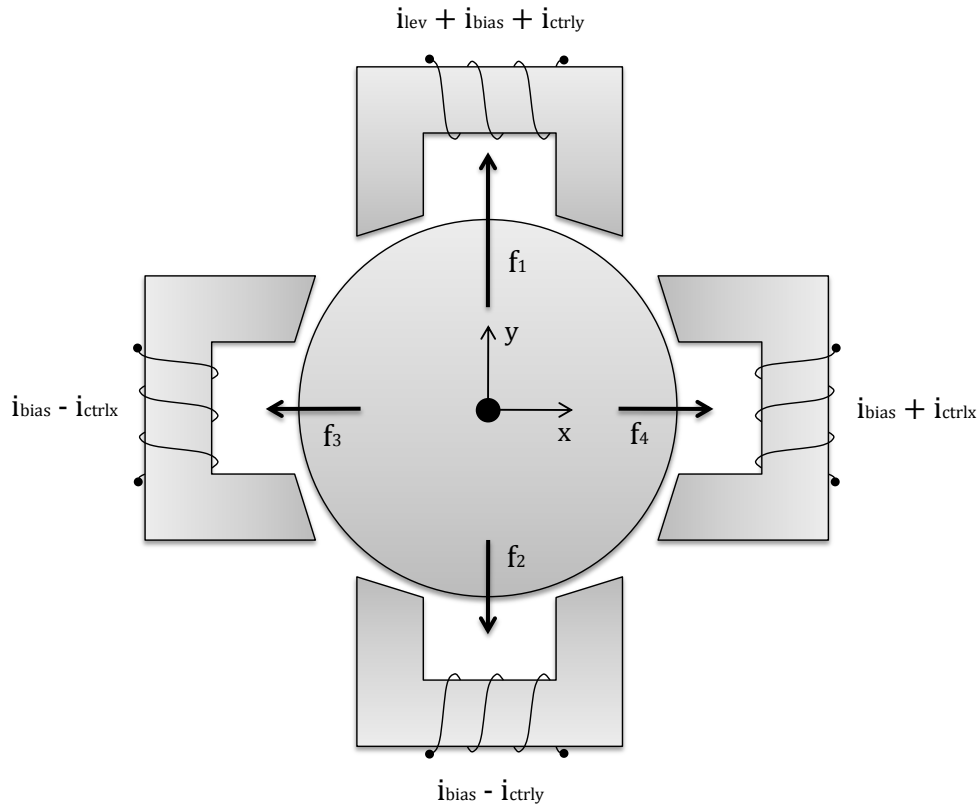


Figura 2. 2: Composição das forças e correntes em um mancal magnético radial ativo.

A grande vantagem do mancal magnético descrito anteriormente é notada na magnitude de sua força, que é função da densidade de campo magnético no entreferro. Por exemplo, um eletroímã com 1 cm<sup>2</sup> de área e 1 mm de entreferro, poderia gerar aproximadamente 0,31 N de força de atração quando alimentado com uma corrente de 100 Ae, ou seja, 1 ampère através de uma bobina com 100 espiras. Se o número de espiras fosse elevado para 1.000 e as demais condições fossem mantidas, a força seria de 31,42 N, conforme demonstrado no Apêndice A. É importante destacar que o exemplo acima foi escolhido de forma que não houvesse saturação do material ferromagnético.

No item comparativo, entre sistemas ativos, passivos e híbridos foram mencionadas as desvantagens do sistema ativo. Dentre elas, a quantidade de equipamentos envolvidos na construção do mancal que pode ser verificada através da Figura 2. 3. É importante destacar que alguns sistemas podem ser melhorados de forma a ser reduzido o número de sensores necessários para o controle (RODRIGUEZ, 2006). Outra simplificação encontra-se no motor-mancal (DAVID, 2000; RODRIGUEZ, 2010), cujos enrolamentos do estator do motor são projetados para gerar torque e sustentação do rotor da máquina.

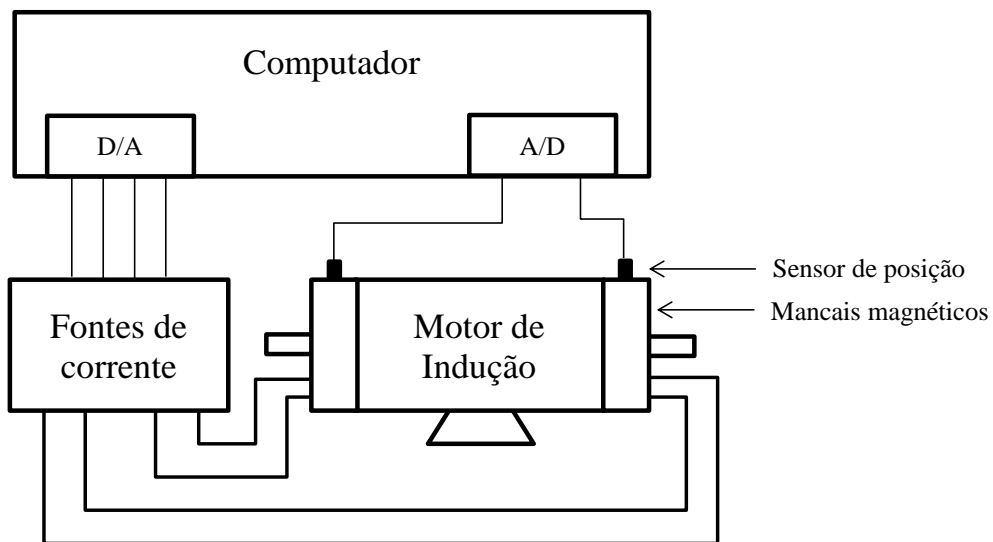


Figura 2. 3: Composição de um sistema mancal magnético ativo.



### **2.3. Mancais Magnéticos de Ímãs Permanentes (Passivos)**

Quando não é necessário o controle da dinâmica do sistema de levitação, o mancal magnético passivo pode ser adotado. Portanto, neste caso se faz uso somente de ímãs permanentes dispostos no rotor e no estator de maneira que haja repulsão entre eles. O problema encontrado nesta técnica é a instabilidade estática, conforme aponta o Teorema de Earnshaw (EARNSHAW, 1942). Conforme expõe o teorema, um sistema completamente suspenso, ou seja, sem contato mecânico, que possui levitação passiva, não é estável quando estático.

É importante destacar que os ímãs permanentes podem ser empregados na construção de outros tipos de mancal. Ou seja, mancais magnéticos com outras técnicas de levitação. São elas: a levitação eletrodinâmica, que utiliza ímãs permanentes em conjunto com um material condutor (e.g. cobre ou alumínio) e a levitação supercondutora, na qual são empregados ímãs permanentes no rotor e algum material supercondutor no estator. Uma das vantagens desta última é a baixa força de arraste (*drag force*) já que, no caso da levitação eletrodinâmica, pode ser maior.

### **2.4. Mancais Magnéticos Supercondutores (Ativos ou Passivos)**

Os mancais supercondutores são constituídos basicamente por elementos supercondutores em seu respectivo ambiente criostático e ímãs permanentes. Por esse motivo, se trabalha na otimização do material supercondutor e da configuração dos ímãs, no caso de um mancal passivo. Assim, se consegue elevar a densidade de força. Outro desafio se pauta na fabricação do próprio recipiente criostático responsável pela manutenção da temperatura dos supercondutores localizados no estator. Neste aspecto, pode-se dizer que a temperatura influencia a rigidez do mancal e, portanto, o seu desempenho. Além dela, outros fatores têm influência na força. São eles: a textura, a orientação dos grãos, a densidade de corrente do supercondutor e, é claro, o material utilizado; assim como a geometria (topologia e entreferro) e a condição (temperatura e magnetização) dos ímãs, (HULL, 2000) e o gradiente de temperatura. Este último ocorre pelo fato de se utilizar supercondutores maciços e, por isso, o refrigerante nitrogênio líquido só entra em contato com a superfície, causando variação de temperatura em relação à parte interior. Na literatura, considera-se ainda a influência das vibrações na rigidez do sistema mancal. Em suma, são consideradas duas regiões

características. A primeira, que se aplica a vibrações com amplitudes que em geral não ultrapassam um milímetro, é tratada como regime elástico. Nela a rigidez é considerada constante e a distorção das linhas de fluxo é a responsável pela força de restauração linear. A segunda região, apresenta um regime histerético, quando se aplicam maiores amplitudes de vibrações e as linhas de fluxo trocam de centro de aprisionamento, caracterizando uma força não-linear. Em relação à frequência da vibração, não é notada uma forte influência para um sistema de suspensão. Portanto, o projeto do mancal deve levar em consideração vibrações impostas pela carga e as outras consequentes do próprio sistema mancal, que pode apresentar vibrações devido à inclinação somada à rotação, por exemplo. Com isso, podem aparecer frequências de ressonância, as quais devem ser evitadas por prejudicarem o comportamento do sistema, observado pela redução da força de sustentação (HULL, 2000) e elevação das oscilações, que podem ocasionar inclusive choques do rotor contra o estator.

O campo magnético aplicado no supercondutor no momento do resfriamento terá influência sobre a força magnética. Se o HTS (do inglês, *High Temperature Superconductor*, ou seja, supercondutor de alta temperatura) for resfriado na ausência de campo (ZFC, do inglês, *Zero Field Cooling*), a força de levitação terá maior magnitude do que quando o resfriamento ocorrer na presença de campo (FC, do inglês, *Field Cooling*). Todavia, não há estabilidade lateral no ZFC (WERFEL, 2005). Apesar de gerar uma força de levitação menor, o FC muitas das vezes é adotado por gerar forças de atração, além da repulsão e, ainda, possuir maior estabilidade lateral (HULL, 2000). Para fins de projeto, também podem ser realizados cálculos da força de levitação considerando o supercondutor como um material de diamagnetismo perfeito. Assim é sabida a pressão teórica máxima a qual o sistema deverá impor de maneira relativamente simples, podendo ser calculada pelo método dos elementos finitos. Para isso, o cálculo pode ser feito a partir do método do espelhamento, onde um ímã virtual igual é posicionado ao dobro da distância do entreferro em relação ao ímã real, de forma que haja repulsão entre ambos.

Especificamente, os mancais supercondutores são geralmente mais aplicados para proporcionar sustentação axial ao invés da radial. Todavia, (WERFEL, 2005) apresenta um supercondutor aplicado a um mancal magnético radial.

Logo, os mancais supercondutores podem ser passivos quando são construídos com ímãs permanentes e supercondutores (SOTELO, 2007), ou podem ser ativos. Neste caso, o campo é gerado por bobinas supercondutoras, por exemplo, onde a intensidade da corrente pode ser controlada (SASS, 2011).

## 2.5. Mancais Eletrodinâmicos

Devido ao fato deste tipo de mancal ser o principal objeto de estudo deste trabalho, sua descrição será brevemente postergada para o próximo capítulo para que haja um maior detalhamento sobre o seu princípio de funcionamento e aplicações. Todavia, será apresentado aqui um resumo da evolução do tema.

Em 1992, (KRIEZIS, 1992) realizou o desenvolvimento matemático para determinação das correntes induzidas para diversas geometrias. Alguns anos depois, em 2000, foi apresentado outro artigo com a demonstração de um simples caso de levitação eletrodinâmica (THOMPSON, 2000), realizada através de uma bobina com alimentação CA.

Dentre as aplicações, podem ser citados, por exemplo, o projeto de um armazenador cinético de energia, também conhecido como *flywheel* (FILATOV, 2006) e o mancal eletrodinâmico amortecedor (MAY, 2009). As últimas contribuições observadas foram realizadas por Lembke e Fabrizio, onde o primeiro realizou testes com mancais magnéticos radiais (LEMBKE, 2005) e o segundo testou tanto MMs radiais quanto axiais (FABRIZIO, 2010).

## Capítulo 3

# Levitação Eletrodinâmica

Esta técnica de levitação é conhecida por muitos por conta dos parques de diversões. Quem nunca viu ou ouviu falar no brinquedo que simula a queda livre? Pois neste equipamento é utilizada a indução magnética na frenagem, o mesmo princípio físico adotado para exercício da levitação eletrodinâmica. Outro exemplo bastante comum é o motor de indução, classe de motores mais difundida no mundo e que é aplicada tanto na indústria quanto em residências. Ou seja, o mesmo princípio adotado na levitação eletrodinâmica é também explorado nos motores de indução, no freio magnético, assim como no próprio Mancal Eletrodinâmico (EDB), além de outras (KRIEZIS, 1992). Entretanto, no primeiro caso, a indução se deve a um campo variante no tempo enquanto, nos demais casos, o campo é constante e a indução se deve ao movimento do condutor. O mais interessante é que todas as aplicações citadas são pautadas em leis físicas clássicas e, por este motivo, com bastante subsídio para realização de projeto e análise de modelos de levitação.

### 3.1. Princípio de Funcionamento

A levitação eletrodinâmica, descrita a partir da Lei de Faraday, é caracterizada como uma levitação repulsiva, já que a força obtida nesta técnica tende a distanciar o corpo condutor da fonte de campo magnético. Esta força se deve à presença de campo magnético gerado, por exemplo, por um ímã permanente em movimento, e a circulação de correntes induzidas em um condutor, quando então são chamadas de “correntes parasitas” (*eddy currents*).

A indução de correntes pode ser desenvolvida de duas maneiras: ou através da variação no tempo do campo magnético sobre uma espira condutora estática ou por meio do

deslocamento desta espira em uma região com campo estático. Em ambos os casos, de acordo com a Lei de Lenz, a corrente é induzida de forma a gerar um campo magnético contrário à variação do que a originou. A seguir serão apresentadas as equações que descrevem o referido fenômeno.

De acordo com a Lei de Ampère, representada na Equação 3.1 a seguir, a relação entre campo magnético e corrente para baixas frequências (desprezando o efeito da corrente de deslocamento) é expressa como:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (3.1)$$

onde  $\vec{H}$  representa a intensidade do campo magnético em A/m e  $\vec{J}$ , a densidade de corrente em A/m<sup>2</sup>.

Sabe-se também que a tensão induzida ( $V$ ) em um condutor, quando está imerso em um meio com variação de fluxo magnético ( $\varphi$ ), é dada pela seguinte relação:

$$V = -\frac{\partial \lambda}{\partial t} \cong -N \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (3.2)$$

onde  $\lambda$  é o fluxo concatenado e  $N$  é o número de espiras.

A mesma lei de Faraday pode ser expressa na forma diferencial como:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.3)$$

onde  $\vec{E}$  representa a intensidade do campo elétrico em V/m e  $\vec{B}$ , a densidade de fluxo magnético em T.

Outra relação complementar às Equações de Maxwell é a lei de Ohm, que relaciona o campo elétrico e a densidade de corrente, conforme apresentado abaixo.

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J}, \quad (3.4)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica em S/m.

Ao substituir a variável campo elétrico da Equação 3.4 na Equação 3.3, encontra-se a relação entre a densidade de campo magnético e a referida densidade de corrente. Com isso, é possível calcular a força magnética para determinada situação (THOMPSON, 2000).

$$\frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{J} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

De acordo com a expressão da Força de Lorentz, a densidade de força magnética,  $\vec{f}$  em N/m<sup>3</sup>, oriunda da interação entre o campo magnético e a corrente elétrica é:

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (3.6)$$

Já a força total sobre o condutor é obtida ao integrar a densidade de força sobre seu volume.

$$\vec{F} = \int \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (3.7)$$

Sendo assim é possível encontrar as componentes de força resultantes sobre um determinado condutor. Conforme já mencionado, em um sistema eletrodinâmico há campo magnético e correntes induzidas devido à variação desse em relação ao condutor.

A abordagem mais simples desta técnica de levitação pode ser ilustrada pelo caso de um condutor conduzindo uma partícula de carga  $q$ , com deslocamento linear e uma velocidade  $v$ , imersa em uma região com densidade de fluxo magnético  $B$ . O deslocamento da carga, ou seja, a corrente presente no condutor de comprimento  $L$  determina uma força  $F$  de intensidade proporcional ao produto das citadas variáveis, como mostra a Equação 3.8 e a Figura 3. 1.

$$\vec{F} \cong qL(\vec{v} \times \vec{B}) = (iL\hat{x}) \times (B\hat{y}) = (iLB)\hat{z}. \quad (3.8)$$

Na ilustração a seguir pode-se observar o exemplo indicado pela Equação 3.8 e os elementos acima citados com a representação das variáveis e suas respectivas direção e sentido.

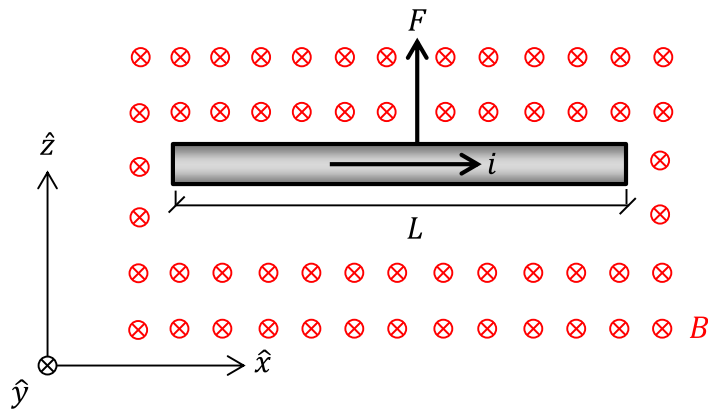


Figura 3. 1: Força de Lorentz em um cabo condutor imerso em campo constante.

### 3.2. Método das Imagens

Um método utilizado para determinação analítica das forças envolvidas em um sistema eletrodinâmico é o método do espelhamento. Conforme o próprio nome sugere, o cálculo é feito com a consideração de que existe uma bobina espelhada em relação à placa condutora. A bobina refletida gera um fluxo magnético em sentido contrário ao da bobina principal. Assim, a metodologia retrata o comportamento das linhas de campo magnético, que se comportam como se houvesse uma bobina refletida, apresentada na Figura 3. 2 como a bobina tracejada. A técnica de fato é uma boa aproximação ao comportamento das linhas de campo, já que a bobina refletida tem como papel dificultar a penetração de tais linhas através do condutor e assim gerar linhas de campo simétricas em relação à placa e ao eixo da bobina. A Figura 3. 2 ilustra o sistema em análise.

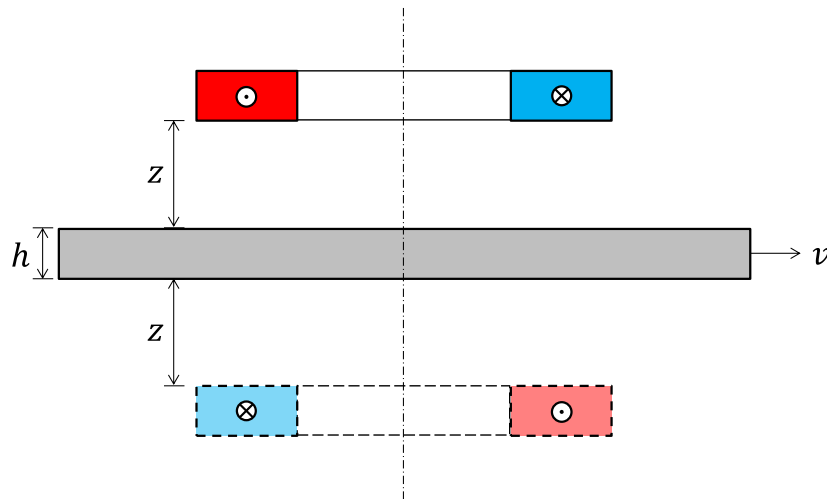


Figura 3. 2: Bobina levitada sobre uma placa condutora e sua respectiva bobina refletida.

Através do método, é possível determinar as duas componentes de força sobre a bobina. São elas: a força de levitação ( $F_{lev}$ ) e a força de arraste ( $F_{arr}$ ), que agem respectivamente na direção normal e na direção contrária ao sentido de deslocamento da placa condutora. O equacionamento destas forças não é trivial, mas sua demonstração pode ser encontrada na literatura (HRIBAR, 2008; SINHA, 1987; THOMPSON, 2000).

$$F_{lev} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi \cdot z} \left[ \frac{v^2}{v^2 + w^2} \right], \quad (3.9)$$

e

$$F_{arr} = \frac{w}{v} F_{lev}. \quad (3.10)$$

Considerando que  $w = \frac{2}{\mu_0 \sigma h}$ ,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no ar,  $I$  é a corrente que circula na bobina,  $z$  é a distância entre a bobina e a placa condutora,  $v$  é a velocidade de deslocamento do condutor,  $\sigma$  é a condutância elétrica da placa e  $h$  é a espessura da mesma.

### 3.3. Força de Levitação e de Arraste

Conforme foi apresentado no item anterior, as forças são divididas em duas componentes, onde uma contribui para a sustentação vertical e a outra é considerada a parcela frenante, pois como o próprio nome diz, atua com o objetivo de frear o objeto. Tais forças são denominadas pela literatura como força de levitação e de arraste.

Na Figura 3. 3 é apresentado um gráfico com o comportamento das forças obtidas de maneira analítica. Note que a força de arraste é superior a outra para baixas velocidades. Todavia, quando a velocidade é elevada, a força de levitação a supera. É possível observar inclusive o comportamento da força de arraste, que possui um ponto de máximo e, a partir daí, apresenta um valor assintótico a zero, conforme se percebe pela Equação 3.10. Já a força de sustentação tende a um valor constante dependente dos parâmetros associados ao sistema. Portanto, um sistema de frenagem deve ser projetado para operar em torno da região de arraste máximo. Já um sistema de levitação, deve ser projetado para operar com o mínimo de arraste possível, preferencialmente na região decrescente da curva de arraste.

A Figura 3. 3 representa o comportamento analítico baseado nas Equações 3.9 e 3.10 para os seguintes parâmetros:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  $I = 500$  A,  $z = 1$  mm,  $\sigma = 3,77 \cdot 10^7$  S/m e  $h = 10$  mm.



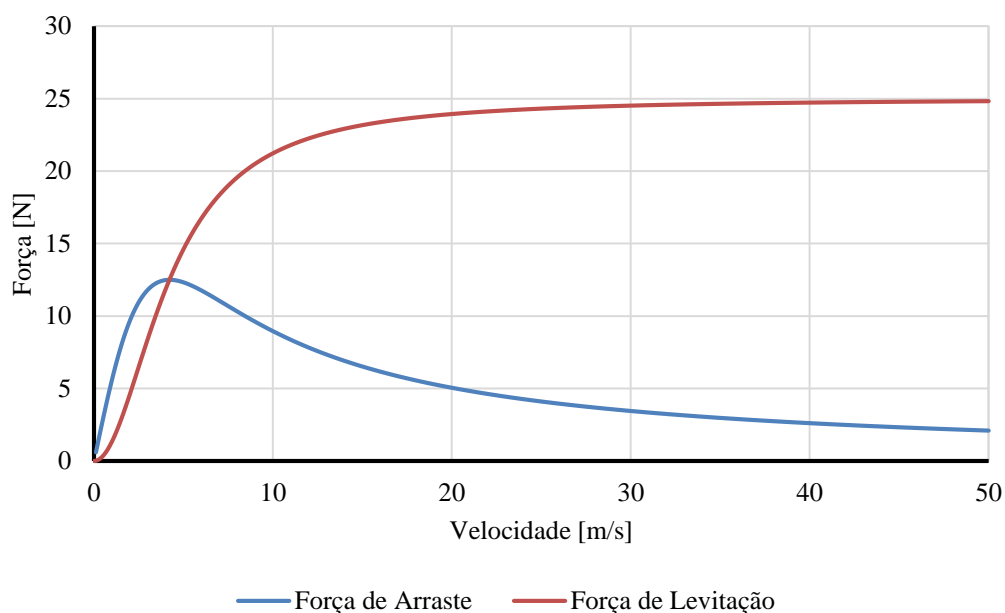


Figura 3. 3: Força de levitação e de arraste analítica.

É importante lembrar que as forças aqui citadas devem ter suas intensidades variadas de acordo com o entreferro adotado, a velocidade/frequência de deslocamento do condutor em relação à fonte de campo, a temperatura do condutor etc. Portanto, a curva mostrada anteriormente representa apenas o comportamento esperado para tais forças, ou seja, haverá sempre:

- Ausência de força para a velocidade nula;
- Uma tendência de estabilização da força de levitação a um valor constante;
- Um valor máximo de força de arraste dependente dos parâmetros do sistema; e
- Uma tendência de se anular a força de arraste para velocidades muito elevadas.

Nas figuras a seguir, é possível verificar o comportamento das curvas analíticas com a variação de cada parâmetro. Na Figura 3. 4, por exemplo, é possível observar a dependência quadrática das forças com a corrente circulante na bobina, lembrando que as Equações 3.9 e 3.10 descrevem as forças de levitação e de arraste apresentadas.

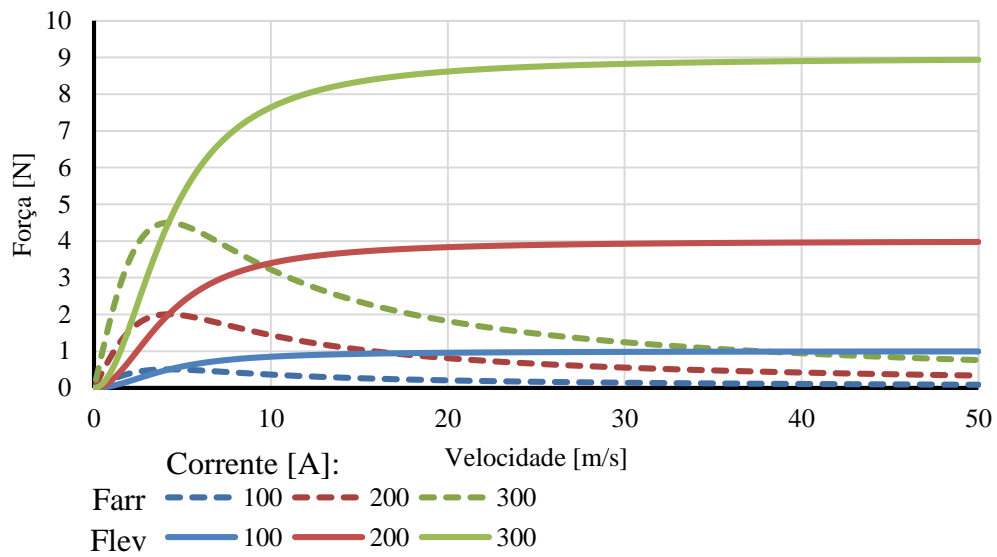


Figura 3. 4: Forças analíticas como função da corrente na bobina.

Em relação ao entreferro, as forças são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor for o entreferro, maior será a força, conforme ilustra a Figura 3. 5.

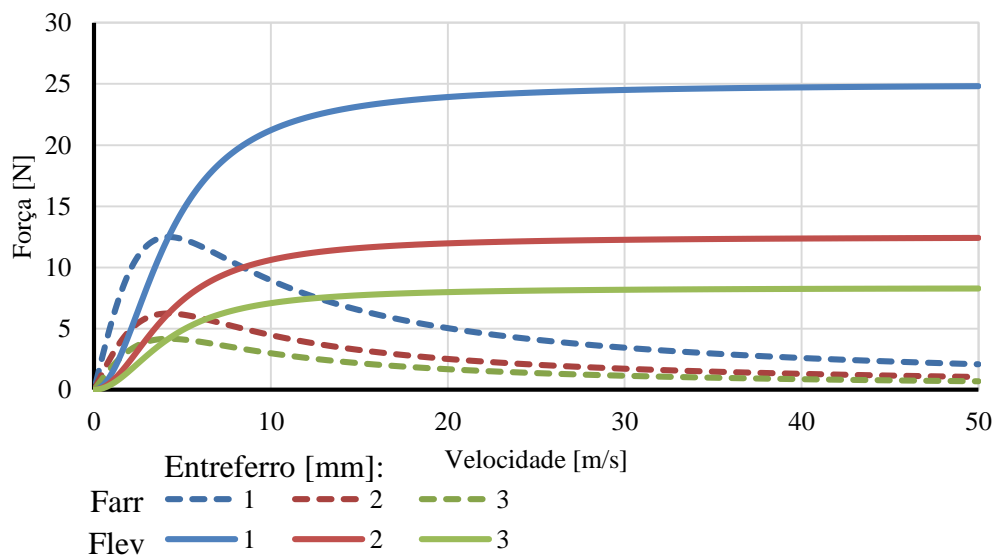


Figura 3. 5: Forças analíticas como função do entreferro.

A redução da espessura implica numa redução da taxa de crescimento da força de levitação. No entanto, esta tende ao mesmo valor independentemente da espessura adotada, conforme é possível observar na Figura 3. 6. O mesmo fato ocorre com a força de arraste, o que consequentemente desloca seu valor máximo para menores velocidades quando a espessura é incrementada. Já para elevadas velocidades, a força deve ser muito pequena.

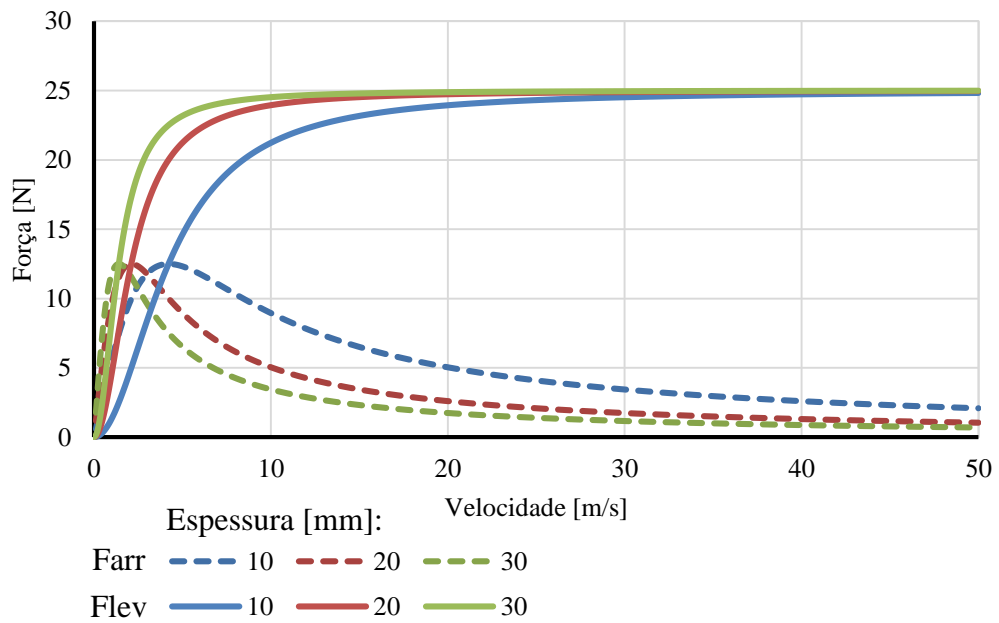


Figura 3. 6: Forças analíticas como função da espessura do condutor.

Ao analisar a variável “ $w$ ”, percebe-se que a condutância elétrica exerce o mesmo papel da espessura do condutor no comportamento das forças. Por este motivo, se observa na Figura 3. 7 uma tendência da força de levitação alcançar o mesmo valor que no caso anterior (Figura 3. 6) para elevadas velocidades. O mesmo fato procede para os valores de máximo da força de arraste.

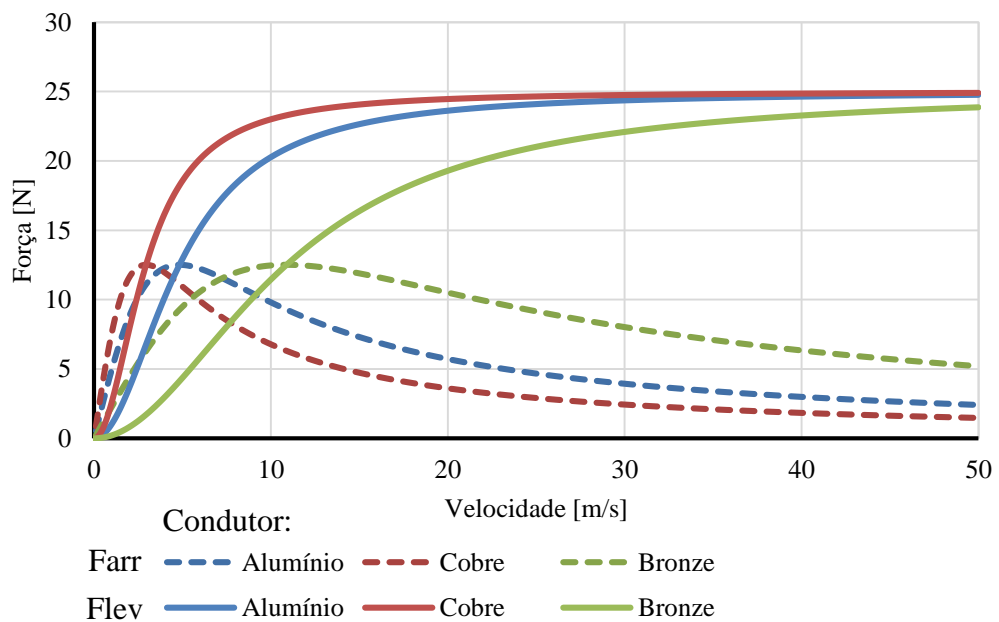


Figura 3. 7: Forças analíticas como função do material do condutor.

## Capítulo 4

# Sistema Condutor-Ímã Permanente

Com o objetivo de ilustrar o comportamento demonstrado analiticamente no capítulo anterior, foi construída uma bancada experimental, na qual a bobina apresentada no modelo foi substituída por um ímã permanente a fim de simplificar a realização dos testes. A primeira bancada de testes foi construída com o objetivo de validar as simulações computacionais usadas para modelar o problema.

### 4.1. Bancada de Testes

Através da bancada de testes foi possível realizar os ensaios das forças inerentes a um sistema de levitação eletrodinâmica. Os testes foram realizados com o uso dos seguintes aparatos: discos de alumínio, na função de condutor elétrico que se desloca; um ímã permanente de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) N35 ( $H_c = -861$  kA/m e  $B_r = 1,18$  T), no papel de fonte de campo magnético; um suporte de G10 para o ímã permanente; além da célula de carga bidirecional (fundo de escala de 5 kgf) para aferição das forças. Para se obter o movimento relativo entre o condutor e o ímã, necessária para o levantamento das forças, foi utilizado um servomotor, conforme ilustra a Figura 4. 1.

De acordo com o exposto no capítulo anterior, as forças de levitação e de arraste devem, no primeiro momento, aumentar à medida que a velocidade é incrementada. Dentro deste contexto, o motor utilizado na primeira bancada de testes permitia a observação do citado comportamento. Todavia, não era suficiente para que se atingisse a região em que a força de arraste apresenta seu valor máximo, conforme exemplificado na curva analítica

presente na Figura 3. 3 para uma velocidade de aproximadamente quatro metros por segundo. Além disso, o apoio construído para o ímã permanente não era rígido o suficiente para a manutenção da posição do entreferro ao longo dos experimentos. Por conta das limitações observadas, a bancada teve de ser modificada.

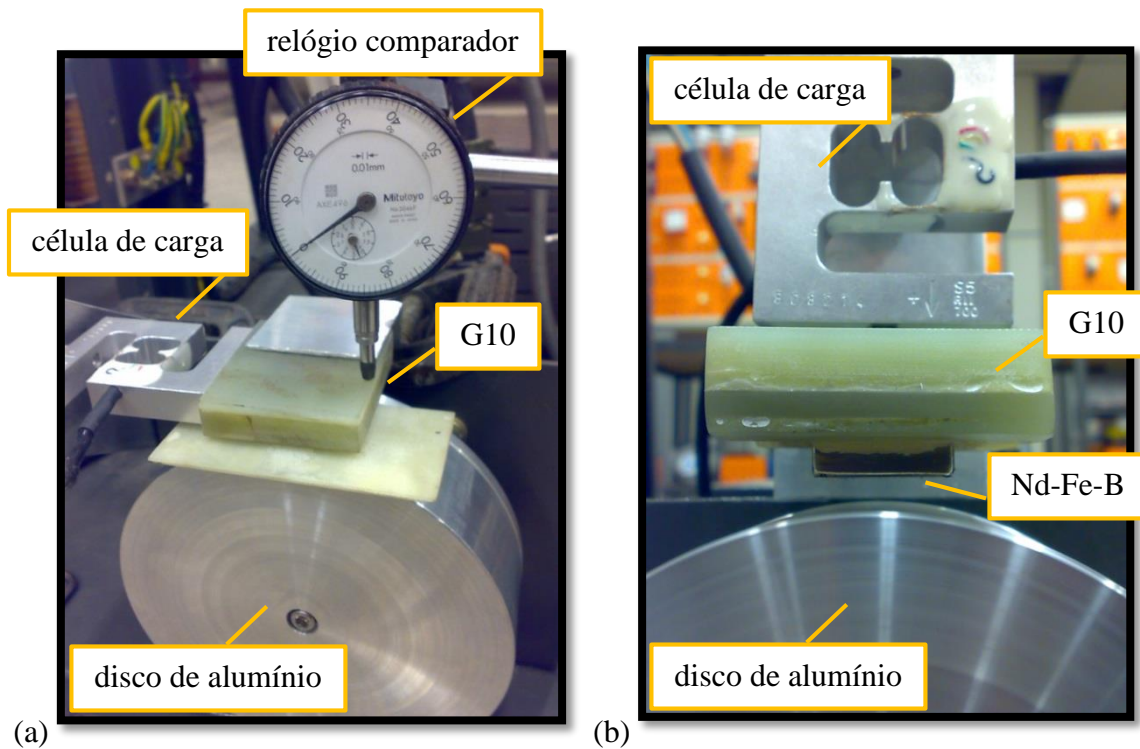


Figura 4. 1: Primeira bancada de testes para medida da força (a) de arraste e (b) de levitação.

Após experiência adquirida na construção da primeira bancada de testes, foram realizadas melhorias para implementar um novo sistema. A nova bancada foi reforçada mecanicamente através do uso de grampos C e materiais mais espessos. Em relação ao motor, desta vez foi adotado um motor de indução de dois polos com velocidade nominal de 3.500 rpm. No entanto, foi alcançada uma velocidade máxima de 4.700 rpm durante os experimentos através do uso de um inversor de frequência. Para evitar danos aos rolamentos e bobinas do motor, o mesmo foi submetido a velocidades superiores à nominal somente por um breve momento. Ademais, havia a necessidade de realização rápida dos testes para evitar o aquecimento do disco de alumínio, o que poderia influenciar nos resultados obtidos, pois alteraria o valor da resistividade do alumínio, que não poderia ser previsto com precisão no

modelo usado para a simulação. O aquecimento do condutor tem origem nas correntes induzidas no disco de alumínio que, por possuir determinada resistividade, conseqüentemente sofre aquecimento por efeito Joule. Com o aquecimento a resistividade do material aumenta e, com isso, é observada uma redução na amplitude da corrente induzida. Dessa forma, há uma redução das forças no sistema. Durante a operação, a temperatura do material condutor tenderá a se estabilizar em um valor, que dependerá da velocidade e das trocas térmicas do sistema.

Na Figura 4. 2 é possível observar a segunda bancada com os diferentes tarugos adotados. Cada um deles foi usinado com determinada espessura para que fosse observada a relação entre espessura e as forças. Portanto, foram obtidos tarugos com espessuras de 5 mm, 10 mm e um com a forma maciça. Neste último caso, o objetivo foi verificar se realmente existia um ponto de saturação da força com o aumento da espessura do alumínio, ou seja, se haveria uma espessura a qual um incremento no seu valor não mais elevaria os valores máximos de força de arraste e levitação. Assim poderia ser obtida a espessura ótima do disco, para a qual haveria a saturação.

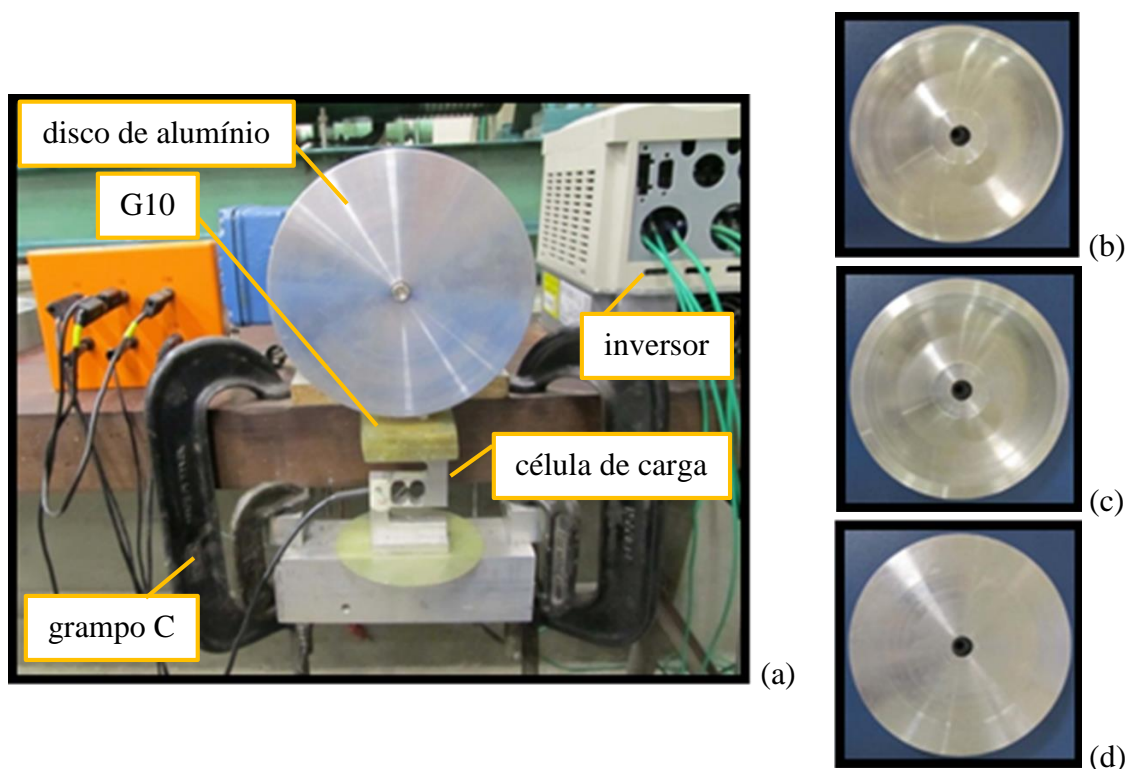


Figura 4. 2: (a) Bancada experimental do sistema ímã-disco e discos com espessuras de (b) 5 mm, (c) 10 mm e (d) com um tarugo maciço.

## 4.2. Simulação do Sistema Ímã-Disco

Para correlacionar os dados experimentais, foram elaboradas simulações computacionais em duas e três dimensões através do programa de simulação numérica COMSOL Multiphysics, que utiliza o método dos elementos finitos (MEF). Os parâmetros empregados nas simulações são apresentados na Tabela 4. 1, valores estes encontrados no sistema experimental.

<b>Objeto</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Disco</b>	Material	Alumínio
	Diâmetro do disco	15 cm
	Condutância	2,57E+7 S @ 30 °C
	Largura	4,0 cm
<b>Ímã permanente</b>	Material	Ne-Fe-B @ N35
	Permeabilidade rel.	1,09
	Indução remanente	1,18 T
	Comprimento	2,54 cm
	Largura	2,54 cm
	Altura (direção de magnetização)	1,27 cm

Tabela 4. 1: Parâmetros da bancada de testes do ímã e disco.

Na Figura 4. 3 é mostrado o modelo em três dimensões construído para comparação com o sistema experimental. Para o cálculo numérico foi utilizada uma malha com 10.181 elementos tetraedrais.

Ao ímã permanente, foi atribuída uma polarização vertical, ou seja, na direção do eixo z. Com isso, foram obtidas as curvas de força de arraste e levitação para diferentes valores de espessura, entreferro e velocidade de rotação. O tempo de cada simulação variou de acordo com os parâmetros adotados, limitando-se entre dois e quinze minutos, entendendo-se cada ponto das curvas como uma simulação.

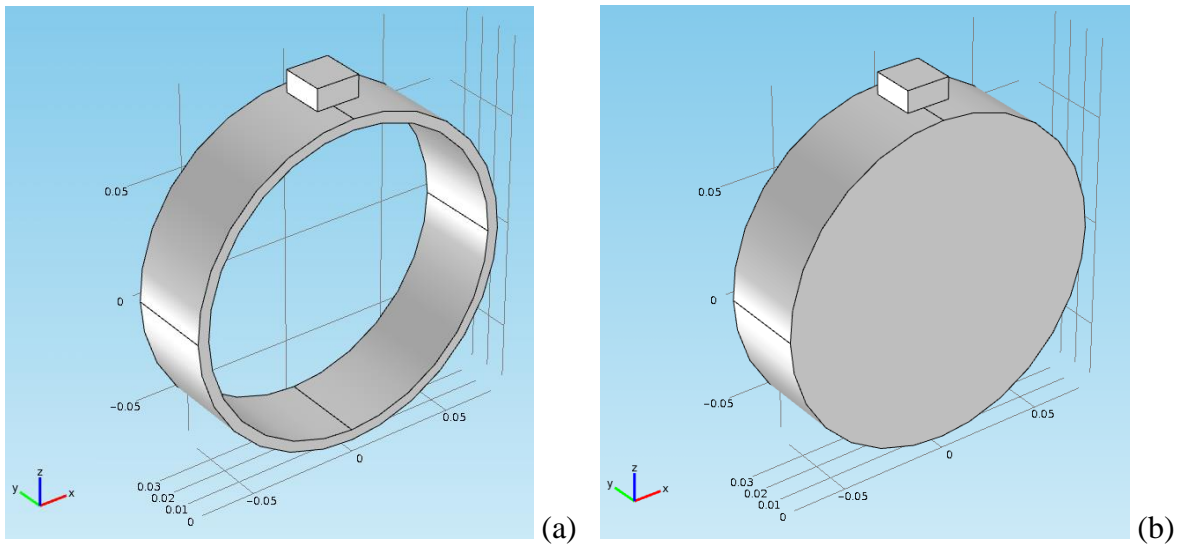


Figura 4. 3: Modelo do sistema ímã-disco 3D com (a) determinada espessura e (b) disco maciço.

Na Figura 4. 4 é apresentado o modelo em duas dimensões cuja malha foi constituída com 8.230 elementos triangulares. Conforme esperado, os dados obtidos por estas simulações exigiram menor tempo de processo computacional, sendo obtidos resultados na ordem de segundos. Todavia, a simulação em duas dimensões deve ser empregada com cautela, pois utiliza algumas aproximações que podem gerar erros significativos de acordo com o caso. Ela considera, por exemplo, que os resultados são diretamente proporcionais à profundidade. Com isso, a força seria expressa em N/m, sendo o valor total obtido ao multiplicar a profundidade do sistema.

A simulação bidimensional pode ser aplicada através da adequação de um modelo tridimensional. Um exemplo seria a aproximação de estruturas considerando uma largura comum e resultados como função linear da largura. No sistema ímã-disco, por exemplo, a largura do ímã é diferente da encontrada no disco. Embora haja este fato, as simulações bidimensionais foram empregadas utilizando-se a largura do ímã, cujo valor interfere no fluxo magnético obtido. O que se deseja evidenciar aqui é a necessidade de uma análise na obtenção de resultados oriundos de simulações bidimensionais, já que quando possível, são recomendadas por apresentarem resultados com maior rapidez se comparadas às simulações tridimensionais.



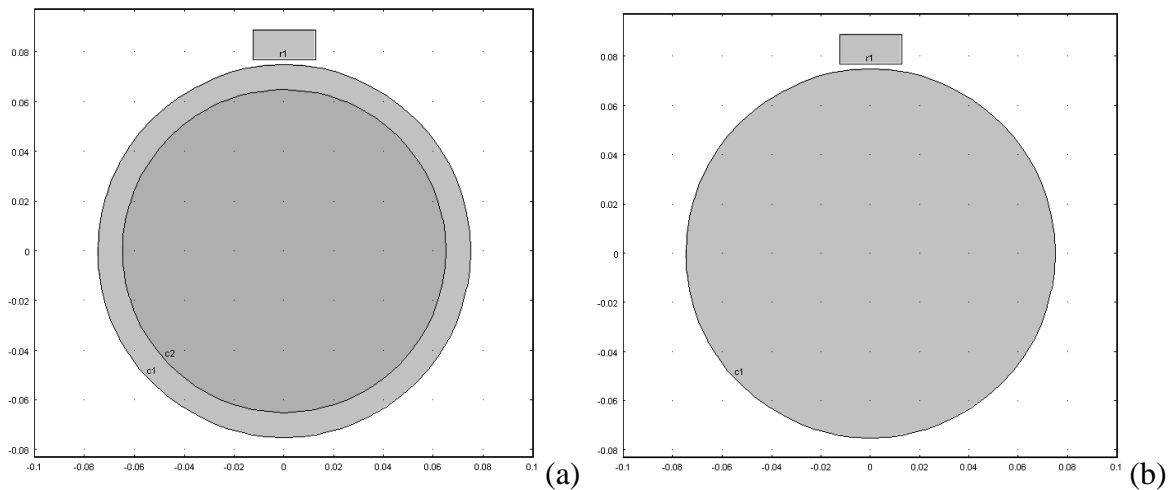


Figura 4. 4: Modelo do sistema ímã-disco 2D com (a) determinada espessura e (b) disco maciço.

No próximo item serão apresentados diversos resultados de simulações com os modelos aqui exibidos. Além disso, alguns resultados experimentais e numéricos serão comparados, pois foram obtidos através do emprego dos mesmos parâmetros no modelo.

### 4.3. Resultados de Simulação e Experimentais

A partir da montagem da bancada de testes apresentada no item anterior, foi iniciada uma sequência de testes experimentais. Nos testes foram utilizados os três cilindros de alumínio e condicionadas diferentes rotações e espaços no entreferro.

Na Figura 4. 5, são mostradas as curvas de força de levitação e de arraste com o tarugo maciço para a velocidade de até 50.000 rpm. É possível observar que para elevadas velocidades há uma saturação da força de levitação e uma tendência de decremento da força de arraste, conforme previsto nas Equações 3.9 e 3.10. É claro que o comportamento analítico não é perfeitamente satisfeito pela simulação, pois há diferentes considerações para cada modelo. Por exemplo, no modelo analítico é considerado que o condutor é plano, enquanto na simulação o sistema é, na verdade, um disco. Além disso, o modelo analítico se baseia no método das imagens, que apenas simplifica o cálculo e não traduz perfeitamente o caso real.

Embora as pequenas divergências citadas anteriormente, o resultado a seguir representa bem o comportamento esperado, pois são notados os pontos de máximo da força de arraste para menores valores de rotação, que são superados pelas forças de levitação quando a velocidade é incrementada. Portanto, a partir do ponto de máxima força de arraste são observadas tendências distintas entre as forças de arraste e levitação, onde a primeira tende a diminuir enquanto a outra deve aumentar. Ao analisar mais detalhadamente o gráfico, observa-se que, para um valor de entreferro de 5 mm, a força de sustentação possui tendência decrescente. Isto pode ser explicado pelo fato de o condutor não possuir espessura suficiente para indução de correntes que devem contribuir com a geração de um fluxo magnético no sentido oposto, gerando a “pressão magnética”. Com isso, a curva não se comporta conforme esperado pelo método do espelhamento, que define que as linhas de campo devem ser refletidas e que não ultrapassem a mediatriz do condutor, como mostra a Figura 3. 2.

No mesmo gráfico da Figura 4. 5 abaixo é notado um comportamento bastante interessante. De acordo com o esperado, as forças de levitação e de arraste deveriam ser inversamente proporcionais ao espaço do entreferro. No entanto, apenas a força de levitação apresentou tal comportamento a qualquer instante. Observe que, para a força de arraste, a adoção de diferentes valores de entreferro não se traduz em um valor diferente na curva de força para elevadas velocidades. Portanto, o uso de um entreferro maior, do ponto de vista do arraste, somente seria indicado caso houvesse dificuldade de partida ou necessidade de operação com baixa rotação.

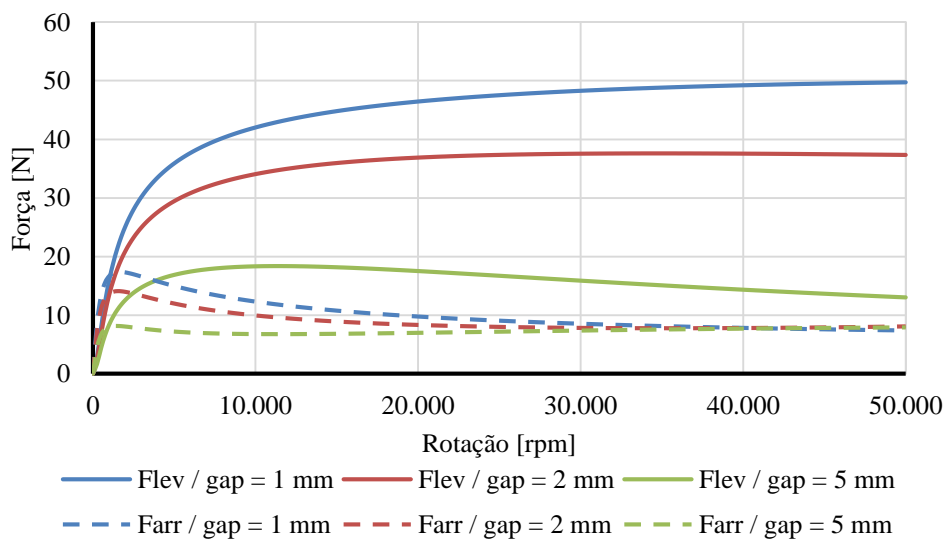


Figura 4. 5: Força de levitação e de arraste em função da velocidade para diferentes gaps com tarugo maciço obtida por simulação 2D.

Na Figura 4. 6 são apresentados os resultados da força de arraste para discos condutores com três espessuras diferentes. Como pode ser observado, este parâmetro exerce maior influência no valor de pico, pois à medida que a velocidade é incrementada, as curvas tendem a convergir. Esta característica indica a possibilidade de existência de um valor de espessura a partir do qual a variação da espessura não influencia no comportamento da força. Ou seja, a Figura 4. 6 indica que existe a possibilidade de otimização da espessura do disco condutor de forma a minimizar a força de arraste. Com isso, o sistema de suspensão deve conseguir superar a velocidade associada ao pico de arraste. Assim é possível alcançar maiores velocidades, elevando a força de levitação e reduzindo o arraste.

No mesmo gráfico a seguir é possível perceber que a espessura também pode ser determinada de forma a otimizar um sistema de frenagem eletromagnética. Desta forma a espessura seria minimizada, elevando o pico da força de arraste.

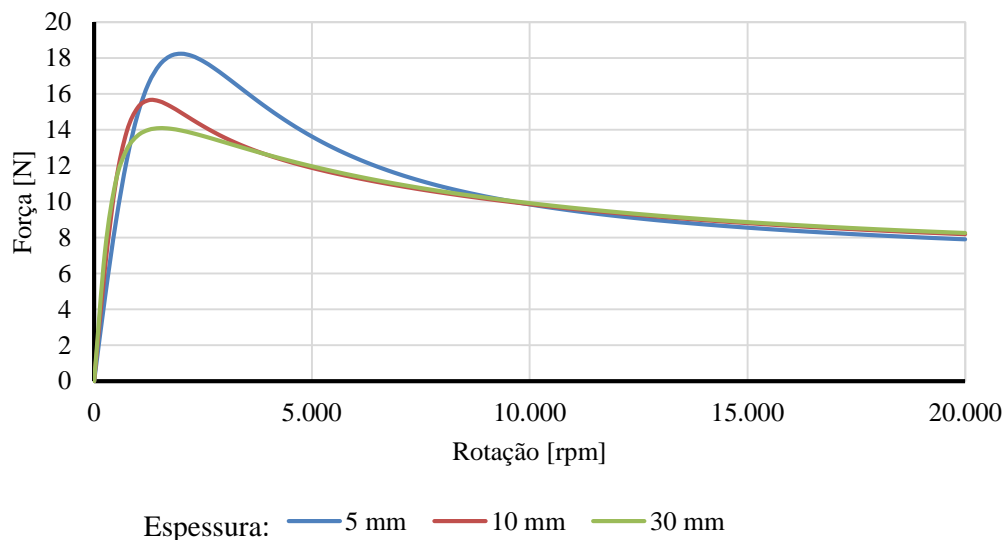


Figura 4. 6: Forças de arraste em função da velocidade para diferentes espessuras e um entreferro de 2 mm obtidas através de simulações 2D.

A Figura 4. 7 estabelece o comportamento da força de levitação para as mesmas condições do caso anterior. De acordo com a Equação 3.9 as forças devem tender ao mesmo valor, independentemente da espessura. Fato que desta vez está de acordo com a expectativa analítica.

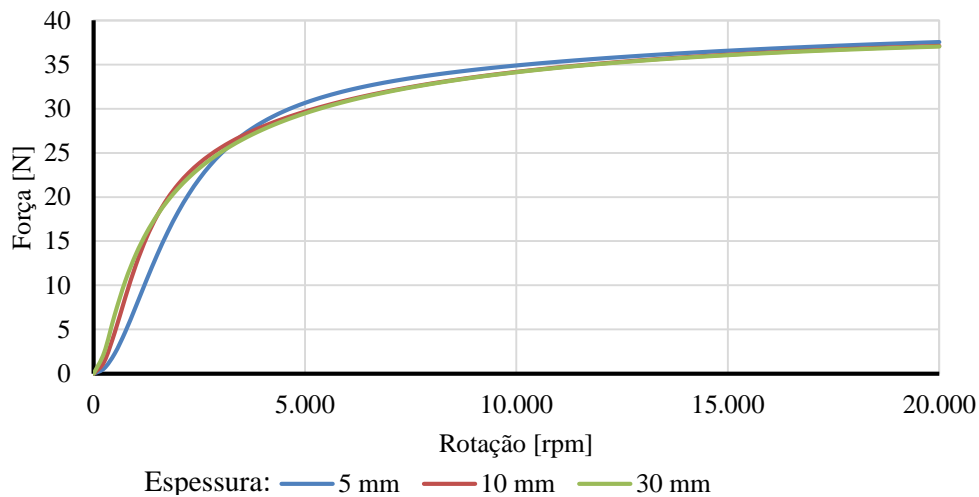


Figura 4. 7: Forças de levitação em função da velocidade para diferentes espessuras e um entreferro de 2 mm obtidas através de simulações 2D.

Anteriormente foi levantada a possibilidade da existência de um valor de espessura para o qual não haveria diferenciação da amplitude das forças para elevadas rotações. Por tal motivo foi realizada a curva a seguir, onde se tem a força de arraste para algumas velocidades em função da espessura, variável entre um e 30 mm. Através das curvas se percebe que uma espessura superior a oito milímetros não poderia ser utilizada com o objetivo de reduzir a parcela da força conhecida como arraste para operação com 2 mm de entreferro. Portanto, uma espessura maior, neste caso, poderia ser empregada apenas para elevação da rigidez mecânica do rotor e não para incrementar as características do sistema de levitação.

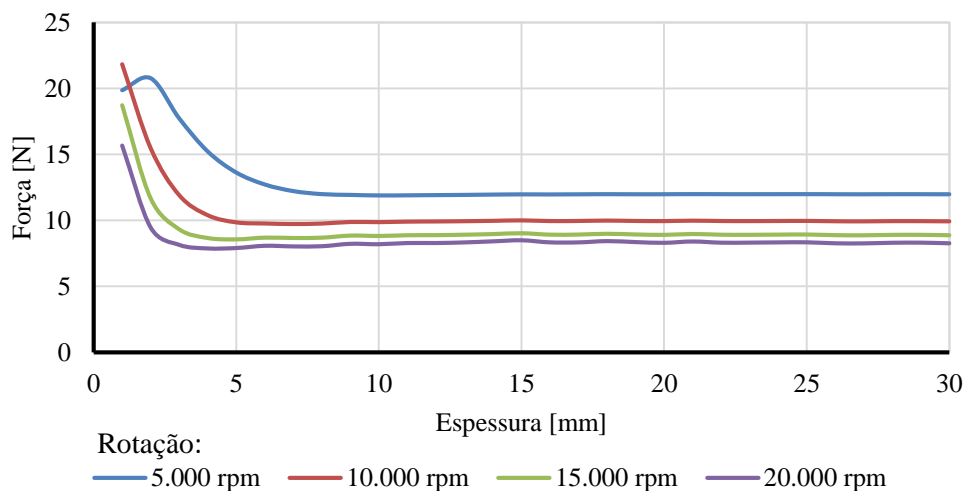


Figura 4. 8: Forças de arraste em função da espessura para diferentes velocidades e um entreferro de 2 mm obtidas através de simulações 2D.

Ao analisar a Figura 4. 9, percebe-se que o valor de espessura a partir do qual a força de arraste é minimizada, é aproximadamente o valor obtido para a maximização da força de levitação. Portanto, para esta simulação especialmente, onde foi adotado um valor de entreferro de dois milímetros, uma espessura de oito milímetros seria suficiente para otimizar o sistema de levitação eletrodinâmica, pois assim seria necessário o menor volume de material condutor para obter a maior força de sustentação, minimizando as perdas.

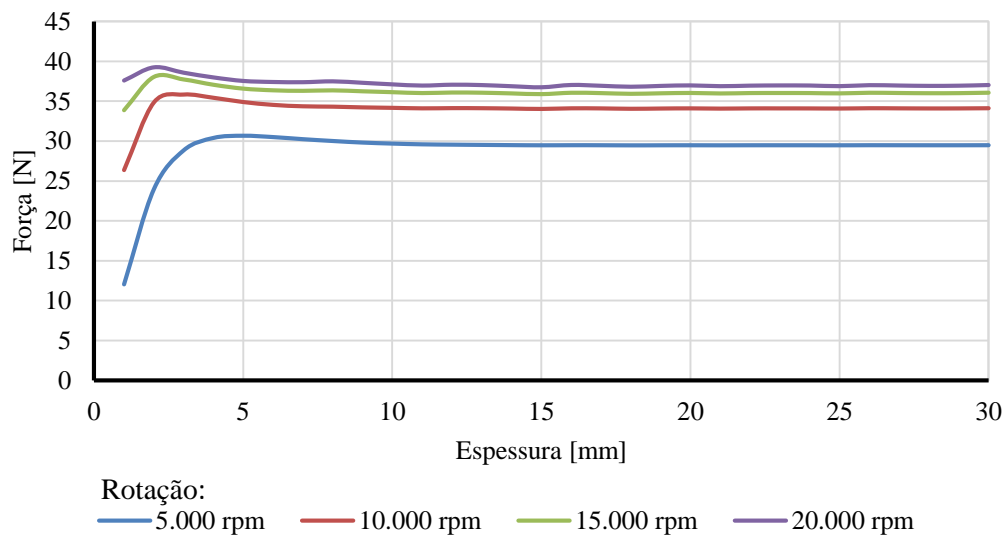


Figura 4. 9: Força de levitação em função da espessura para diferentes velocidades e um entreferro de 2 mm obtidas através de simulações 2D.

Finalmente, na Figura 4. 10, são apresentados os resultados das simulações bi e tridimensionais, além do resultado obtido de forma experimental. Através do gráfico é possível comparar os dados encontrados em cada um dos três procedimentos. É importante destacar que as simulações assim como os experimentos foram limitados a uma velocidade de aproximadamente 5.000 rpm, devido a limitação operacional do motor empregado nos testes experimentais, permitindo a comparação dos resultados. Na figura, são ilustradas as curvas de força de levitação e arraste para um disco com cinco milímetros de espessura. Note que este valor influencia bastante a qualidade dos resultados experimentais, pois, conforme pode ser observado, principalmente na curva de levitação, há uma certa oscilação causada pela variação da temperatura no disco condutor. Isto porque a espessura adotada estava associada a uma quantia de massa tal que o calor gerado no disco elevava sua temperatura de maneira mais rápida que a dissipação térmica para o ambiente e ao tempo de leitura dos

dados de força. Para minimizar este fato, o teste foi separado em etapas, e então foram aferidas as forças para duas velocidades distintas e consecutivas de cada vez. Ou seja, ao final de cada etapa, desligava-se o sistema até que a temperatura do disco retornasse ao valor de 30 °C de referência.

Ao analisar o gráfico a seguir se percebe uma maior diferenciação entre os resultados durante o período transitório e uma aparente tendência de convergência entre os resultados à medida que a rotação é elevada. Destaca-se que os valores obtidos através do experimento se situaram entre as curvas oriundas do cálculo numérico (2D e 3D), os resultados foram considerados satisfatórios, sendo as simulações, a princípio, um resultado aproximado tanto quando é considerada uma modelagem bidimensional quanto tridimensional.

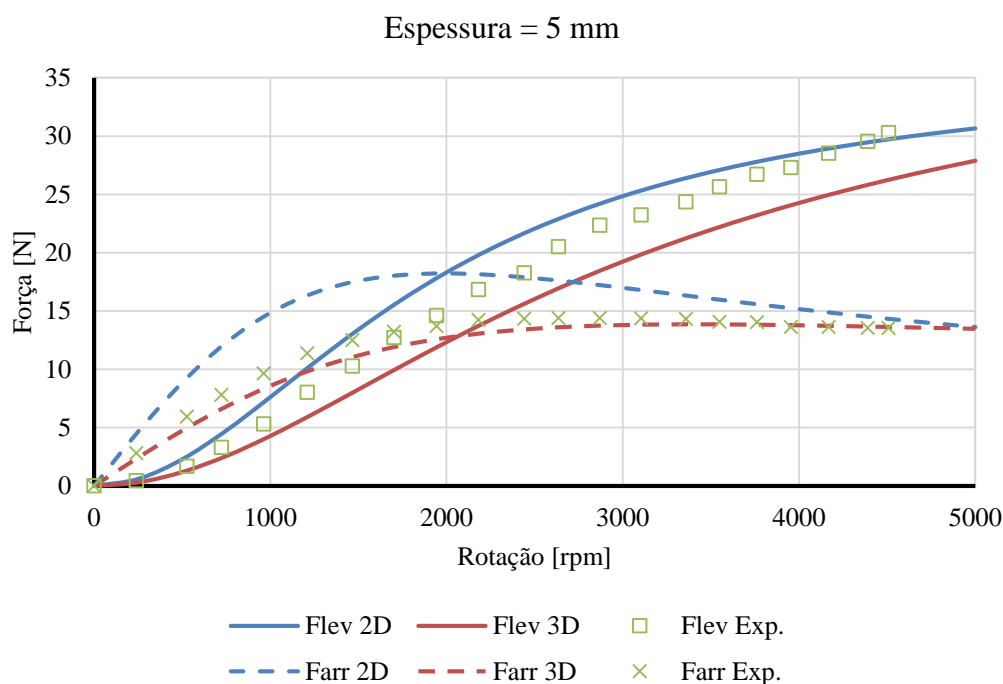


Figura 4. 10: Força de levitação e de arraste geradas por simulações 2D e 3D e levantamento experimental para uma espessura de 5 mm do disco e um entreferro de 2 mm.

Para uma espessura de dez milímetros do disco de alumínio, foram encontradas as curvas da Figura 4. 11. Deve ser destacado que, além da temperatura, a dificuldade em precisar o espaço do entreferro e falhas na usinagem do disco são outras fontes de erro para o experimento.

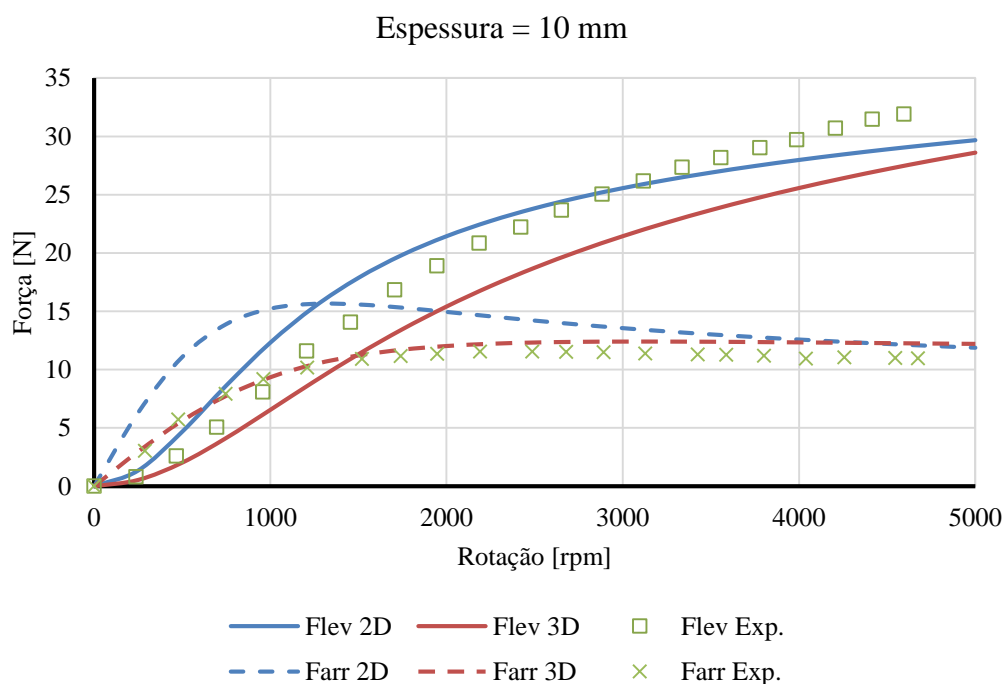


Figura 4. 11: Força de levitação e de arraste geradas por simulações 2D e 3D e levantamento experimental para uma espessura de 10 mm do disco e um entreferro de 2 mm.

O resultado mostrado na Figura 4. 12 foi obtido após diversas repetições dos testes e, por este motivo, apresenta bastante qualidade. Observe que desta vez a curva experimental descreve praticamente o mesmo traçado realizado pela curva oriunda da simulação com o modelo tridimensional. Este fato eleva a confiabilidade no uso deste modelo para retratar um sistema físico. O intervalo onde comportamento obtido com a simulação bidimensional possui maior divergência com o valor real é justamente quando a velocidade de rotação não é tão elevada. Portanto, ao analisar os resultados apresentados na Figura 4. 12, verifica-se que para baixas rotações a modelagem tridimensional apresentou melhor convergência e, para rotações mais elevadas, o uso do modelo bidimensional produziu resultados satisfatórios.

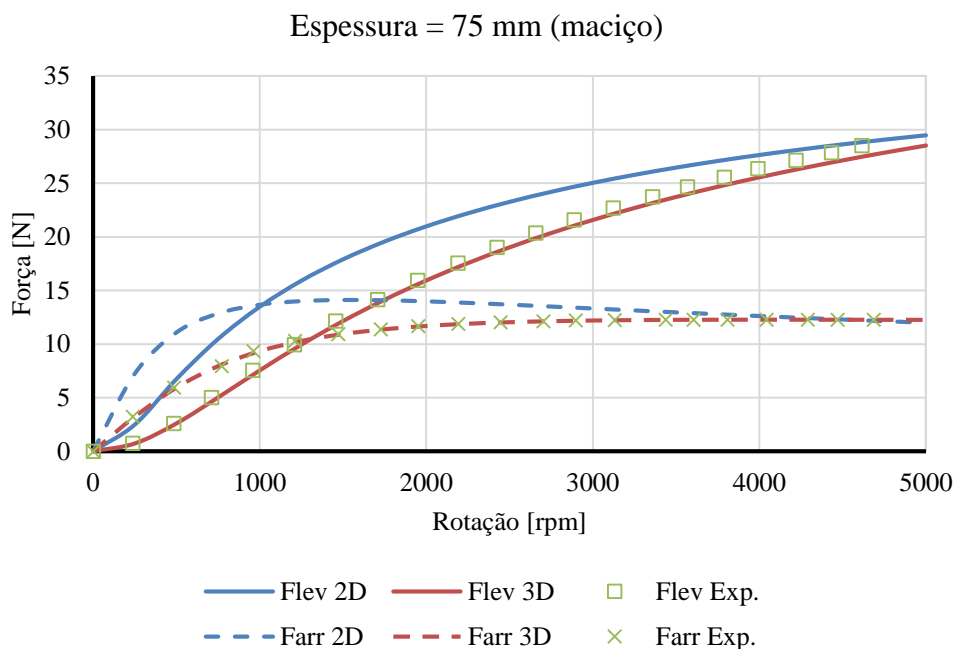


Figura 4. 12: Força de levitação e de arraste geradas por simulações 2D e 3D e levantamento experimental para um tarugo maciço e um entreferro de 2 mm.

Uma importante observação a ser destacada é a elevação da temperatura do disco condutor durante os testes. De acordo com o exposto anteriormente, ela é caracterizada como uma das maiores dificuldades na realização dos ensaios. Para ilustrar o citado problema, segue abaixo o comportamento das forças de levitação e arraste de acordo com a temperatura. Através da Figura 4. 13 verifica-se que a força de levitação, em vermelho, é mais sensível à variação da temperatura do que a força de arraste. Para a mesma variação entre zero e 150 °C, a parcela da força responsável pela sustentação do corpo é reduzida em 78%<sup>1</sup> enquanto a outra parcela decrementa apenas 40%<sup>2</sup>. Ou seja, para uma rotação de 2.000 rpm e entreferro de 2 mm, há uma redução em valores absolutos quase que três vezes maior da primeira parcela. Com isso, conclui-se que um sistema de levitação deve operar com a menor temperatura possível para que aumente a eficiência do sistema. Todavia, para isso é necessário obter baixas perdas por correntes parasitas, por exemplo, as quais contribuem para o aquecimento devido ao já mencionado efeito Joule. Portanto, será apresentado mais adiante uma solução em que as correntes somente são induzidas no momento necessário.

<sup>1</sup>  $(18-4)/18 = 0,78$

<sup>2</sup>  $(12-7)/12 = 0,40$



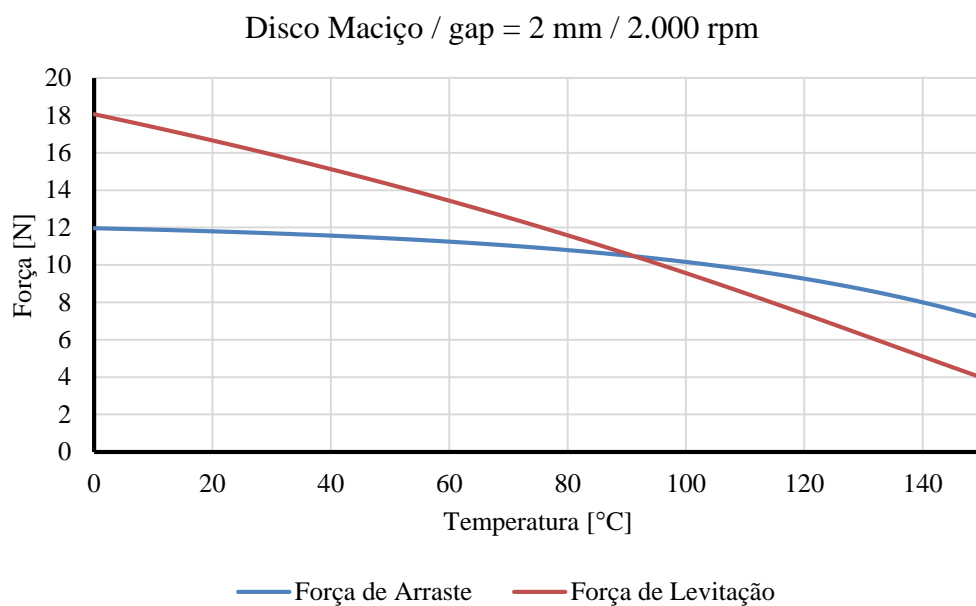


Figura 4. 13: Força de levitação e de arraste em função da temperatura obtida por simulação 3D com gap de 2 mm e velocidade de 2.000 rpm.

É importante destacar que o aumento da temperatura do sistema pode contribuir para a desmagnetização do ímã permanente. Alguns ímãs apresentam temperatura de Curie em torno de 80 °C, por exemplo. No caso do N35, a temperatura de Curie é da ordem de 310 °C.

No próximo capítulo será apresentada uma proposta de mancal eletrodinâmico rotativo que será investigado profundamente no decorrer deste trabalho.

# Capítulo 5

## Mancal Eletrodinâmico

O mancal eletrodinâmico é uma das aplicações encontradas para a levitação eletrodinâmica. Neste sentido, podem ser construídos mancais tanto radiais quanto axiais. Os mancais radiais podem possuir maior complexidade de construção caso o eixo do motor seja posicionado na horizontal, pois assim haveria a necessidade de compensação do peso do rotor. Além disso, deve ser concebido preferencialmente buscando-se a minimização das perdas oriundas das correntes parasitas não contribuintes para a força de sustentação. Apesar das dificuldades, a aplicação desse tipo de mancal pode trazer muitos benefícios, os quais foram apontados anteriormente neste trabalho.

Neste capítulo, serão apresentadas as características do mancal eletrodinâmico, sejam elas construtivas, como a geometria mais adequada; físicas, como o momento em que há indução de correntes e presença das forças; numéricas, como a maneira para geração da malha pela modelagem por elementos finitos etc.

### 5.1. Mancal Homopolar x Heteropolar

O mancal magnético radial pode ser concebido de duas maneiras. Na primeira, o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes é radial na face interna do mancal e ao percorrer um caminho em anel nesta face interna é observada uma única polaridade. Na outra, o ímã é polarizado de forma que o campo magnético não seja homogêneo na face interna e as linhas de fluxo são radiais. É o caso da configuração Halbach, por exemplo.

Conforme pode ser observado no resultado oriundo do experimento do ímã permanente com o disco, as forças de levitação e de arraste estão presentes independentemente do entreferro escolhido. Ou seja, não importa a posição, haverá forças atuando sobre o sistema. O mesmo deve ocorrer para um sistema mancal magnético radial heteropolar, já que para qualquer velocidade e posição do rotor, haverá variação do fluxo magnético. Portanto, existirá indução de correntes e geração de forças. Todavia, quando adotado um mancal homopolar, ou seja, um mancal cujo campo na face interna é homogêneo, haverá variação do fluxo somente enquanto o rotor estiver descentralizado e com velocidade angular ou enquanto ele se deslocar radialmente. Isto porque se o ímã permanente for ideal e o rotor estiver centralizado, não será percebida variação do fluxo magnético pela superfície do rotor, pois, neste caso, a intensidade de campo será idêntica para qualquer posição angular do rotor. Ao pensar nas duas possibilidades de projeto, ou seja, um mancal heteropolar ou homopolar, percebe-se então que a segunda opção é a mais adequada aos MMs, inclusive radiais, visto que se deseja operar o rotor em modo centralizado e, neste momento, minimizar as perdas durante a rotação.

A solução apresentada acima é interessante do ponto de vista teórico. No entanto, quando aplicada, pode trazer certas dificuldades pelo fato do ímã permanente não ser perfeitamente homogêneo. Por tal motivo, os ímãs adotados na construção do mancal devem ser escolhidos com bastante cuidado, preferencialmente, com auxílio de um mapeamento de campo.

Um ímã permanente em forma de anel magnetizado radialmente é mais complexo de ser construído do que um outro magnetizado axialmente, o que eleva o seu custo. Para solucionar tal questão, em geral, os mancais homopolares são construídos através de ímãs permanentes polarizados axialmente e, para que seja obtido um fluxo magnético radial, são empregados anéis de material ferromagnético entre os ímãs permanentes que são posicionados com os polos em oposição em um arranjo de *flux shaper*, conforme apresenta a Figura 5. 1. Assim, consegue-se reunir diversas vantagens como: gerar um fluxo magnético radial homogêneo, reduzir o custo e dificuldade de aquisição dos ímãs permanentes, assim como obter ímãs de melhor qualidade, já que os ímãs polarizados axialmente são mais difundidos no mercado e são tecnicamente mais fáceis de se construir. Na Figura 5. 1 é ilustrada a diferença entre um ímã permanente radial e um sistema que emprega os concentradores de fluxo para direcionar o campo magnético.

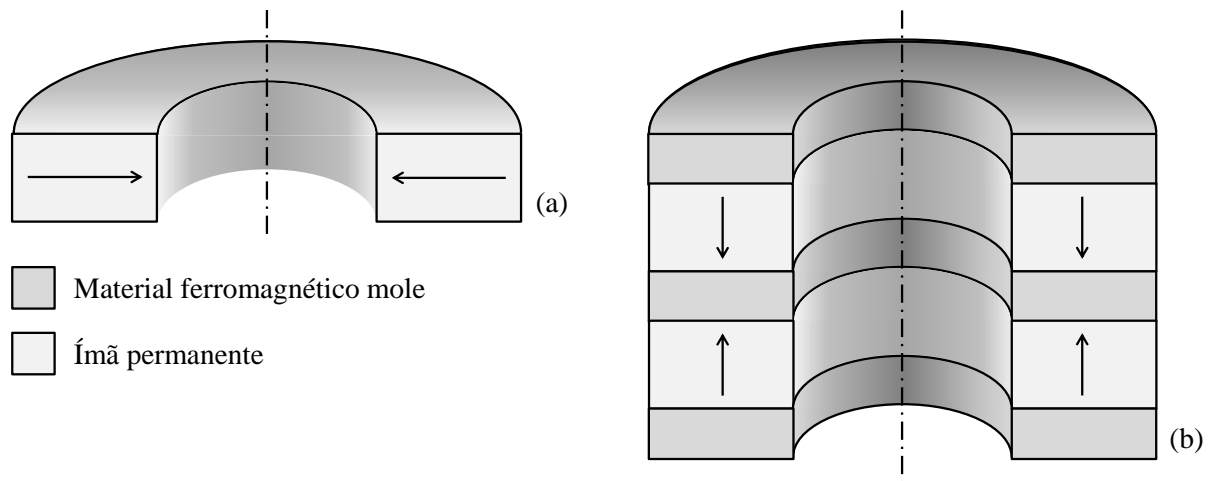


Figura 5. 1: Ímã em anel com polarização (a) radial e (b) axial com concentradores de fluxo (*flux shapers*).

Deve ser destacado que o mancal eletrodinâmico radial pode ser construído de outras maneiras. Sendo assim, pode-se simplesmente alterar a geometria do rotor, sendo este externo ao estator; ou através de diferentes configurações dos ímãs permanentes como, por exemplo, posicionando pequenos blocos de ímãs de forma a se construir um anel heteropolar.

## 5.2. Indução de Correntes

Neste trabalho foi estudado e desenvolvido um mancal eletrodinâmico passivo, onde a geração de correntes também foi realizada de forma passiva, ou seja, através da indução magnética. Não será mais detalhado tal fenômeno, pois este já foi bastante explicado anteriormente no item sobre o princípio de funcionamento da levitação eletrodinâmica.

Conforme se sabe, a indução de correntes ocorre sempre quando há variação de fluxo observada por um condutor elétrico. Embora o campo gerado por ímãs permanentes seja constante, podem ser encontradas variações de fluxo magnético por três motivos no EDB homopolar. São eles:

- 1) Movimento radial ou axial do rotor (translação);
- 2) Rotação quando há excentricidade (eixo descentralizado);
- 3) Ímãs permanentes não homogêneos.

No primeiro caso é notada a variação de fluxo pelo fato de a sua componente radial diminuir exponencialmente com a distância da face interna do ímã. Portanto, se o estator do EDB, que contém os ímãs e o concentrador de fluxo, gerar um fluxo radial homogêneo em sua face interna, o centro do mancal deverá ter campo nulo, conforme ilustra a Figura 5. 2. Já a face externa do rotor do EDB deverá observar um campo limitado entre os valores  $B_{min}$  e  $B_{max}$  por conta da restrição geométrica de deslocamento do rotor.

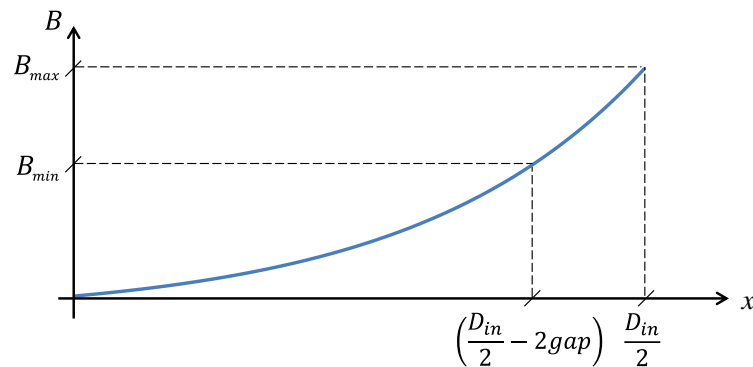


Figura 5. 2: Fluxo magnético em função da posição radial no EDB.

O segundo caso é ilustrado pela Figura 5. 3. Através do desenho é possível verificar a variação da distância do entreferro de um elemento infinitesimal do rotor (quadrado vermelho) de acordo com seu posicionamento angular. Sabe-se, pela Figura 5. 2, que a amplitude do campo varia de acordo com a posição radial. Logo, conclui-se que a operação do rotor em modo descentralizado, mesmo que na ausência de movimento radial do rotor, gera variação de fluxo em relação aos elementos infinitesimais os quais compõem o rotor. Com isso, neste modo de operação também haveria indução de correntes, as quais causariam forças de sustentação e de arraste no sistema mancal.

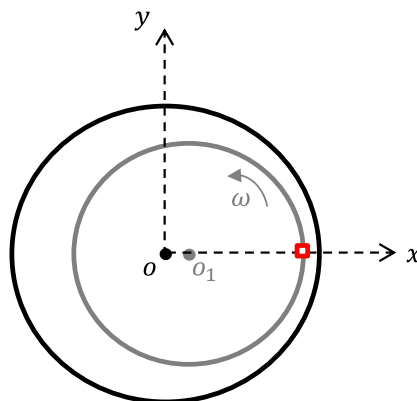


Figura 5. 3: Operação do EDB em modo descentralizado.

Na Figura 5. 4 é mostrado o comportamento do campo magnético observado pelo elemento infinitesimal (quadrado vermelho) destacado na Figura 5. 3, onde a variação senoidal deste campo se deve ao fato de se considerar o rotor deslocado (posição  $O_1$ ) com velocidade angular. Portanto, o valor pico a pico da curva apresentada na Figura 5. 4 é função da excentricidade do rotor, sendo este maior quanto maior for a excentricidade (KLUYSKENS, 2013).

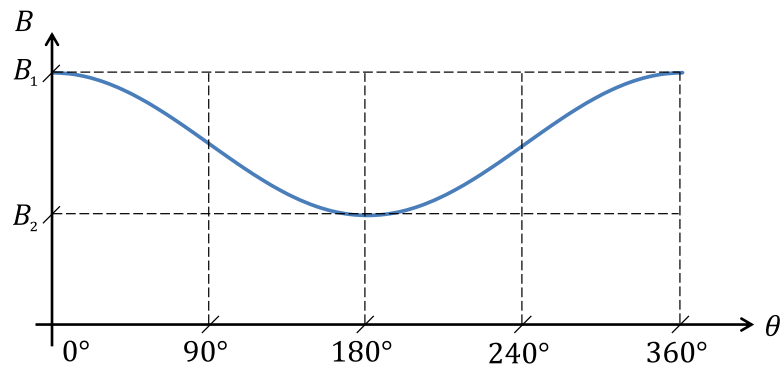


Figura 5. 4: Variação do fluxo magnético para uma excentricidade constante.

O terceiro fator contribuinte para a indução de correntes no rotor é a magnetização do ímã permanente. Idealmente, quando situado no espaço livre, um ímã em anel polarizado axialmente deveria possuir simetria nas linhas de fluxo em relação ao eixo que passa pelo centro do anel. No entanto, a magnetização do ímã sempre apresenta alguma heterogeneidade, por menor que seja. Portanto, na prática, o que se deve fazer preferencialmente é o mapeamento de campo dos ímãs a serem empregados no mancal. Assim, após aprovação com determinada tolerância, pode-se construir um MM com a menor parcela de perdas possível. Na Figura 5. 5 é possível observar o resultado de um mapeamento de campo realizado em um ímã em anel polarizado axialmente, conforme o utilizado na construção do mancal eletrodinâmico a ser apresentado mais à frente.

Apesar de não ser encontrado um ímã perfeitamente magnetizado na prática, os concentradores de fluxo utilizados para direcionar o fluxo magnético são elementos que minimizam tais defeitos. Com isso, ainda que os ímãs apresentem certas heterogeneidades, os concentradores devem reduzir as variações, reduzindo a ocorrência de correntes parasitas no sistema mancal.

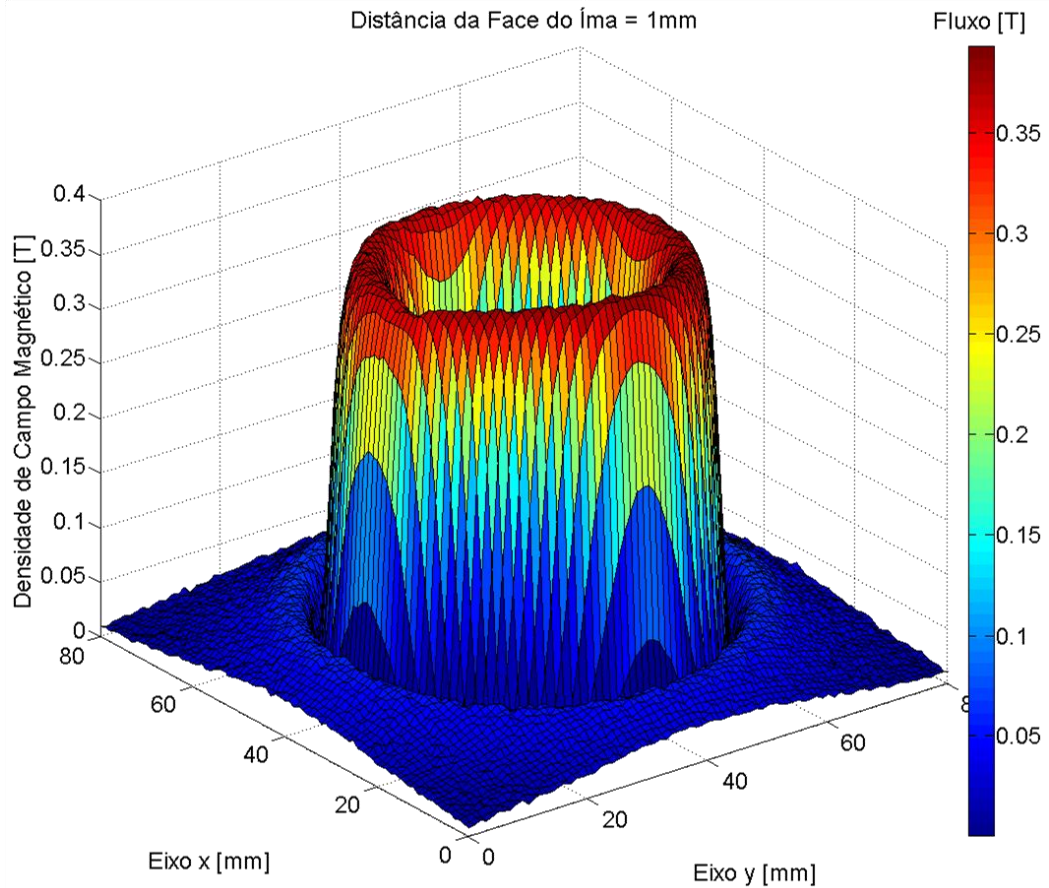


Figura 5. 5: Mapeamento de um ímã permanente em anel com polarização axial.

### 5.3. Características do EDB

Conforme já explicado, as correntes induzidas no rotor do EDB dão origem à força eletrodinâmica, que pode ser dividida em duas componentes. Uma delas, mais conhecida como força centralizadora do rotor, age na direção encontrada entre o centro do rotor deslocado e o centro magnético do mancal, entretanto, no sentido contrário. Já a segunda componente age ortogonalmente à direção citada e o sentido é dependente do modo de movimentação do rotor. Com auxílio da Figura 5. 6 é possível verificar o sentido desta força de arraste, ou seja, da força ortogonal ao deslocamento do rotor. Nota-se que para uma velocidade de rotação positiva  $\omega$  em relação ao eixo  $z$  e um deslocamento positivo no eixo  $x$ , a força de arraste é positiva no eixo  $y$ .

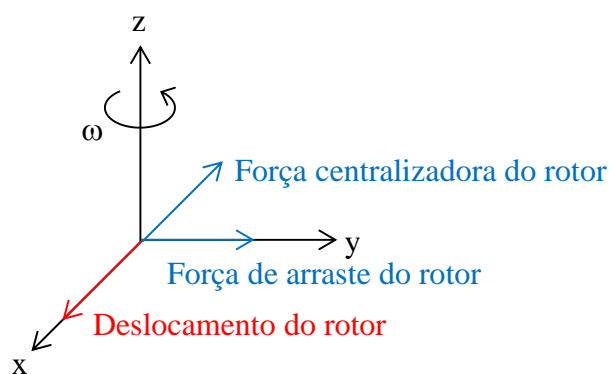


Figura 5. 6: Componentes da força em um EDB devido à excentricidade.

Na Figura 5. 7 é mostrado um esquemático da força resultante em um mancal eletrodinâmico, inspirado na Figura 5. 6. Embora aparentemente tenha o mesmo objetivo, a figura abaixo demonstra que a força pode ser expressa através de uma amplitude e um ângulo. Desta forma, é possível demonstrar que o ângulo da força deve iniciar com um valor em torno de  $90^\circ$ , ou seja, o valor para baixas velocidades, e deve tender a  $180^\circ$ , quando a velocidade for elevada (LEMBKE, 2005).

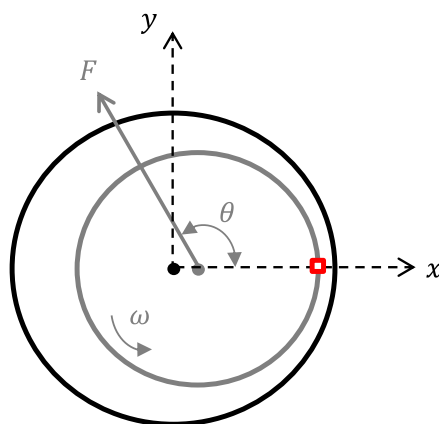


Figura 5. 7: Força resultante em um EDB com rotor descentralizado.

Os resultados que serão apresentados no próximo capítulo demonstrarão o comportamento da amplitude e ângulo da força, os quais variam de acordo com a rotação e parâmetros do mancal.

A Figura 5. 8 a seguir ilustra a força no mancal devido à velocidade radial. Tal força também é função da rotação. No entanto, seu comportamento é diferenciado se comparado ao encontrado no modo de operação descentralizado. No próximo capítulo, será possível verificar o comportamento das forças para ambos os casos.



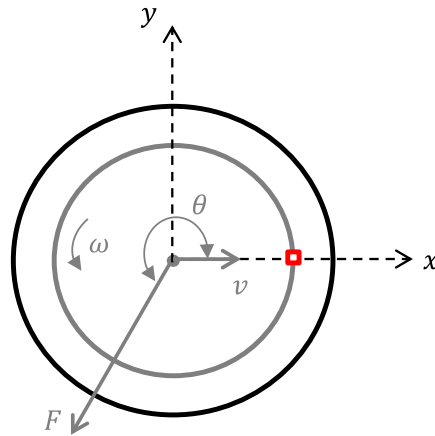


Figura 5. 8: Força resultante em um EDB com velocidade radial.

## 5.4. Rigidez e Amortecimento

A rigidez e o amortecimento são os parâmetros básicos para se estabelecer a dinâmica do sistema mancal e, assim, verificar sua estabilidade ou mesmo se os parâmetros obtidos são adequados para determinada tarefa.

Em particular, o mancal eletrodinâmico possui duas componentes de força e, com isso, são obtidas a rigidez centralizadora e a de arraste. A seguir é possível verificar a definição da rigidez,  $k$ .

$$k = -\frac{dF}{dr}, \quad (5.1)$$

onde  $F$  é a força exercida sobre o rotor e  $r$ , a posição radial do rotor.

Como no EDB a força possui duas componentes, a rigidez pode ser expressa como:

$$k_c = -\frac{dF_c}{dr} \quad (5.2)$$

e

$$k_a = -\frac{dF_a}{dr}. \quad (5.3)$$

Neste caso,  $F_c$  seria a força centralizadora e  $F_a$ , a força de arraste. Já  $k_c$  e  $k_a$  seriam as respectivas componentes da rigidez.

Ao observar a Figura 5. 7, percebe-se que a força pode ser escrita através de uma amplitude e um ângulo, que indica o sentido de atuação desta. Logo, verifica-se que a amplitude da força centralizadora seria máxima para um ângulo de 180° e mínima, quando fosse 90° ou 270°. Portanto, a componente  $F_c$  estaria associada à função cosseno. Com isso,

$$k_c = -\frac{dF_c}{dr} = -\frac{d(F \cos \theta)}{dr} = -\frac{dF}{dr} \cos \theta. \quad (5.4)$$

A partir da rigidez é possível encontrar a frequência natural ( $\omega_n$ ) do sistema, identificada a seguir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_c}{m}} \quad (5.5)$$

Onde  $m$  é a massa do rotor. No caso de mancais radiais, haveria um mancal em cada extremidade do rotor, totalizando dois componentes. Portanto, sendo empregados dois mancais idênticos, a rigidez seria multiplicada por dois.

Já o amortecimento depende da velocidade de deslocamento radial. Então,

$$c = -\frac{dF}{dv}. \quad (5.6)$$

Onde  $c$  é o amortecimento e  $v$ , a velocidade radial.

Assim como a rigidez, o amortecimento é encontrado através de duas componentes. Até o momento em que a velocidade de rotação é nula, a força devido à movimentação radial é obtida apenas na direção radial, ou seja, age apenas a força centralizadora. Todavia, assim que o sistema obtém certa velocidade rotativa, surge mais uma parcela de força, ortogonal à força centralizadora, no entanto, desta vez, em sentido contrário à força relacionada com a excentricidade (LEMBKE, 2005). Em suma, o amortecimento também pode ser escrito através de duas componentes. Com isso,

$$c_c = -\frac{dF_c}{dv} \quad (5.7)$$

e

$$c_a = -\frac{dF_a}{dv}. \quad (5.8)$$

Através do levantamento do comportamento da rigidez e amortecimento de um determinado mancal é possível elaborar um modelo mecânico para avaliação da estabilidade do sistema e, ainda, verificar o comportamento do sistema para perturbações como variações de carga radial e torcional no eixo do motor.

## Capítulo 6

# Sistema EDB Homopolar

Neste capítulo será apresentado o mancal eletrodinâmico dimensionado a partir de simulações computacionais e testes experimentais. Primeiramente, deve-se dizer que o mancal magnético escolhido durante o projeto foi o homopolar em virtude de todas as vantagens já citadas neste trabalho.

Nos itens a seguir, serão apresentados os dados do respectivo mancal, assim como o detalhamento de sua geometria e metodologia para obtenção dos resultados tanto numéricos como experimentais. Através do método numérico foi possível realizar a otimização do mancal no que se refere à maximização das forças de sustentação. Além disso, serão mostradas algumas características como o relacionamento das perdas com os parâmetros: posição e rotação.

### 6.1. Simulações Computacionais do EDB pelo MEF

O modelo teve de ser desenvolvido em três dimensões em virtude do uso de um mancal homopolar. A direção de magnetização do ímã pela forma escolhida impossibilita a simplificação através de um modelo em duas dimensões. Isto porque o fluxo magnético deve seguir um caminho fechado, o que não poderia ocorrer sem a modelagem em três dimensões. Por tal motivo o tempo demandado para obtenção de cada resultado foi entre 10 e 40 min, sendo empregado um computador de quatro núcleos com memória de 8 GB.

As simulações foram realizadas através do programa COMSOL Multiphysics, o qual emprega o método dos elementos finitos para a determinação dos resultados.

### 6.1.1. Geometria do Mancal

O EDB possui um rotor interno com material condutor elétrico, que geralmente é o alumínio ou o cobre. Neste caso, foi adotado o primeiro. Já o estator é formado através ímãs permanentes em anel, magnetizados axialmente. Entre cada par de ímãs foi colocado um concentrador de fluxo magnético de material ferromagnético. Por último, foi construído um invólucro paramagnético para abrigar todos os componentes do estator. Na Figura 6. 1 é mostrada a geometria do EDB desenvolvida no programa de computador, onde foram destacadas as partes do mancal através de cores.

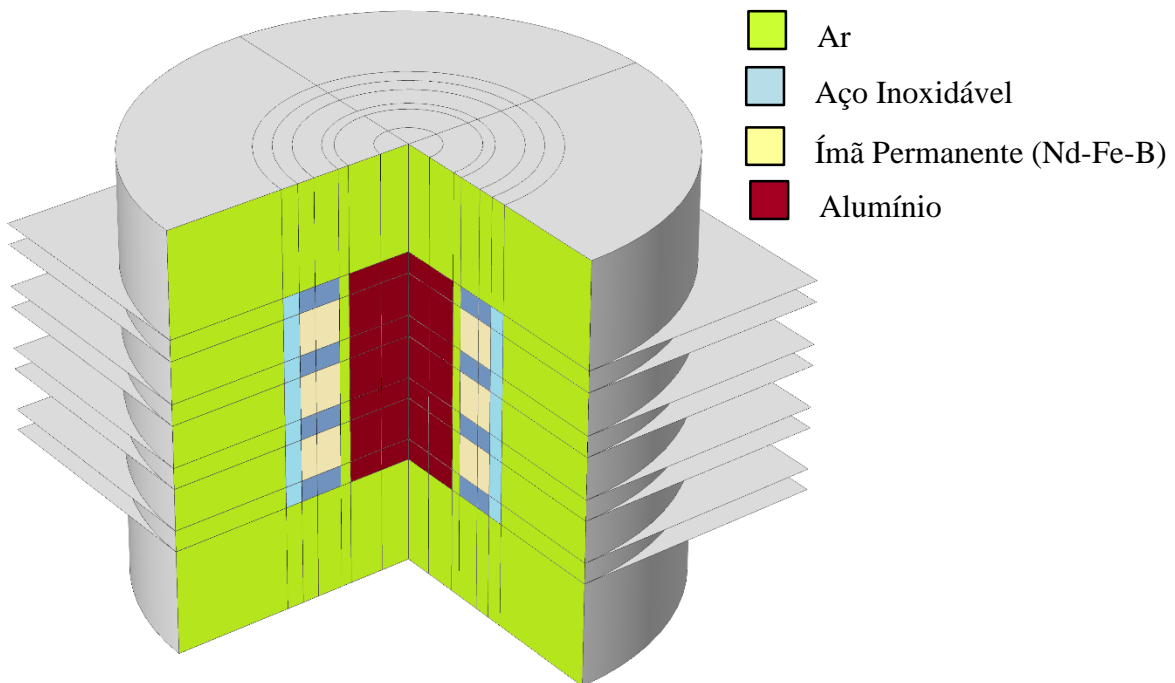


Figura 6. 1: Modelo computacional do EDB em três dimensões com corte.

### 6.1.2. Método de Cálculo

Os cálculos podem ser procedidos basicamente por dois métodos. São eles: a Força de Lorentz e o Tensor de Maxwell.

No primeiro caso, as correntes induzidas no condutor são obtidas através da seguinte equação:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{v} \times \vec{B}. \quad (6.1)$$

Logo, aplicando a expressão para força de Lorentz:

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B}, \quad (6.2)$$

obtem-se a força por unidade de volume e a força total sobre o rotor será:

$$\vec{F} = \iiint \vec{J} \times \vec{B} dv, \quad (6.3)$$

onde  $v$  é o volume do condutor.

Já no cálculo pelo método do tensor de Maxwell, a densidade de força é expressa como (SOTELO, 2003):

$$\vec{f} = \nabla \cdot \vec{T} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{S}}{\partial t}, \quad (6.4)$$

onde  $\vec{T}$  é a matriz dos tensores de Maxwell (ABREU, 2011) e  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  representa o vetor de Poynting.

A matriz dos tensores de Maxwell é formada pelos componentes descritos a seguir:

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \mu_0 \left( H_i H_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} H^2 \right), \quad (6.5)$$

onde os índices  $i$  e  $j$  se referem às coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $\delta_{ij}$  (delta de Kronecker) é nulo quando  $i \neq j$  e possui valor unitário se  $i = j$ .

Logo, a força total pode ser escrita como:

$$\vec{F} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int_V \vec{S} \cdot dV + \oint_S \vec{T} \cdot d\vec{S}. \quad (6.6)$$

Já o torque pode ser escrito como:

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F}, \quad (6.9)$$

onde  $\vec{r}$  é uma função vetorial cuja origem é o ponto de referência do torque.

É importante ressaltar que as deduções para a formulação dos tensores de Maxwell não são triviais e, por isso, não foram detalhadas neste item.

### 6.1.3. Construção da Malha

O mancal radial, por possuir formato cilíndrico, possui simetria radial. Por este motivo, é recomendável construir a malha com geometria hexahedral para que seja possível realizar a otimização do sistema de forma que o número e posição dos elementos não seja alterado de acordo com a geometria do mancal. Com isso, os resultados se tornam mais precisos, pois para todos os casos a malha é idêntica. Para elucidar, a geometria poderia ser alterada no momento em que se deseja descobrir a largura ótima para o concentrador de fluxo ou mesmo a espessura ótima do rotor, por exemplo. Além da vantagem no processo de otimização, a malha hexahedral proporciona maior exatidão no cálculo através do método do tensor de Maxwell, pois com ela, a superfície externa do rotor pode permanecer constante independentemente da excentricidade. Devido às vantagens da malha hexahedral, a geração de uma malha tetraedral não é recomendada. Entretanto, esta pode ser utilizada principalmente quando se deseja elaborar um modelo computacional de maneira rápida, pois ela é mais fácil de ser construída pela existência de ferramentas de construção automática em grande parte dos programas de simulação por elementos finitos.

Conforme explicado, a construção da malha hexaedral seria a mais adequada para o trabalho de otimização do sistema mancal. Por isso, este tipo de malha foi preferida durante a realização do projeto. Na Figura 6. 2 é possível visualizar a malha gerada para um caso.

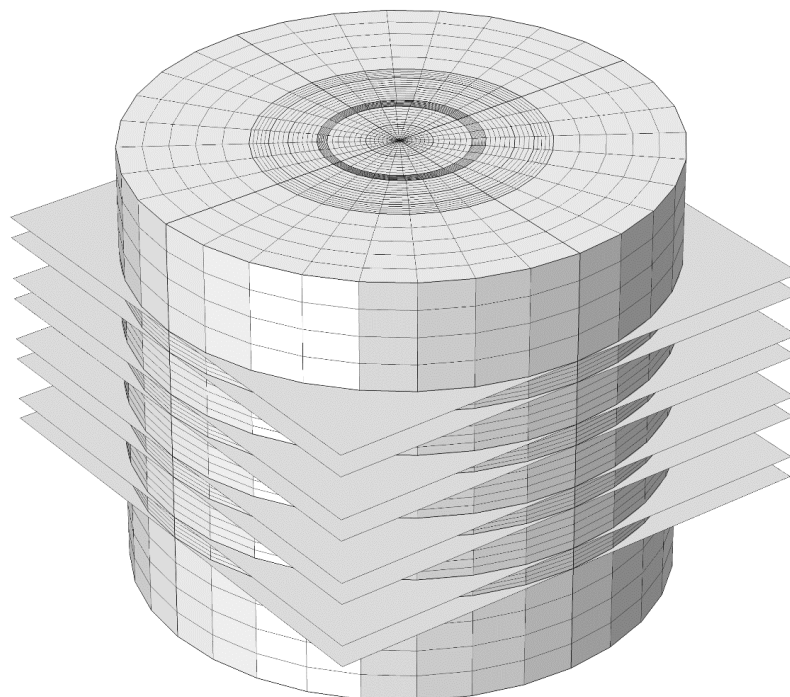


Figura 6. 2: Vista isométrica da malha hexagonal do EDB com três ímãs.

Através da Figura 6. 3 é observada a vista superior do mancal. Nota-se que a região do entreferro possui maior concentração de elementos para que haja maior acurácia no cálculo das variáveis envolvidas. Além disso, os elementos atrelados a cada material foram gerados com a mesma largura para que fosse possível realizar a otimização do sistema sem que a malha fosse alterada. Por exemplo, pela vista superior se constata que o ímã permanente, destacado na cor creme, possui 10 elementos radiais. Portanto, a otimização foi realizada decrementando-se a largura do concentrador em passos de um décimo de seu valor.

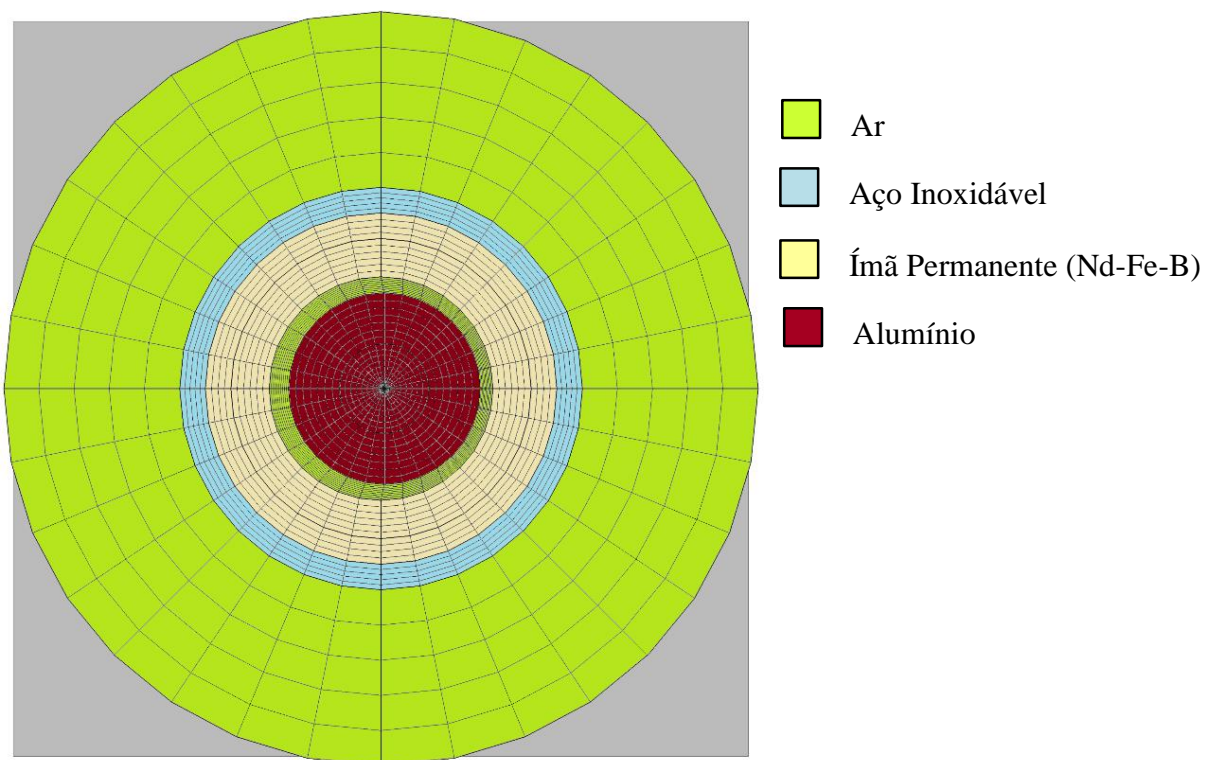


Figura 6. 3: Vista superior da malha hexagonal do EDB com três ímãs.

O número de elementos foi limitado pela capacidade de memória de máquina e a validação da quantidade de elementos foi realizada através da comparação entre os resultados computacionais e dados experimentais, algo que deve ser preferencialmente executado. A comparação entre ambos os resultados foi realizada e será apresentada mais à frente neste trabalho.



## 6.2. Bancada para Levantamento da Rigidez

Os testes foram executados empregando-se um mancal de dimensões e demais dados conforme a Tabela 6. 1.

<b>Objeto</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Rotor</b>	Material	Alumínio
	Diâmetro	33 mm
	Comprimento	50 mm
	Condutância	2,57E+7 S @ 30 °C
<b>Estator</b>	Material do ímã permanente	Nd-Fe-B @ N35
	Permeabilidade mag. rel.	1,09
	Campo remanente	1,18 T
	Material do concentrador	Aço SAE-1020
	Permeabilidade mag. rel.	4.000
	Altura do ímã	10 mm
	Altura do concentrador	5 mm
	Diâmetro interno	35 mm
	Diâmetro externo	55 mm

Tabela 6. 1: Parâmetros do EDB.

A bancada de testes foi montada com o auxílio de uma máquina fresadora CNC, o qual é capaz de realizar deslocamentos nos três eixos ortogonais. A máquina CNC possui ainda um motor com velocidade máxima de 18.000 rpm que foi utilizado para imprimir velocidade ao rotor do mancal. As medições das forças foram conferidas por uma célula de carga de seis eixos, que afere tanto as forças quanto os torques nos três eixos ortogonais. A célula de carga utilizada foi uma ATI Delta SI-660-60 cuja capacidade é de 660 N nos eixos x e y e 1.980 N no eixo z. Já o torque máximo é de 60 Nm. A aquisição dos dados foi realizada com um placa da National Instruments, modelo PCI-6220, e um programa desenvolvido em LabView processou esses dados.

A Figura 6. 4 apresenta um esquemático do sistema construído, onde pode-se ver o acoplamento produzido para a conexão entre o eixo do motor e do mancal, assim como os graus de liberdade de cada parte do sistema. Observa-se que o motor pode ser deslocado tridimensionalmente. No entanto, o deslocamento no eixo z (vertical) foi realizado apenas para o correto posicionamento do rotor. Já o deslocamento nos eixos x e y foram propostos para verificação da rigidez do mancal durante os testes. Portanto, na execução dos testes o rotor do mancal era deslocado enquanto o estator era mantido estático, através de um suporte, que o conectava à mesa do torno CNC.

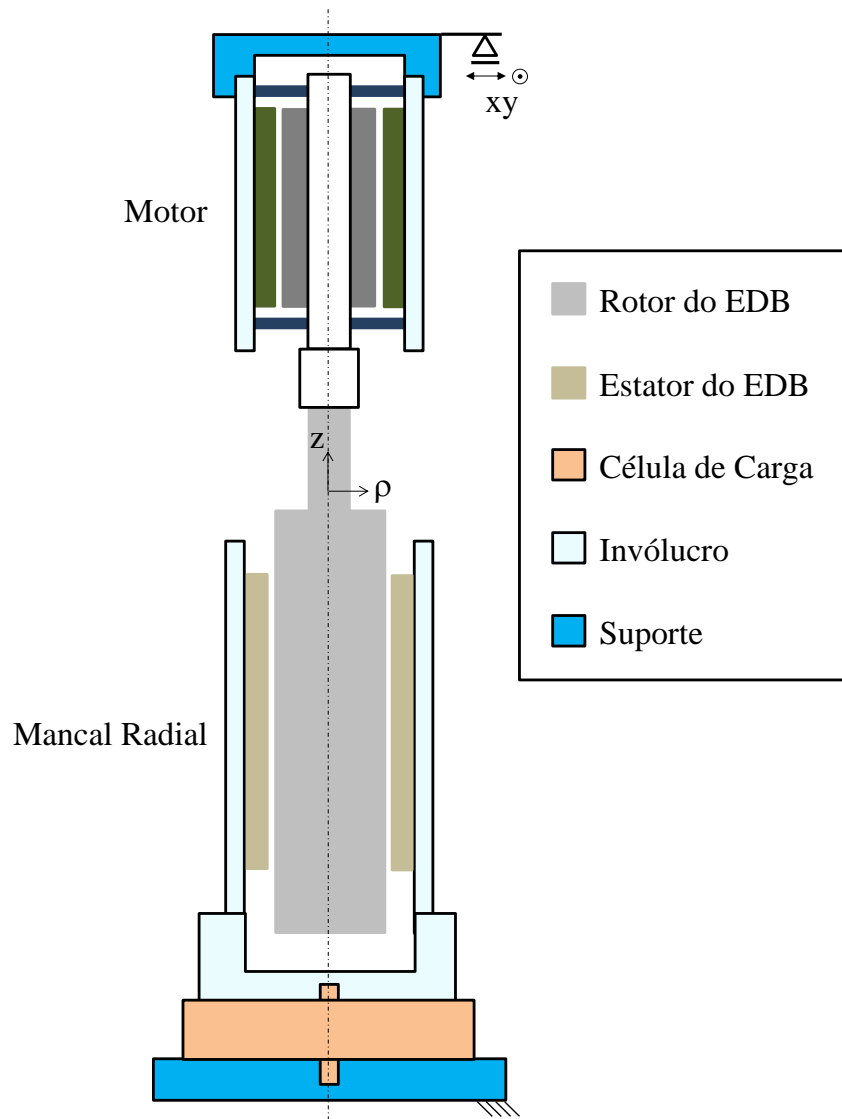


Figura 6. 4: Esquemático do teste experimental do EDB.

A fotografia da Figura 6. 5 mostra a bancada de testes representada pelo esquemático anterior. Na figura é possível observar a mesa onde a célula de carga foi fixada. Também é possível observar o rotor conectado ao motor da CNC, assim como a tela ao fundo, que é a interface para controle da posição do rotor. Já a aquisição dos dados foi realizada por um segundo computador, visto um pouco mais à esquerda. O controle da velocidade do rotor foi realizado por um inversor de frequência não mostrado na fotografia.

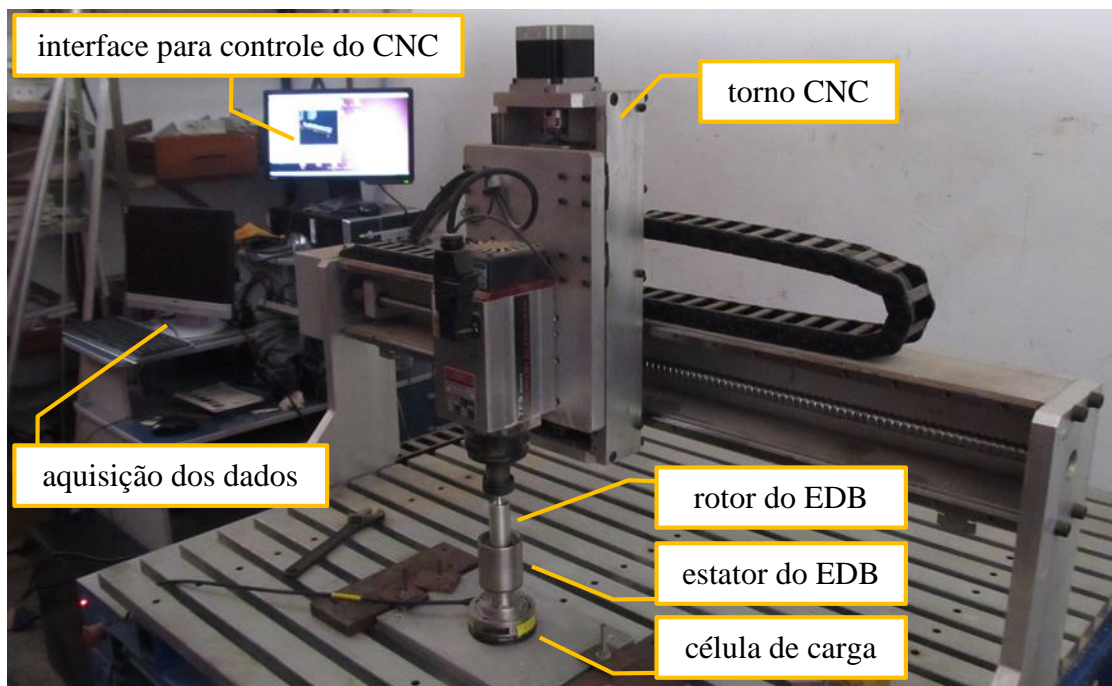


Figura 6. 5: Bancada experimental.

Na Figura 6. 6 podem ser vistos o rotor e o estator do EDB. Através da fotografia é possível ver alguns detalhes construtivos como os três ímãs permanentes que compõem o MM, além dos quatro concentradores de fluxo. Nota-se que os anéis concentradores de fluxo possuem a face externa rosqueável para que seja possível fixar os componentes do estator em uma determinada posição. Deve-se salientar que somente os concentradores de fluxo foram usinados na face externa, sendo os ímãs permanentes mantidos com as condições originais para que não sofressem danos mecânicos ou até mesmo perdas de suas características magnéticas. Já o suporte externo, rosqueável em sua face interna, foi elaborado em aço inoxidável antiferromagnético.

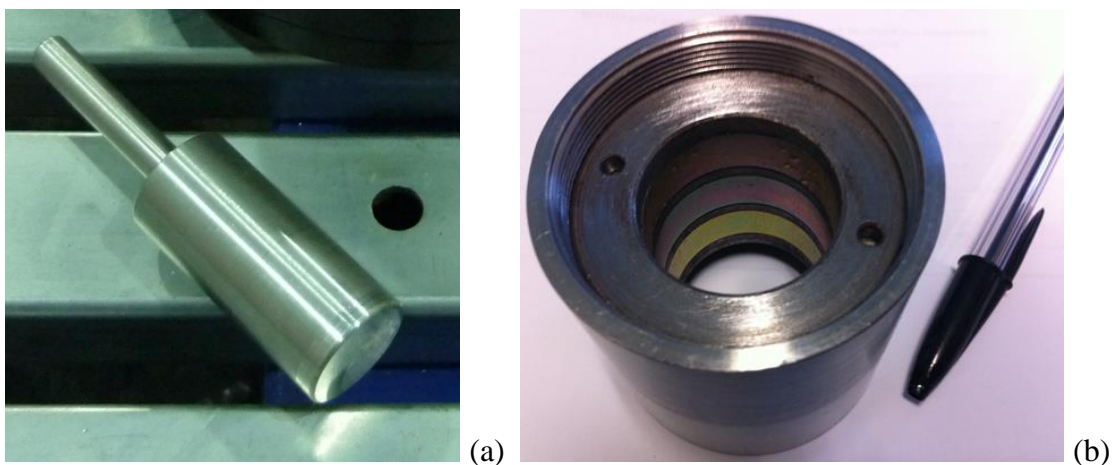


Figura 6. 6: (a) Rotor e (b) estator do mancal eletrodinâmico.

Antes do início dos testes, o rotor era posicionado no centro do estator. Para auxiliar nesta tarefa, um componente de teflon foi construído com um orifício que possuía exatamente o diâmetro do rotor. Para realizar o alinhamento, o componente era fixado no topo do estator e então o rotor era inserido no orifício, como mostra a Figura 6. 7 (a). Com isso, se sabia que o mesmo encontrava-se centralizado. Realizado o posicionamento xy, indicava-se no programa da CNC a posição nula para que fosse possível retornar a ela quando de interesse.

É importante destacar que o alinhamento foi possível porque a CNC possui uma resolução de 1  $\mu\text{m}$ . Embora uma precisão muito elevada não seja necessária visto que há imperfeições no alinhamento dos ímãs e concentradores de fluxo com ordem de grandeza superior a esse valor.

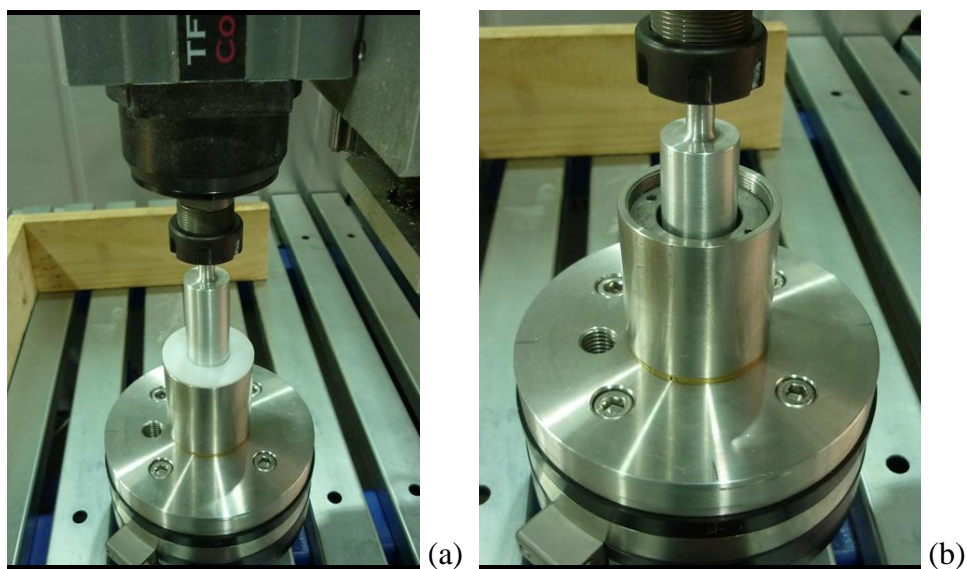


Figura 6. 7: Alinhamento do mancal.

## **6.3. Resultados e Discussões**

Neste item, serão finalmente apresentados os resultados encontrados após os testes com o mancal eletrodinâmico. Serão apresentados os dados obtidos do ensaio com o mancal para que sejam validadas as simulações computacionais e mostrado o comportamento deste tipo de mancal com a variação das condições operacionais. Logo em seguida serão apresentados os resultados obtidos para a otimização do referido objeto.

O procedimento dos experimentos consistia em deslocar o rotor lateralmente com passos de 100  $\mu\text{m}$  entre as posições -1,5 mm e 1,5 mm, tanto no eixo x quanto no eixo y. Tal procedimento foi realizado para diversas velocidades de rotação.

A seguir serão discutidos os primeiros resultados.

### **6.3.1. Sistema não-otimizado**

Os primeiros experimentos foram realizados com um mancal cujos parâmetros estão expostos na Tabela 6. 1. Os resultados apontam um comportamento linear das forças de acordo com a excentricidade, como pode ser visto na Figura 6. 8.

Na mesma figura, podem ser observadas diferentes curvas, obtidas para diversas velocidades angulares. Através deste resultado é possível verificar um excelente resultado oriundo do modelo numérico, já que as curvas são praticamente idênticas.

Deve-se lembrar que os experimentos foram limitados em 18.000 rpm por conta da velocidade nominal do motor do torno CNC.

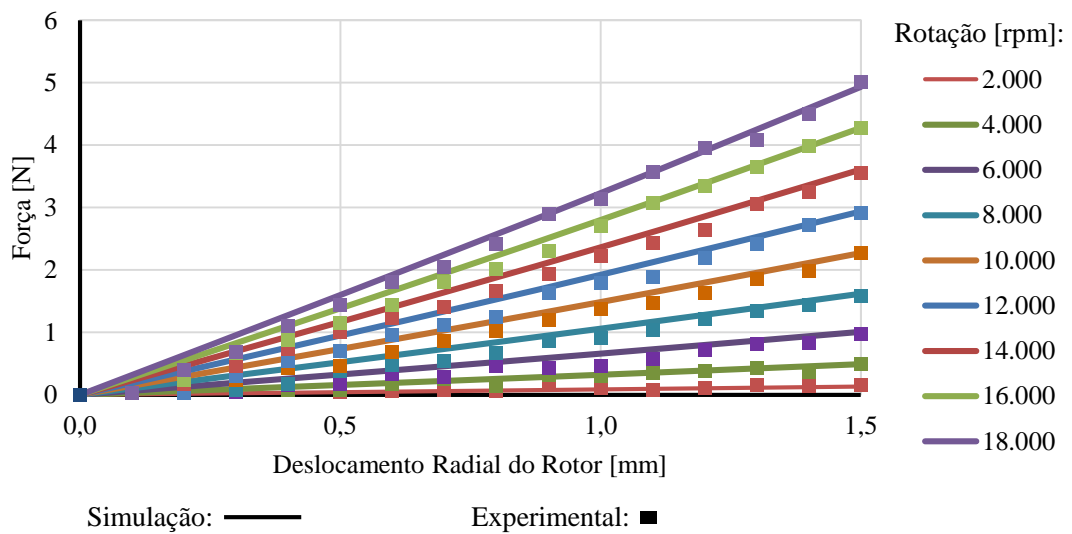


Figura 6. 8: Força centralizadora no EDB com a excentricidade.

Já os resultados para a força de arraste, apresentada na Figura 6. 9, possuem alguma discrepância entre os resultados simulados e medidos. Entretanto, dentro do tolerável (erro máximo de 19% para rotação de 2.000 rpm e excentricidade de 0,5 mm). Mais uma vez é observado o comportamento linear, o que faz concluir que a operação excêntrica está relacionada com a rigidez do mancal.

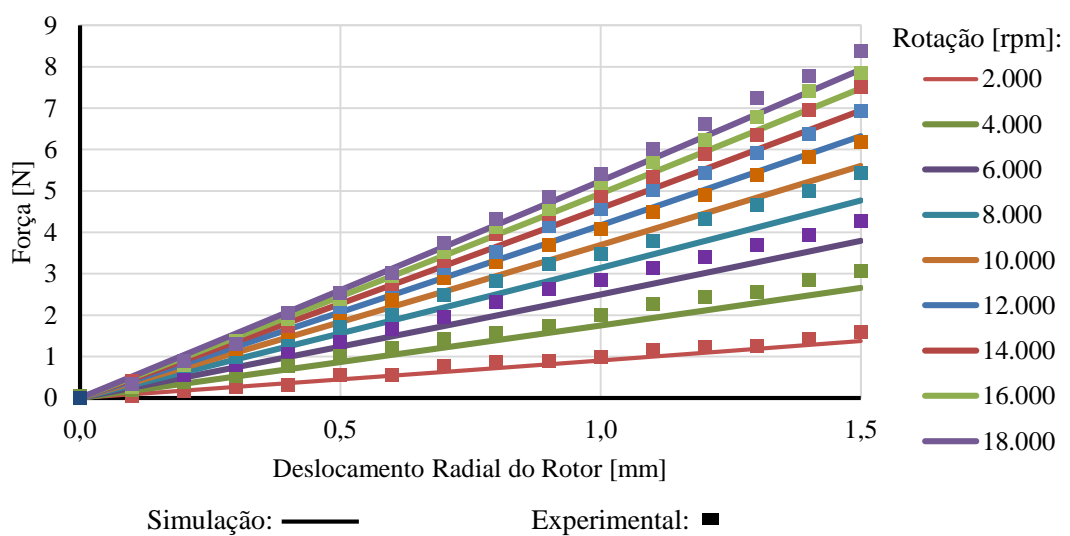


Figura 6. 9: Força de arraste no EDB com a excentricidade.

Embora a força possua comportamento linear quando apresentada em função da excentricidade, quando escrita em função da rotação é observado que o comportamento não segue a mesma característica. A Figura 6. 10 mostra de forma clara o comportamento em decorrência da velocidade angular, onde as forças se referem ao sistema de coordenadas da Figura 5. 6. Observa-se que as curvas são convergentes e, por este motivo, a força centralizadora deve superar a de arraste em algum ponto de rotação mais elevada. Este fato indica mais uma vez a necessidade de operação do EBD para altas rotações. Outro fato que pode ser recordado é a presença das forças apenas no momento em que há deslocamento e velocidade de rotação.

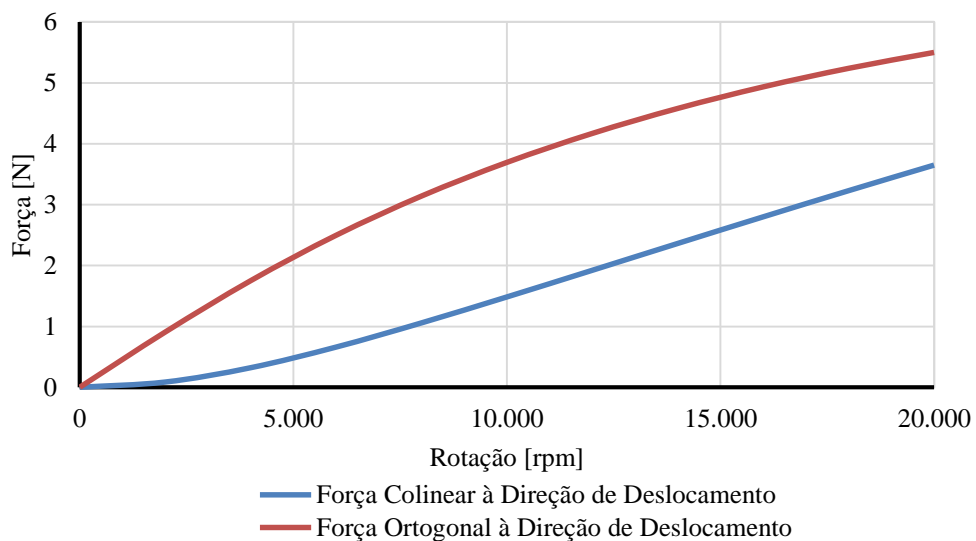


Figura 6. 10: Forças no EDB em função da rotação para uma excentricidade de 1 mm.

As perdas relacionadas às correntes parasitas no mancal se elevam exponencialmente tanto em função da rotação quanto da excentricidade. Isto porque quanto maior é o valor destas variáveis, maior é a variação do fluxo magnético no rotor. No entanto, quando o rotor se encontra centralizado, a indução de correntes é praticamente nula e as perdas são desprezíveis. É importante destacar que o centro magnético não é exatamente o centro geométrico do mancal e, desta forma, é justificada a presença das perdas nesta posição para um caso real.

Apesar da existência das perdas, se observa através da Figura 6. 11, que as associadas ao EDB podem ser bastante reduzidas com a adoção do sistema homopolar, pois partindo da premissa de que o mancal deve ser empregado principalmente em sistemas de elevada rotação e que o rotor deve operar próximo do centro, as perdas devem se situar próximas de zero. Lembrando ainda que estas perdas seriam basicamente convertidas em calor, o aquecimento poderia prejudicar o desempenho do sistema para as velocidades elevadas.

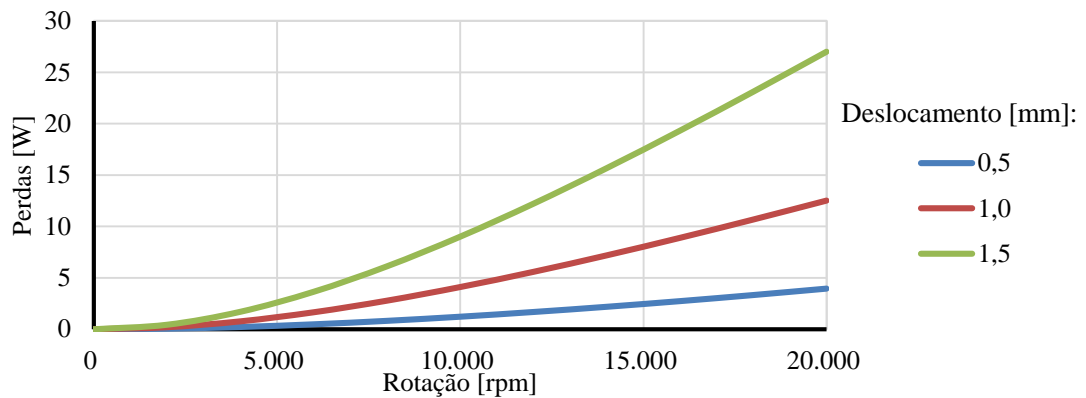


Figura 6. 11: Perdas Simuladas no EDB.

A Figura 6. 12 apresenta o comportamento da força centralizadora para diferentes rotações e velocidades radiais. Através dela é possível notar que a elevação da rotação traduz em uma redução da amplitude da força. Portanto, com uma prévia avaliação, se percebe que a parcela centralizadora do amortecimento será decrescente caso seja escrita em função da rotação.

É importante destacar que a simulação apresentada na Figura 6. 12 deve possibilitar a obtenção do amortecimento do EDB em função da velocidade angular, conforme detalhado no item 5.4 deste trabalho. Portanto, como as curvas do resultado a seguir são lineares, o valor máximo para a velocidade radial (1,0 m/s) foi escolhido arbitrariamente.

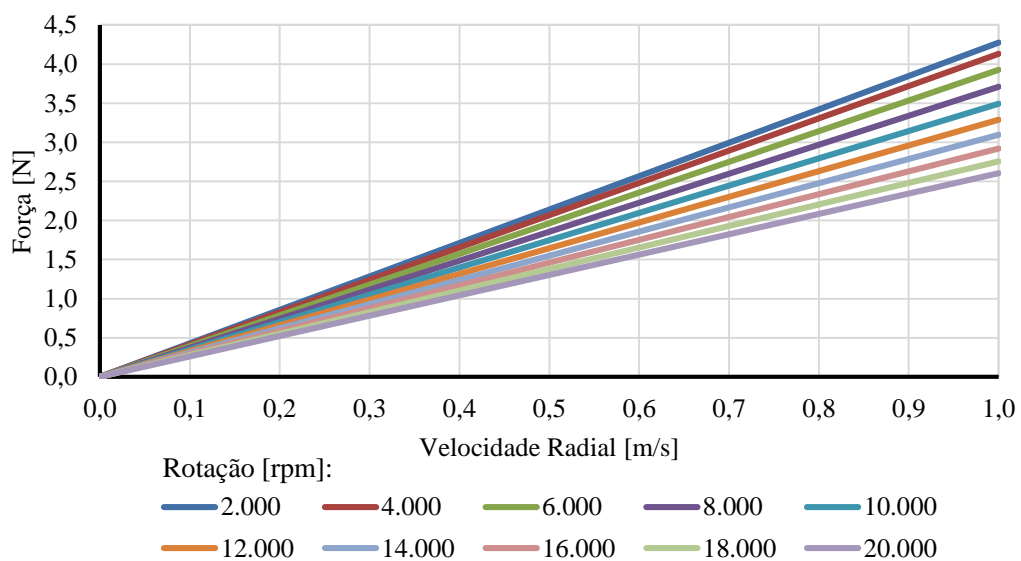


Figura 6. 12: Força centralizadora, colinear à direção de movimento do rotor do EDB em função da velocidade radial para o rotor centralizado.



Entretanto, ao contrário do que ocorre com a parcela centralizadora, a força de arraste se eleva em função da rotação, demonstrando que para elevadas rotações esta deve ser superior.

As curvas apresentadas na Figura 6. 13 possuem menor amplitude que as da Figura 6. 12, se comparadas para a mesma velocidade radial e rotacional. Um exemplo, seria o caso para uma velocidade radial de 1,0 m/s e rotação de 20.000 rpm, onde a parcela de arraste possui 1,72 N, enquanto a parcela centralizadora apresenta 2,60 N. Apesar disso, a parcela de arraste deve superar a parcela centralizadora para maiores rotações devido ao já citado fato de a primeira aumentar com a rotação e a segunda reduzir.

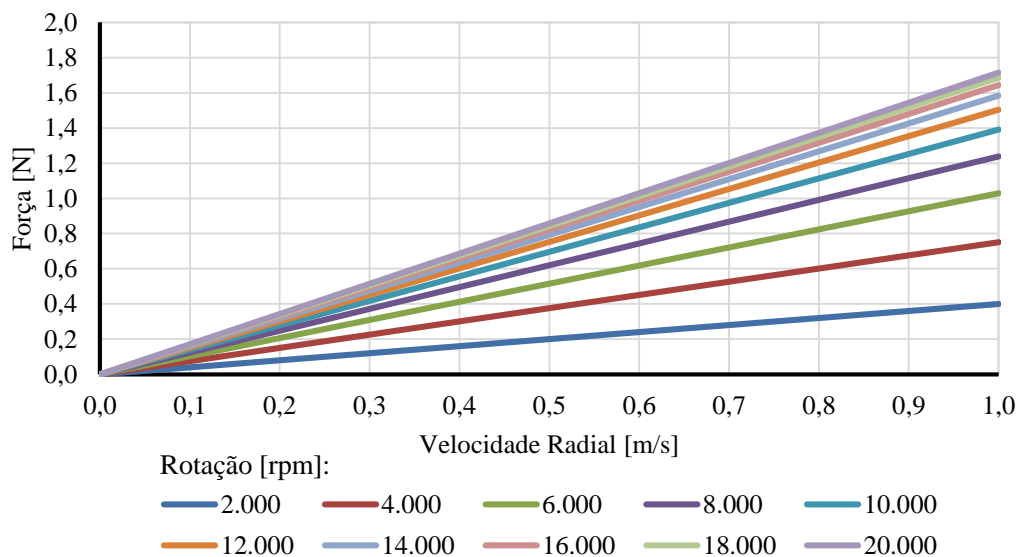


Figura 6. 13: Força de arraste, ortogonal à direção de movimento do rotor do EDB em função da velocidade radial.

### 6.3.2. Sistema otimizado

Neste item será apresentado o esforço realizado para o estabelecimento das dimensões necessárias à otimização da força centralizadora do mancal eletrodinâmico. A otimização foi procedida através de simulações numéricas, uma vez que foram validadas através do item anterior.

Na Figura 6. 15 são mostradas as curvas da força centralizadora do mancal, que agem na mesma direção do deslocamento do rotor. As curvas foram obtidas através da variação da largura do concentrador de fluxo, como ilustra a Figura 6. 14, onde  $l_c$  é a citada variável.

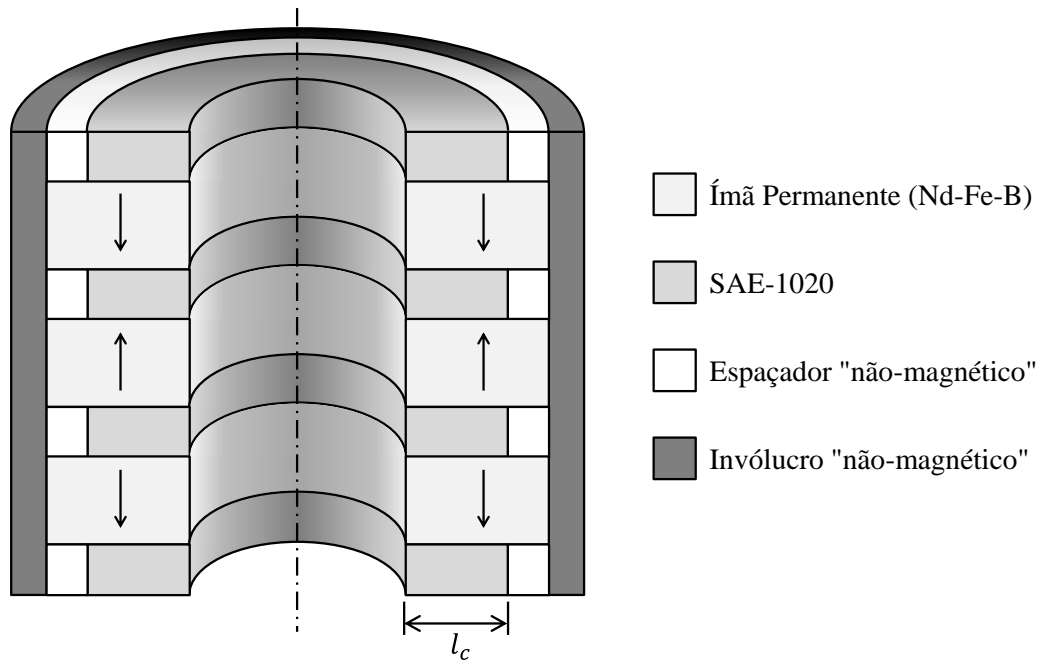


Figura 6. 14: Estator do mancal eletrodinâmico em corte.

As curvas da Figura 6. 15 foram obtidas via simulação numérica, enquanto a excentricidade do rotor era de 1,5 mm. Após encontradas as curvas para diversos valores de velocidade, foi constatado que a largura ótima do concentrador, ou seja, a largura para a qual a força centralizadora é máxima é de 5,67 mm.

É importante destacar que os resultados também foram obtidos para outros valores de excentricidade. Todavia, não foram apresentados, pois indicaram uma largura ótima para o concentrador de fluxo idêntica.

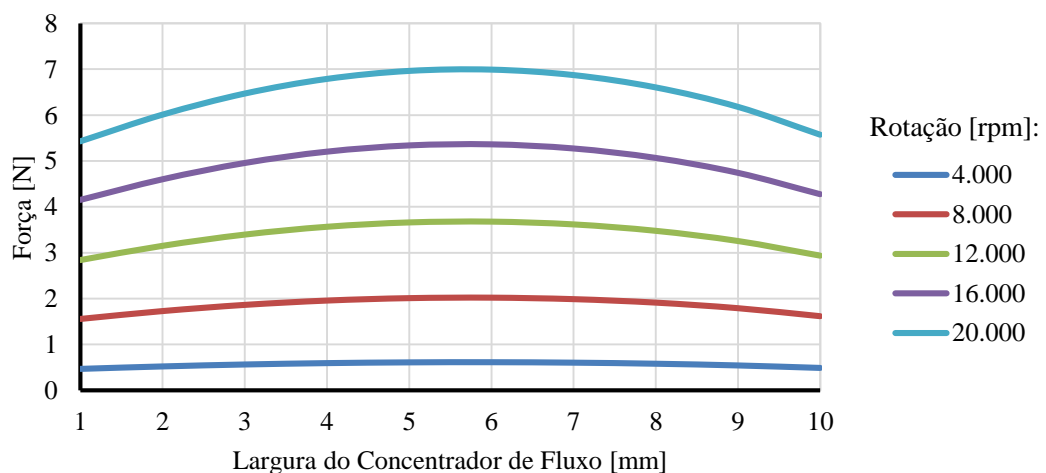


Figura 6. 15: Força centralizadora, colinear à direção de deslocamento para diferentes larguras do concentrador de fluxo com excentricidade de 1,5 mm.

Ao analisar a Figura 6. 16 percebe-se que a força centralizadora é maximizada assim como a força de arraste. Logo, verifica-se que a largura do concentrador somente deve ser escolhida com o objetivo de se empregar a rigidez centralizadora necessária ao sistema, pois a maximização da força centralizadora não implica na redução do “arraste”.

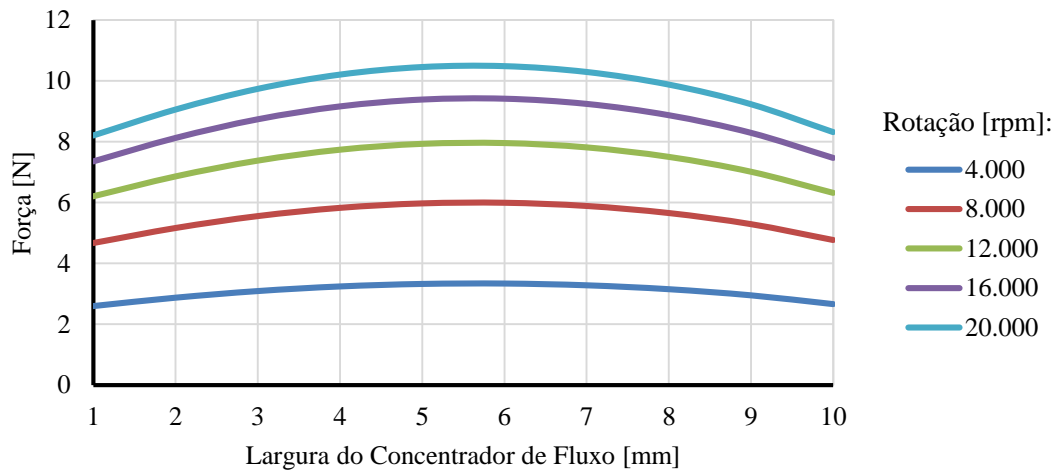


Figura 6. 16: Força de arraste, ortogonal à direção de deslocamento para diferentes larguras do concentrador de fluxo com excentricidade de 1,5 mm.

Após executada a otimização da largura do concentrador de fluxo, pode-se obter a largura do rotor que maximiza a força centralizadora do rotor. Para isso foram traçadas as curvas mostradas na Figura 6. 17, onde se tem a força centralizadora para diversos valores de rotação como função da largura do rotor.

Ao adotar como critério de parada uma variação da força inferior a 5%, a largura do rotor que maximiza a força centralizadora é de 9 mm. Embora este valor seja suficiente para a otimização da força, pode-se adotar larguras maiores que mesmo assim a força não será reduzida, conforme pode-se observar na Figura 6. 17. Em alguns casos, a adoção de uma largura superior como, por exemplo, 15 mm (rotor maciço) pode ser mais adequada para que o aquecimento do rotor seja reduzido e sua rigidez mecânica seja superior.

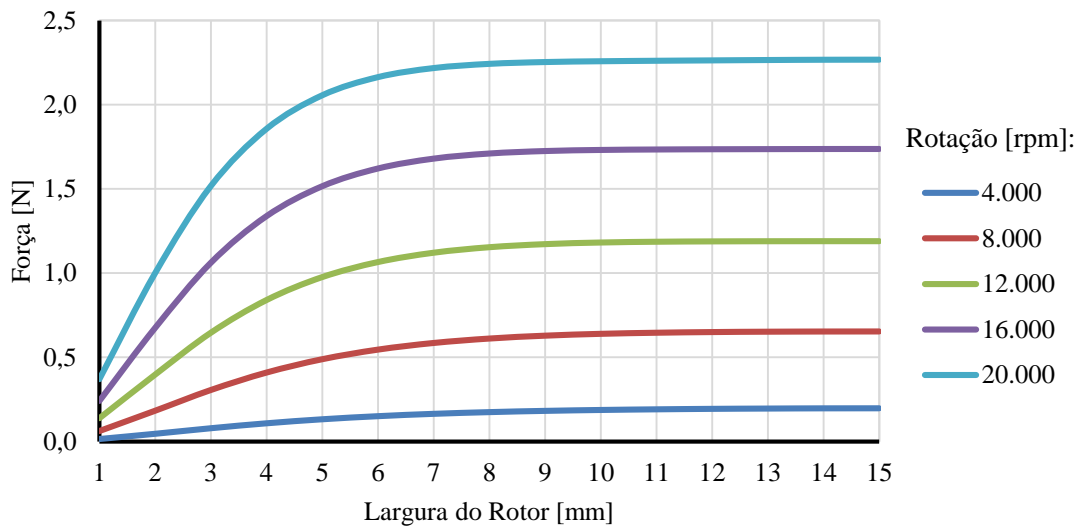


Figura 6. 17: Força centralizadora, colinear à direção de deslocamento para diferentes larguras do rotor para uma excentricidade de 0,5 mm.

Infelizmente não é possível maximizar a força centralizadora e minimizar a força de arraste simultaneamente. No entanto, conforme mostra a Figura 6. 18, esta força se limita a um valor aproximadamente constante para uma largura do rotor superior a 6 mm, ou seja, do ponto de vista da força de arraste, a opção por um rotor com largura entre 6 e 15 mm não seria significativa.

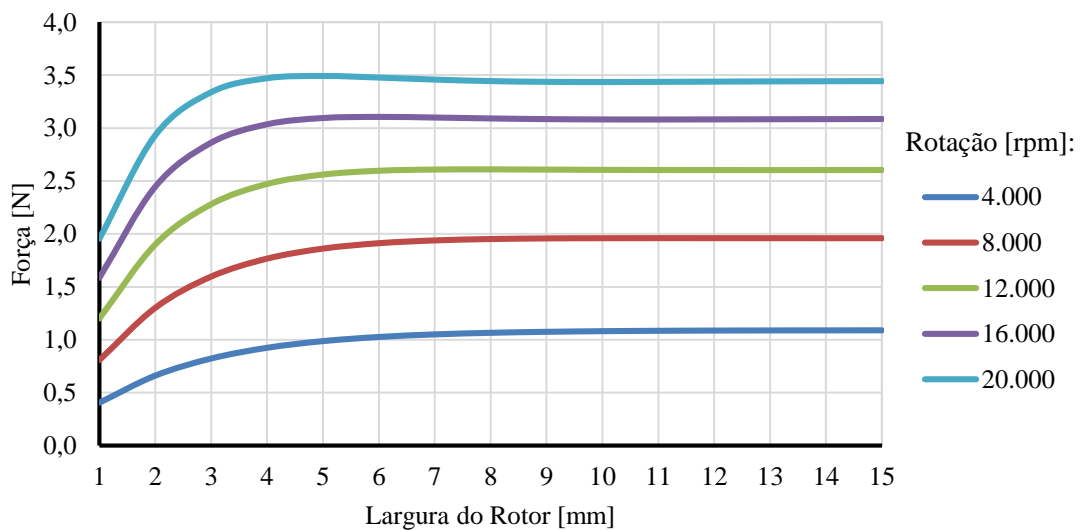


Figura 6. 18: Força de arraste, ortogonal à direção de deslocamento para diferentes larguras do rotor para uma excentricidade de 0,5 mm.

Na Figura 6. 19 é possível visualizar a rigidez do mancal eletrodinâmico otimizado, considerando a adoção de uma largura para o concentrador de fluxo de 6 mm, assim como uma largura do rotor de 9 mm. Ao comparar as curvas constata-se que o ajuste dos parâmetros representou em uma elevação de até 25% tanto no valor da rigidez centralizadora quanto de arraste.

Apesar das curvas apresentadas abaixo se limitarem a uma rotação de 20.000 rpm, projetando-se tais curvas através de uma equação de segunda ordem, encontra-se o cruzamento entre a rigidez centralizadora e de arraste para uma velocidade de 28.509 rpm Neste momento o mancal deve contribuir com uma rigidez 15,84 N/mm. Todavia, deve-se lembrar que a projeção não significa uma tendência real.

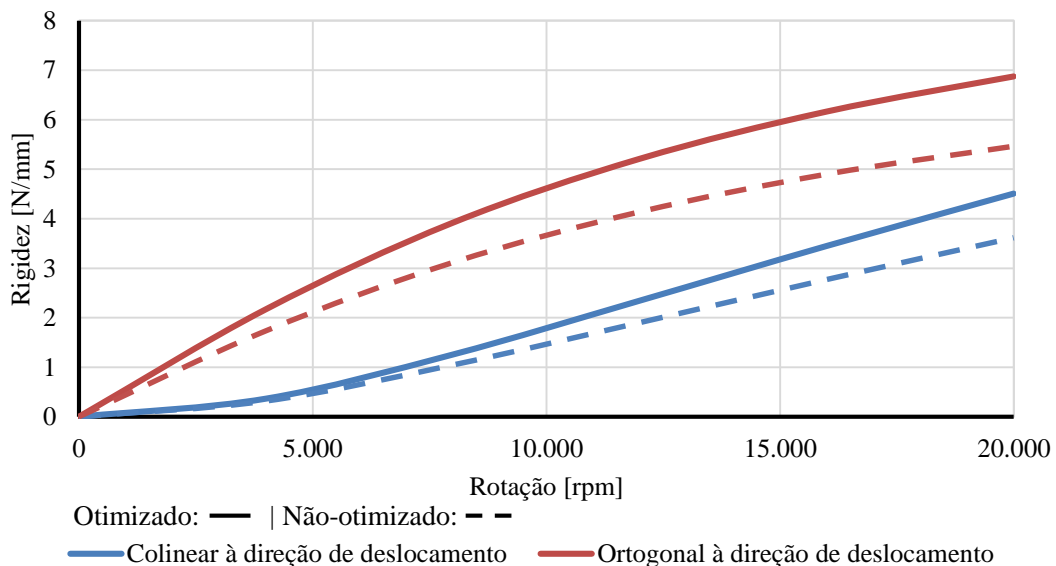


Figura 6. 19: Rigidez do EDB para um EDB otimizado (concentrador de fluxo com largura de 6 mm e largura do rotor de 9 mm) e não-otimizado.

Apesar da otimização dos concentradores de fluxo e da largura do rotor, não foi possível obter uma força centralizadora significativa no EDB homopolar radial, ou seja, que possa torná-lo um componente de aplicabilidade para a indústria. Como pode ser observado, a rigidez centralizadora máxima para o caso apresentado na Figura 6. 19 é de 4,5 N/mm; valor bastante inferior ao obtido nos mancais supercondutores ou convencionais com elementos rolantes, por exemplo. Portanto, seguem algumas recomendações de estudo futuro no próximo capítulo, as quais poderão contribuir para a obtenção de um mancal eletrodinâmico cuja rigidez e amortecimento devem ser elevados se comparados ao encontrado com o modelo proposto neste trabalho.

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o comportamento das forças de levitação eletrodinâmica, fundamentando teoricamente a origem do fenômeno, assim como mostrando a dependência das forças com algumas variáveis como a rotação, entreferro, material condutor, temperatura etc. Para consolidar algumas curvas analíticas, foram executados experimentos e simulações numéricas. Assim foi possível perceber a diferença entre cada um dos métodos, inclusive com a consideração de modelos computacionais bi e tridimensionais.

Através do conhecimento adquirido com o procedimento citado anteriormente, foi iniciado o projeto de um mancal eletrodinâmico homopolar radial baseado novamente em testes experimentais e computacionais. Com isso, foi encontrado um dimensionamento que otimiza a força centralizadora do rotor.

### 7.1. Conclusões Gerais

A apresentação do caso ímã-disco possibilitou um maior conhecimento do comportamento da levitação eletrodinâmica, sendo os resultados experimentais e numéricos encontrados semelhantes aos desenvolvidos de forma analítica, o que evidencia que este último método poderia ser aplicado em determinados casos. No entanto, o desenvolvimento constante dos computadores tem possibilitado o uso do cálculo numérico e atualmente muitos projetos são baseados nesta técnica. Ao considerar que a modelagem bidimensional pode ser elaborada em muitos casos, apesar de ser uma aproximação, e ainda possibilita resultados satisfatórios para velocidades elevadas, conforme apontado no item 4.3 deste trabalho, seguramente é uma boa opção para auxílio no dimensionamento do mancal ou de alguns sistemas de levitação.

Todavia, quando se trata de mancais radiais homopolares, por exemplo, a utilização de uma modelagem tridimensional é necessária e requer uma capacidade de processamento e memória de máquina superior à necessária em uma modelagem bidimensional.

Do ponto de vista construtivo, é atribuída uma grande vantagem aos mancais eletrodinâmicos, pois, conforme mostrado durante o trabalho, eles são constituídos com poucos elementos e, além disso, a usinagem de tais componentes é simples, sendo realizada basicamente com um torno. Em relação aos ímãs em anel, estes são encontrados com certa facilidade no mercado e disponibilizados em diversos tamanhos. Com isso, o projetista alcança alguma flexibilidade durante o dimensionamento do respectivo mancal. O aspecto negativo pode ser apontado nas opções de material a ser empregado no rotor. Conforme explicado durante o trabalho, o rotor deve possuir material condutor, o que pode gerar alguns problemas de origem mecânica. Os materiais condutores utilizados na construção de sistemas de levitação eletrodinâmica são, em geral, o alumínio ou o cobre.

Em relação às forças encontradas tanto na operação com excentricidade, quanto no momento em que havia velocidade radial, constatou-se que a ordem de grandeza era de unidades ou dezenas de newtons para os casos simulados, intensidade que pode ser considerada pequena se comparada a outros tipos de mancal como os mecânicos e até mesmo os magnéticos, no caso dos mancais magnéticos ativos apresentados no item 2.2 deste trabalho. Apesar disso, o emprego dos mancais eletrodinâmicos pode ser justificado em sistemas cuja massa a ser sustentada não seja elevada, como no caso de mancais radiais cujo motor opere na vertical ou o contrário, ou seja, no caso de mancais axiais na operação horizontal. O projeto do mancal deve considerar também aspectos como rigidez e amortecimento, os quais devem caracterizar tanto a estabilidade quanto a amplitude das vibrações encontradas no sistema. Portanto, pode-se pensar no uso dos mancais eletrodinâmicos em conjunto com outros tipos de mancais eletromagnéticos. Assim, a intensidade das forças pode ser elevada e mesmo assim ser obtido um sistema mancal com menor custo, se comparado à aplicação com um único tipo de mancal.

## 7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citadas:

a) Análise do comportamento dinâmico do mancal eletrodinâmico

Neste caso, poderia ser construída uma bancada de testes cuja posição do rotor fosse medida através de sensores. Assim, poderia ser avaliado o desempenho dinâmico do sistema mancal. Para auxiliar na análise, poderia ser elaborado um modelo numérico cujos parâmetros de rigidez e amortecimento seriam parametrizados previamente em função das variáveis envolvidas através das simulações pelo método dos elementos finitos.

b) Análise das forças axiais envolvidas no mancal eletrodinâmico homopolar radial

Ao observar a Figura 5. 1 (b), percebe-se que a movimentação axial do rotor também caracteriza uma variação de campo magnético em relação ao rotor. Portanto, haveria indução de correntes no rotor de forma a restringir o deslocamento axial.

Uma sugestão então seria avaliar o desempenho do EDB homopolar radial quanto ao movimento axial do rotor. Com isso, as características deste mancal poderiam ser consideradas no projeto do mancal axial, por exemplo.

c) Projeto de um mancal eletrodinâmico axial

O projeto de um mancal axial, além de possuir vasta aplicação em máquinas rotativas, pode ser extrapolado para deslocamentos lineares. Ou seja, trens de levitação eletrodinâmica. Portanto, poderiam ser avaliadas diversas topologias de forma a ser encontrado um mancal que maximize a força de levitação e minimize o arraste.

d) Projeto de um mancal eletrodinâmico com ímãs na configuração Halbach

A construção se faria através da disposição de ímãs permanentes na configuração Halbach, sendo encontrada a magnetização radial através do uso de pequenos blocos de ímãs. Por fim, poderia ser avaliado o comportamento deste mancal.



# Referências Bibliográficas

ABREU, I. F. N. *Modelagem Computacional de Motores de Indução Lineares pelo Método dos Elementos Finitos*, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro 2011.

DAVEY, K.; FILATOV, A.; THOMPSON, R. Design and Analysis of Passive Homopolar Null Flux Bearings, *IEEE Transactions on Magnets*, vol. 41, nº 3, pp. 1169-1175, 2005.

DAVID, D. F. B. *Levitação de Rotor por Mancais-Motores Radiais Magnéticos e Mancal Axial Supercondutor Auto-Estável*, Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro 2000.

EARNSHAW, S. On the nature of the molecular forces which regulate the construction of the luminiferous ether, *Transaction Cambridge Phil. Soc* 7, 1842.

FABRIZIO, I. *Electrodynamic Bearings – Modeling and Design*, Tese de Doutorado, Politecnico di Turino, Itália, Março 2010.

FILATOV, A.; MCMULLEN, P.; DAVEY, K.; THOMPSON, R. Flywheel Energy Storage System with Homopolar Electrodynamic Magnetic Bearing, *Tenth International Symposium on Magnetic Bearings*, Suíça, Agosto 2006.

- GOMES, R. R. *Motor Mancal com Controle Implementado em um DSP*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2007.
- HE, J. L.; ROTE, D. M.; COFFEY, H. T. *Study of Japanese Electrodynamic – Suspension Maglev Systems*, Center for Transportation Research Argonne National Laboratory, Abril 1994.
- HRIBAR, J. *Magnetic Braking*, Universidade de Ljubljana, Eslovênia, Abril 2008. Disponível em: <[http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007\\_2008/1-BRAKING\\_MAGNETIC.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/1-BRAKING_MAGNETIC.pdf)>. Acesso em: 04 Abril 2014.
- HULL, J. R. Topical Review – Superconducting Bearings, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. R1-R15, 2000.
- KAUSS, W. L. *Motor Mancal Magnético com Controle Ótimo Implementado em um DSP*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2008.
- KLUYSKENS, V.; DEHEZ, B. Dynamical Electromechanical Model for Magnetic Bearings Subject to Eddy Currents, *IEEE Transactions on Magnetics*. vol. 49, nº 4, pp. 1444-1452, 2013.
- KRIEZIS, E. E.; TSIBOUKIS, T. D.; PANAS, S. M.; TEGOPOULOS, J. A. Eddy Currents: Theory and Applications, *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, nº 10, pp. 1559-1589, 1992.
- LEMBKE, T. *Design and Analysis of a Novel Low Loss Homopolar Electrodynamic Bearing*, Tese de Doutorado, KTH Electrical Engineering, Suécia, Abril 2005.

LOPES, M. A.; SANTISTEBAN, J. A.; DEL NERO GOMES; A. C. *Controle Centralizado de Mancais Magnéticos com a Técnica LQR e Característica Integral*, XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, Setembro 2010.

MAY, H.; HOFFMAN, J.; CANDERS, W. R. Activation and Electro-dynamic Dampers, Key Technologies for the Operation of Superconducting Magnetic Bearings, *COMPEL*, vol. 28, nº 1, pp. 188-203, 2009.

MOTTA, E. S. *Otimização de Trilho Magnético de um Sistema de Levitação Supercondutora para Veículo Maglev*, Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro 2011.

RHODES, R. G.; MULHALL, B. E. *Magnetic Levitation for Rail Transport*. EUA: Oxford University Press, 1981.

RODRIGUES, L. S. *Controle Ótimo Descentralizado a Dois Parâmetros para Mancais-Motores Magnéticos*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril 2005.

RODRIGUEZ, E. F.; SANTISTEBAN, J. A.; NORONHA, R. F.; PAIVA, V. *Development of a Magnetically Borne Electrical Motor Prototype*, COBEM 2005 – 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, 2005.

RODRIGUEZ, E. F. *Observador de Estado para a Estimação de Posição em Mancais Magnéticos*, Dissertação de Mestrado, PGMEC, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

- RODRIGUEZ, E. F. *Uma Contribuição à Modelagem e Controle do Motor de Indução Suportado Magneticamente*, Tese de Doutorado, PGMEC, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- RODRIGUEZ, E. F.; STEPHAN, R. M. *Radial and axial forces of a passive magnetic bearing*. 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, Rio de Janeiro, Outubro 2013.
- SASS, F. *Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2011.
- SANDTNER, J.; BLEULER H. *Electrodynamic Passive Magnetic Bearing with Planar Halbach Arrays*, *Ninth Symposium on Magnetic Bearings*, EUA, Agosto 2004.
- SCHWEITZER, G.; BLEULER, H.; TRAXLER, A. *Active Magnetic Bearings: basics, properties and applications of active magnetic bearings*. Zürich: VDF, 2<sup>a</sup> ed., 2009.
- SINHA, P. K. *Electromagnetic Suspension: Dynamics & Control*. França: Peter Peregrinus, v. 30, Outubro 1987.
- SOTELO, G. G. *Comparação de Estruturas de Máquinas de Relutância Variável para Uso em Armazenador Cinético de Energia*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Fevereiro 2003.
- SOTELO, G. G. *Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos*, Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Maio 2007.

TAKANASHI, T.; MATSUYA, Y.; OHTSUKA, Y.; NISHIKAWA, M. Analysis of Magnetic Bearing Using Inductive Levitation by Relative Motion between Magnet and Conductor, *Electrical Engineering in Japan*. vol. 166, n° 4, pp. 1699-1705, 2009.

THOMPSON, M. T. Eddy Current Magnetic Levitation – Models and Experiments, *IEEE Potentials*, 2000.

THOMPSON, M. T. Electrodynamic Magnetic Suspension – Models, Scaling Laws, and Experimental Results, *IEEE Transactions on Education*, vol. 43, n° 3, pp. 336-342, 2000.

WERFEL, F. N.; FLOEGEL-DELOR, U.; ROTHFELD, R.; GOEBEL, B.; WIPPICH, D.; RIEDEL, T. Modelling and Construction of a Compact 500 kg HTS Magnetic Bearing, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. S19-S23, 2005.

# Apêndice A

## Cálculo da força em um MM

A seguir será equacionada a força magnética em um eletroímã, cujos valores são citados no item 2.2 deste trabalho. Os cálculos serão desenvolvidos para o eletroímã apresentado na Figura A. 1.

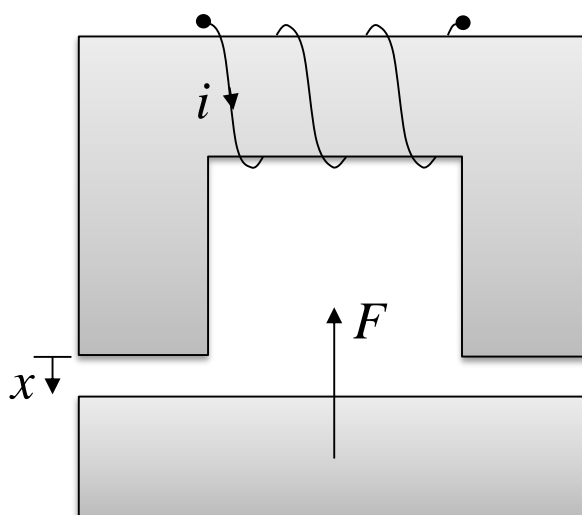


Figura A. 1: Eletroímã simplificado.

A energia armazenada no campo magnético pode ser expressa como:

$$W = \frac{1}{2} \int BHdV. \quad (\text{A.1})$$

Como  $B = \mu H$ ,

$$W = \frac{1}{2} \int \frac{B^2}{\mu_0} dV = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} 2xS = \frac{B^2}{\mu_0} xS. \quad (\text{A.2})$$

Do circuito magnético, tem-se que:

$$NI = \mathfrak{R} \phi, \quad (\text{A.3})$$

onde:

$$\mathfrak{R} = \frac{2x}{\mu_0 S} + \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}. \quad (\text{A.4})$$

Considerando  $\mu_r \gg 1$ ,

$$\mathfrak{R} = \frac{2x}{\mu_0 S}. \quad (\text{A.5})$$

Portanto, aplicando a Equação A.5 em A.3, encontra-se:

$$NI = \frac{2x}{\mu_0 S} \phi = \frac{2x}{\mu_0} B. \quad (\text{A.6})$$

Logo,

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{NI}{x}. \quad (\text{A.7})$$

Ao substituir a Equação A.7 em A.2,

$$W = \frac{\left(\frac{\mu_0}{2} \frac{NI}{x}\right)^2}{\mu_0} xS = \frac{\mu_0 S}{4} (NI)^2 \frac{1}{x}. \quad (\text{A.8})$$

Ao considerar que toda energia magnética pode ser convertida em trabalho, tem-se:

$$W = \int F dx \rightarrow F = \frac{dW}{dx}. \quad (\text{A.9})$$

Portanto, ao aplicar a Equação A.9 em A.8:

$$F = -\frac{\mu_0 S}{4} \left(\frac{NI}{x}\right)^2. \quad (\text{A.10})$$

# Apêndice B

## Código para simulação do EDB

A seguir é mostrado um dos códigos desenvolvido no programa COMSOL Multiphysics para a simulação numérica do mancal eletrodinâmico.

```
function out = model
%
% a.m
%
% Model exported on Sep 26 2013, 20:00 by COMSOL 4.3.1.161.
%
% =====

rpm = 4000:4000:20000; % Rotação [rpm]
tamrpm = size(rpm);
tamrpm = tamrpm(1,2);

DinRotor = 2:2:28; % Diâmetro [mm] / Passo de 1 mm na largura do ímã
(Variação entre 5 e 9 mm)
tamDinRotor = size(DinRotor);
tamDinRotor = tamDinRotor(1,2);

Deslocamento = 1.0; % Excentricidade do rotor [mm] (deslocamento no eixo x)
%
% =====

for j=1:tamDinRotor

import com.comsol.model.*
import com.comsol.model.util.*

model = ModelUtil.create('Model');

model.modelPath(['K:\Projeto - Manca Eletrodin'
native2unicode(hex2dec('00e2'), 'Cp1252') 'mico\Simula'
native2unicode(hex2dec('00e7'), 'Cp1252') native2unicode(hex2dec('00f5'),
'Cp1252') 'es - EDB']);

model.modelNode.create('mod1');

model.geom.create('geom1', 3);

model.mesh.create('mesh1', 'geom1');

model.physics.create('mef', 'ElectricInductionCurrents', 'geom1');
```



```

model.study.create('std1');
model.study('std1').feature.create('stat', 'Stationary');

model.param.set('DinRotor', [num2str(DinRotor(j)) '[mm]']);
model.param.set('D_Al', '30[mm]');
model.param.set('Din', '35[mm]');
model.param.set('Dinter', 'Din+6*2[mm]'); %Largura do concentrador de fluxo
model.param.set('Dext_Fe', '55[mm]');
model.param.set('Dext_Ima', '55[mm]');
model.param.set('Dext', '55[mm]');
model.param.set('H_Fe', '5[mm]');
model.param.set('H_Ima', '10[mm]');
model.param.set('Comp_Al', '40[mm]');
model.param.set('EspessuraAco', '4[mm]');
model.param.set('Deslocamento', [num2str(Deslocamento) '[mm]']);
model.param.set('Vlinear', '0[m/s]');
model.param.set('rpm', '10000[1/min]');
model.param.set('Wvel', '2*pi*rpm');

model.geom('geom1').feature.create('cyl1', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl1').set('r', 'DinRotor/2');
model.geom('geom1').feature('cyl1').set('h', 'Comp_Al');
model.geom('geom1').feature('cyl1').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').feature('cyl1').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').run('cyl1');
model.geom('geom1').feature.create('cyl2', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl2').set('r', 'D_Al/2');
model.geom('geom1').feature('cyl2').set('h', 'Comp_Al');
model.geom('geom1').feature('cyl2').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').feature('cyl2').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').run('cyl2');
model.geom('geom1').feature.create('cyl3', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl3').set('r', 'Din');
model.geom('geom1').feature('cyl3').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').feature('cyl3').setIndex('pos', 'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('cyl3').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').feature('cyl3').set('r', 'Din/2');
model.geom('geom1').run('cyl3');
model.geom('geom1').feature.create('cyl4', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl4').set('r', 'Dinter/2');
model.geom('geom1').feature('cyl4').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').feature('cyl4').setIndex('pos', 'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('cyl4').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').run('cyl4');
model.geom('geom1').feature.create('cyl5', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl5').set('r', 'Dext/2');
model.geom('geom1').feature('cyl5').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').feature('cyl5').setIndex('pos', 'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('cyl5').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').run('cyl5');
model.geom('geom1').feature.create('cyl6', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl6').set('r', 'Dext/2+EspessuraAco');
model.geom('geom1').feature('cyl6').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').feature('cyl6').setIndex('pos', 'Deslocamento', 0);

```

```

model.geom('geom1').feature('cyl6').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').run('cyl6');
model.geom('geom1').feature.create('cyl7', 'Cylinder');
model.geom('geom1').feature('cyl7').set('r', 'Dext+EspessuraAco');
model.geom('geom1').feature('cyl7').set('h', '2*(4*H_Fe+3*H_Ima)');
model.geom('geom1').feature('cyl7').setIndex('pos', 'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('cyl7').setIndex('pos', '-(4*H_Fe+3*H_Ima)',
2);
model.geom('geom1').run('cyl7');
model.geom('geom1').feature.create('wp1', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp1').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp1').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp1').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp1').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp1').geom.runAll;
model.geom('geom1').feature('wp1').set('quickz', '-(2*H_Fe+1.5*H_Ima)');
model.geom('geom1').run('wp1');
model.geom('geom1').feature.create('wp2', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp2').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp2').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp2').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp2').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp2').set('quickz', '-(H_Fe+1.5*H_Ima)');
model.geom('geom1').run('wp2');
model.geom('geom1').feature.create('wp3', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp3').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp3').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp3').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp3').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp3').set('quickz', '-(H_Fe+0.5*H_Ima)');
model.geom('geom1').run('wp3');
model.geom('geom1').feature.create('wp4', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp4').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp4').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp4').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp4').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp4').set('quickz', '-0.5*H_Ima');
model.geom('geom1').run('wp4');
model.geom('geom1').feature.create('wp5', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp5').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp5').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp5').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp5').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp5').set('quickz', '0.5*H_Ima');
model.geom('geom1').run('wp5');

```

```

model.geom('geom1').feature.create('wp6', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp6').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp6').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp6').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp6').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp6').set('quickz', 'H_Fe+0.5*H_Ima');
model.geom('geom1').run('wp6');
model.geom('geom1').feature.create('wp7', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp7').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp7').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp7').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp7').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp7').set('quickz', 'H_Fe+1.5*H_Ima');
model.geom('geom1').run('wp7');
model.geom('geom1').feature.create('wp8', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp8').geom.feature.create('sql', 'Square');
model.geom('geom1').feature('wp8').geom.feature('sql').set('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)');
model.geom('geom1').feature('wp8').geom.feature('sql').set('base',
'center');
model.geom('geom1').feature('wp8').geom.feature('sql').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp8').set('quickz', '2*H_Fe+1.5*H_Ima');
model.geom('geom1').run('wp8');
model.geom('geom1').feature.create('wp9', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp9').set('quickplane', 'yz');
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature.create('r1', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)/2-Din/2', 0);
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature('r1').set('base',
'corner');
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature('r1').setIndex('pos', '-
(2*(Dext+EspessuraAco)/2)', 0);
model.geom('geom1').feature('wp9').geom.feature('r1').setIndex('pos', '-
(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp9').set('quickx', 'Deslocamento');
model.geom('geom1').run('wp9');
model.geom('geom1').feature.create('wp10', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp10').set('quickplane', 'xz');
model.geom('geom1').feature('wp10').geom.feature.create('r1', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('wp10').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)', 0);
model.geom('geom1').feature('wp10').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp10').geom.feature('r1').setIndex('pos',
'Deslocamento', 0);
model.geom('geom1').feature('wp10').geom.feature('r1').set('base',
'center');
model.geom('geom1').run('wp10');
model.geom('geom1').feature.create('wp11', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp11').set('quickplane', 'yz');
model.geom('geom1').feature('wp11').geom.feature.create('r1', 'Rectangle');

```

```

model.geom('geom1').feature('wp11').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(Dext+EspessuraAco)/2-Din/2', 0);
model.geom('geom1').feature('wp11').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp11').geom.feature('r1').setIndex('pos',
'Din/2', 0);
model.geom('geom1').feature('wp11').geom.feature('r1').setIndex('pos', '-
(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp11').set('quickx', 'Deslocamento');
model.geom('geom1').run('wp11');
model.geom('geom1').feature.create('wp12', 'WorkPlane');
model.geom('geom1').feature('wp12').set('quickplane', 'yz');
model.geom('geom1').feature('wp12').geom.feature.create('r1', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('wp12').geom.feature('r1').setIndex('size',
'D_Al', 0);
model.geom('geom1').feature('wp12').geom.feature('r1').setIndex('size',
'2*(4*H_Fe+3*H_Ima)', 1);
model.geom('geom1').feature('wp12').geom.feature('r1').set('base',
'center');
model.geom('geom1').run('wp12');
model.geom('geom1').runAll();
model.geom('geom1').run();

model.selection.create('sel1', 'Explicit');
model.selection('sel1').set([57 58 61 62 65 66 69 70 191 193 195 197 200
202 204 206]);
model.selection.create('sel2', 'Explicit');
model.selection('sel2').set([41 42 49 50 59 60 67 68 183 187 192 196 201
205 210 214]);
model.selection.create('sel3', 'Explicit');
model.selection('sel3').set([45 46 63 64 185 194 203 212]);
model.selection.create('sel4', 'Explicit');
model.selection('sel4').set([21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 173
174 175 176 177 178 179 218 219 220 221 222 223 224]);
model.selection.create('sel5', 'Explicit');
model.selection('sel5').set([93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105
106 128 129 130 131 132 133 134 155 156 157 158 159 160 161]);

model.physics('mef').feature('alc1').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc1').set('sigma', {'1e-6' '0' '0' '0' '1e-
6' '0' '0' '0' '1e-6'});
model.physics('mef').feature('alc1').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc1').set('mur_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature.create('alc2', 'ElectromagneticModel', 3);
model.physics('mef').feature('alc2').selection.named('sel1');
model.physics('mef').feature('alc2').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc2').set('sigma', {'1.12e7' '0' '0' '0'
'1.12e7' '0' '0' '0' '1.12e7'});
model.physics('mef').feature('alc2').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc2').set('mur_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc2').set('mur', {'4000' '0' '0' '0' '4000'
'0' '0' '0' '4000'});
model.physics('mef').feature.create('alc3', 'ElectromagneticModel', 3);
model.physics('mef').feature('alc3').selection.named('sel2');
model.physics('mef').feature('alc3').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc3').set('sigma', {'1e-6' '0' '0' '0' '1e-
6' '0' '0' '0' '1e-6'});
model.physics('mef').feature('alc3').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc3').set('ConstitutiveRelationH', 1,
'RemanentFluxDensity');
model.physics('mef').feature('alc3').set('mur_mat', 1, 'userdef');

```

```

model.physics('mef').feature('alc3').set('mur', {'1' '0' '0' '0' '1' '0'
'0' '0' '1'});
model.physics('mef').feature('alc3').set('mur', 9, '1.090912873');
model.physics('mef').feature('alc3').set('Br', {'0' '0' '1.18'});
model.physics('mef').feature.create('alc4', 'ElectromagneticModel', 3);
model.physics('mef').feature('alc4').selection.named('sel3');
model.physics('mef').feature('alc4').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc4').set('sigma', {'1e-6' '0' '0' '0' '1e-
6' '0' '0' '0' '1e-6'});
model.physics('mef').feature('alc4').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc4').set('ConstitutiveRelationH', 1,
'RemanentFluxDensity');
model.physics('mef').feature('alc4').set('mur_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc4').set('mur', {'1' '0' '0' '0' '1' '0'
'0' '0' '1'});
model.physics('mef').feature('alc4').set('mur', 9, '1.090912873');
model.physics('mef').feature('alc4').set('Br', {'0' '0' '-1.18'});
model.physics('mef').feature.create('alc5', 'ElectromagneticModel', 3);
model.physics('mef').feature('alc5').selection.named('sel5');
model.physics('mef').feature('alc5').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc5').set('sigma', {'7.774e7*0.330031258'
'0' '0' '0' '7.774e7*0.330031258' '0' '0' '0' '7.774e7*0.330031258'});
model.physics('mef').feature('alc5').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc5').set('mur_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature.create('alc6', 'ElectromagneticModel', 3);
model.physics('mef').feature('alc6').selection.named('sel4');
model.physics('mef').feature('alc6').set('sigma_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc6').set('sigma', {'1e-6' '0' '0' '0' '1e-
6' '0' '0' '0' '1e-6'});
model.physics('mef').feature('alc6').set('epsilon_r_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature('alc6').set('mur_mat', 1, 'userdef');
model.physics('mef').feature.create('vlt1', 'Velocity', 3);
model.physics('mef').feature('vlt1').selection.named('sel5');
model.physics('mef').feature('vlt1').set('v', {'-Wvel*y' 'Wvel*x' '0'});
model.physics('mef').feature.create('fcall', 'ForceCalculation', 3);
model.physics('mef').feature('fcall').selection.named('sel5');
model.physics('mef').feature('fcall').set('ForceName', 1, 'Fmx1');

model.cpl.create('intop1', 'Integration', 'geom1');
model.cpl('intop1').selection.named('sel5');

model.variable.create('var1');
model.variable('var1').set('Perdas', 'mod1.intop1(mef.Qh)');
model.variable('var1').set('FLx', 'mod1.intop1(mef.FLTzx)');
model.variable('var1').set('FLy', 'mod1.intop1(mef.FLTzy)');
model.variable('var1').set('FLz', 'mod1.intop1(mef.FLTzz)');

model.mesh('mesh1').feature('size').set('hauto', '5');
model.mesh('mesh1').feature.create('map1', 'Map');
model.mesh('mesh1').feature('map1').selection.set([62 63 109 110 156 157
203 204 502 530 558 586 623 651 679 707]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis1').selection.set([611
783]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis1').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis1').set('elemcount', '6');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis1').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis2', 'Distribution');

```

```

model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis2').selection.set([186
563]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis2').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis2').set('elemcount', '6');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis2').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis2').set('reverse', 'on');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis3', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis3').selection.set([640
802]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis3').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis3').set('elemcount', '4');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis3').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis4', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').selection.set([147
534]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').set('elemcount', '4');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').set('method',
'arithmetic');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis4').set('reverse', 'on');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis5', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis5').selection.set([669
821]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis5').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis5').set('elemcount', '5');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis5').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis5').set('method',
'arithmetic');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis6', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').selection.set([108
505]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').set('elemcount', '5');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').set('method',
'arithmetic');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis6').set('reverse', 'on');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis7', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis7').selection.set([698
840]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis7').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis7').set('elemcount', '5');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis7').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis7').set('method',
'arithmetic');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature.create('dis8', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').selection.set([61
476]);
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').set('type',
'predefined');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').set('elemcount', '5');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').set('elemratio', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').set('method',
'arithmetic');

```

```

model.mesh('mesh1').feature('map1').feature('dis8').set('reverse', 'on');

model.mesh('mesh1').feature.create('map2', 'Map');
model.mesh('mesh1').feature('map2').selection.set([250 251]);
model.mesh('mesh1').feature('map2').feature.create('size1', 'Size');
model.mesh('mesh1').feature('map2').feature('size1').set('hauto', '1');
model.mesh('mesh1').feature('map2').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map2').feature('dis1').selection.set([225
764]);
model.mesh('mesh1').feature('map2').feature('dis1').set('numelem', '10');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe1', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe1').selection.set([17 18 35 36 53 54 71 72
89 90 171 180 189 198 207 216 225 234]);
model.mesh('mesh1').feature('swe1').selection('sourceface').set([62 63 109
110 156 157 203 204 250 251 502 530 558 586 623 651 679 707]);
model.mesh('mesh1').feature('swe1').selection('targetface').set([60 61 107
108 154 155 201 202 248 249 500 529 557 585 622 650 678 706]);
model.mesh('mesh1').feature('swe1').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe1').feature('dis1').set('numelem', '4');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe2', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe2').selection.set([15 16 33 34 51 52 69 70
87 88 170 179 188 197 206 215 224 233]);
model.mesh('mesh1').feature('swe2').selection('sourceface').set([60 61 107
108 154 155 201 202 248 249 500 529 557 585 622 650 678 706]);
model.mesh('mesh1').feature('swe2').selection('targetface').set([54 55 102
103 149 150 196 197 243 244 496 526 554 582 619 647 675 703]);
model.mesh('mesh1').feature('swe2').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe2').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe3', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe3').selection.set([13 14 31 32 49 50 67 68
85 86 169 178 187 196 205 214 223 232]);
model.mesh('mesh1').feature('swe3').selection('sourceface').set([54 55 102
103 149 150 196 197 243 244 496 526 554 582 619 647 675 703]);
model.mesh('mesh1').feature('swe3').selection('targetface').set([48 49 97
98 144 145 191 192 238 239 492 523 551 579 616 644 672 700]);
model.mesh('mesh1').feature('swe3').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe3').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe4', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe4').selection.set([11 12 29 30 47 48 65 66
83 84 168 177 186 195 204 213 222 231]);
model.mesh('mesh1').feature('swe4').selection('sourceface').set([48 49 97
98 144 145 191 192 238 239 492 523 551 579 616 644 672 700]);
model.mesh('mesh1').feature('swe4').selection('targetface').set([42 43 92
93 139 140 186 187 233 234 488 520 548 576 613 641 669 697]);
model.mesh('mesh1').feature('swe4').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe4').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe5', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe5').selection.set([9 10 27 28 45 46 63 64
81 82 167 176 185 194 203 212 221 230]);
model.mesh('mesh1').feature('swe5').selection('sourceface').set([42 43 92
93 139 140 186 187 233 234 488 520 548 576 613 641 669 697]);
model.mesh('mesh1').feature('swe5').selection('targetface').set([36 37 87
88 134 135 181 182 228 229 484 517 545 573 610 638 666 694]);
model.mesh('mesh1').feature('swe5').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe5').feature('dis1').set('numelem', '5');

```

```

model.mesh('mesh1').feature.create('swe6', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe6').selection.set([7 8 25 26 43 44 61 62 79
80 166 175 184 193 202 211 220 229]);
model.mesh('mesh1').feature('swe6').selection('sourceface').set([36 37 87
88 134 135 181 182 228 229 484 517 545 573 610 638 666 694]);
model.mesh('mesh1').feature('swe6').selection('targetface').set([30 31 82
83 129 130 176 177 223 224 480 514 542 570 607 635 663 691]);
model.mesh('mesh1').feature('swe6').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe6').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe7', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe7').selection.set([5 6 23 24 41 42 59 60 77
78 165 174 183 192 201 210 219 228]);
model.mesh('mesh1').feature('swe7').selection('sourceface').set([30 31 82
83 129 130 176 177 223 224 480 514 542 570 607 635 663 691]);
model.mesh('mesh1').feature('swe7').selection('targetface').set([24 25 77
78 124 125 171 172 218 219 476 511 539 567 604 632 660 688]);
model.mesh('mesh1').feature('swe7').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe7').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe8', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe8').selection.set([3 4 21 22 39 40 57 58 75
76 164 173 182 191 200 209 218 227]);
model.mesh('mesh1').feature('swe8').selection('sourceface').set([24 25 77
78 124 125 171 172 218 219 476 511 539 567 604 632 660 688]);
model.mesh('mesh1').feature('swe8').selection('targetface').set([1 2 19 20
37 38 55 56 73 74 163 172 181 190 199 208 217 226]);
model.mesh('mesh1').feature('swe8').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe8').feature('dis1').set('numelem', '5');

model.mesh('mesh1').feature.create('swe9', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe9').selection.set([1 2 19 20 37 38 55 56 73
74 163 172 181 190 199 208 217 226]);
model.mesh('mesh1').feature('swe9').selection('sourceface').set([18 19 72
73 119 120 166 167 213 214 472 508 536 564 601 629 657 685]);
model.mesh('mesh1').feature('swe9').selection('targetface').set([12 13 67
68 114 115 161 162 208 209 469 505 533 561 598 626 654 682]);
model.mesh('mesh1').feature('swe9').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('swe9').feature('dis1').set('numelem', '4');

model.mesh('mesh1').feature.create('map3', 'Map');
model.mesh('mesh1').feature('map3').selection.set([252 257 262 267 272 277
282 287 292 300 305 310 315 320 325 330 335 340 346 349 352 355 358 361 364
367 370 374 377 380 383 386 389 392 395 398 402 403 405 406 408 409 411 412
414 415 417 418 420 421 423 424 426 427 430 433 436 439 442 445 448 451 454
725 726 727 728 729 730 731 732 733]);
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature.create('size1', 'Size');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('size1').set('hauto', '1');

model.mesh('mesh1').feature('map3').feature.create('dis1', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis1').selection.set([264
420]);
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis1').set('type', 'number');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis1').set('numelem',
num2str(15-j));
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature.create('dis2', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis2').selection.set([333
745]);

```



```

model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis2').set('type', 'number');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis2').set('numelem',
num2str(15-j));
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature.create('dis3', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis3').selection.set([304
391]);
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis3').set('type', 'number');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis3').set('numelem',
num2str(j));
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature.create('dis4', 'Distribution');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis4').selection.set([362
392]);
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis4').set('type', 'number');
model.mesh('mesh1').feature('map3').feature('dis4').set('numelem',
num2str(j));

model.mesh('mesh1').feature.create('swe10', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe10').selection.set([91 92 93 94 95 96 97 98
99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 127 128 129 130 131 132 133 134 135
154 155 156 157 158 159 160 161 162]);
model.mesh('mesh1').feature('swe10').selection('sourceface').set([346 349
352 355 358 361 364 367 370 430 433 436 439 442 445 448 451 454]);
model.mesh('mesh1').feature('swe10').selection('targetface').set([252 257
262 267 272 277 282 287 292 725 726 727 728 729 730 731 732 733]);

model.mesh('mesh1').feature.create('swe11', 'Sweep');
model.mesh('mesh1').feature('swe11').selection('sourceface').set([374 377
380 383 386 389 392 395 398 402 405 408 411 414 417 420 423 426]);
model.mesh('mesh1').feature('swe11').selection('targetface').set([300 305
310 315 320 325 330 335 340 403 406 409 412 415 418 421 424 427]);

model.mesh('mesh1').run;

model.sol.create('soll');

model.result.export.create('data1', 'Data');
model.result.export('data1').set('expr', {'Deslocamento' 'rpm' 'Perdas'
'FLx' 'FLy' 'mef.Forcex_Fmxl' 'mef.Forcey_Fmxl' 'mef.Tz_Fmxl'});
model.result.export('data1').set('descr', {'Deslocamento' 'Velocidade'
'Perdas' 'FLx' 'FLy' 'FMaxwell_x' 'FMaxwell_y' 'TFMaxwellz'});

for i=1:tamrpm

model.param.set('rpm', [num2str(rpm(i)) '[1/min]']);
model.param.set('Wvel', '2*pi*rpm');

model.sol('soll').study('std1');
model.sol('soll').feature.create('st1', 'StudyStep');
model.sol('soll').feature('st1').set('study', 'std1');
model.sol('soll').feature('st1').set('studystep', 'stat');
model.sol('soll').feature.create('v1', 'Variables');
model.sol('soll').feature('v1').set('control', 'stat');
model.sol('soll').feature.create('s1', 'Stationary');
model.sol('soll').feature('s1').feature.create('fc1', 'FullyCoupled');
model.sol('soll').feature('s1').feature.create('il', 'Iterative');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').set('prefuntype', 'left');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').set('maxlinit', 10000);
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').set('linsolver', 'fgmres');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').set('rhob', 400);

```

```

model.sol('soll').feature('sl').feature('fc1').set('linsolver', 'il');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature.create('mg1',
'Multigrid');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('amgauto',
3);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('scale',
2);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('gmglevels',
1);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('massem',
true);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('rmethod',
'longest');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('mkeep',
false);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('mgcycle',
'v');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('prefun',
'gmg');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('mcasegen',
'any');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('mglevels',
5);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('iter',
2);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').set('maxcoarse
dof', 5000);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('pr').
feature.create('sol', 'SOR');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('pr').
feature('sol').set('sorblocked', true);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('pr').
feature('sol').set('relax', 1);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('pr').
feature('sol').set('iter', 2);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('pr').
feature('sol').set('prefun', 'sor');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('po').
feature.create('sol', 'SOR');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('po').
feature('sol').set('sorblocked', true);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('po').
feature('sol').set('relax', 1);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('po').
feature('sol').set('iter', 2);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('po').
feature('sol').set('prefun', 'soru');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature.create('kp1', 'KrylovPreconditioner');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('itrestart', 50);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('iterm', 'tol');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('prefuntype', 'right');
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('itol', 0.1);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('maxlinit', 500);
model.sol('soll').feature('sl').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('iter', 10);

```

```

model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('prefun', 'bicgstab');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').set('errorchk', 'auto');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').feature.create('sol', 'SOR');
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').feature('sol').set('sorblocked', true);
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').feature('sol').set('relax', 1);
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').feature('sol').set('iter', 2);
model.sol('soll').feature('s1').feature('il').feature('mg1').feature('cs').
feature('kp1').feature('sol').set('prefun', 'ssor');
model.sol('soll').feature('s1').feature.remove('fcDef');
model.sol('soll').attach('std1');
model.sol('soll').runAll;

model.result.export('data1').set('filename', ['C:\SimCOMSOL\2
Resultados\W=' num2str(rpm(i)) 'rpm & EspRotor=' num2str((30-
DinRotor(j))/2) ' mm & Exc=' num2str(Deslocamento) 'mm.txt']);
model.result.export('data1').set('level', 'point');
model.result.export('data1').run;

model.sol('soll').feature.remove('s1');
model.sol('soll').feature.remove('v1');
model.sol('soll').feature.remove('st1');

end

end

out = model;

```