



ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS EM ANEL PARA MANCAL MAGNÉTICO AXIAL PASSIVO

Henrique Adolfo Monteiro Calil

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

Orientador: Fernando Augusto de Noronha
Castro Pinto

Rio de Janeiro
Setembro de 2020

ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS EM ANEL PARA MANCAL
MAGNÉTICO AXIAL PASSIVO

Henrique Adolfo Monteiro Calil

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

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Aprovada por: Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto
Prof. Max Suell Dutra
Prof. Elkin Ferney Rodriguez Velandia
Prof. Wallace Moreira Bessa

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2020

Calil, Henrique Adolfo Monteiro

Estudo Comparativo de Topologias em Anel para Mancal Magnético Axial Passivo/Henrique Adolfo Monteiro Calil. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIV, 76 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro
Pinto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 61 – 65.

1. mancal axial. 2. mancal magnético. 3. Ímã Permanente. I. Pinto, Fernando Augusto de Noronha Castro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família, pelo apoio e compromisso em incentivar minha educação desde a minha infância. Agradeço aos Professores desta Universidade que me inspiraram a desenvolver o trabalho desta dissertação. Agradeço também ao meu orientador pela paciência e disponibilidade para conselhos e trocas ao longo da minha trajetória acadêmica.

Finalmente e mais importante, agradeço à minha esposa, Lucia, por todo companheirismo e parceria em todas as minhas empreitadas. Foram muitos os momentos tensos e de angústia durante esse mestrado, em que sempre pude contar com o seu apoio incondicional. Sou para sempre grato.

Muito obrigado!

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

ESTUDO COMPARATIVO DE TOPOLOGIAS EM ANEL PARA MANCAL
MAGNÉTICO AXIAL PASSIVO

Henrique Adolfo Monteiro Calil

Setembro/2020

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Programa: Engenharia Mecânica

Apresenta-se, nesta dissertação, um estudo comparativo de topologias de mancal magnético axial passivo encontradas na literatura, sobretudo sob seu desempenho mecânico. As topologias diferem principalmente na direção de magnetização dos ímãs permanentes. São preparados modelos numéricos pelo método de elementos finitos e, ao fim do trabalho, é proposto um projeto mecânico para implementação de uma dessas topologias de mancal magnético axial para uma bancada de levitação magnética instalada em laboratório.

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

COMPARATIVE STUDY ON PASSIVE THRUST MAGNETIC BEARING RING TOPOLOGIES

Henrique Adolfo Monteiro Calil

September/2020

Advisor: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Department: Mechanical Engineering

In this work, a comparative study of ring topologies for Passive Thrust Magnetic Bearings is presented. The topologies are compared according to the bearing's mechanical characteristics. Numerical models have been elaborated for finite element method computations. Based on the simulation results, a bearing topology is picked for implementation in an existing laboratory-scale magnetic levitating testbench for rotordynamic studies. Lastly, a detailed mechanical implementation design for the passive bearing is presented.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
2 Introdução a Mancais Magnéticos	4
2.1 Mancais magnéticos na engenharia	4
2.2 Materiais Magnéticos	6
2.2.1 Magnetização	7
2.3 Eletromagnetismo	11
2.4 Interação entre dois Ímãs Permanentes	13
2.4.1 Atração entre ímãs cilíndricos	14
3 Aspectos Mecânicos dos Mancais Magnéticos	18
3.1 Tipos de Mancais	18
3.1.1 Mancais Com Contato Mecânico	18
3.1.2 Mancais Sem Contato Mecânico	20
3.2 Dinâmica do Rotor	21
3.2.1 Equações de movimento	21
3.2.2 Desbalanceamento Estático	23
3.2.3 Desbalanceamento Dinâmico	24
3.3 Força e Rigidez	26
4 Modelos Computacionais	27
4.1 Modelos Numéricos	27
4.2 Topologias Estudadas	30
4.2.1 Magnetização Axial	31
4.2.2 Magnetização Radial	37
4.2.3 Sumário Comparativo – Estudos Paramétricos	46

5	Projeto de um Mancal Magnético Axial Passivo	50
5.1	Topologia Escolhida	50
5.1.1	Desempenho Mecânico e Modelo Matemático	51
5.2	Projeto Mecânico	57
6	Conclusão	59
6.1	Trabalhos Futuros	59
	Referências Bibliográficas	61
A	Resultados das Simulações	66
B	Desenhos Mecânicos	72

Lista de Figuras

1.1	Bancada experimental de levitação magnética do LAVI.	2
1.2	Ímãs permanentes em formato de anel magnetizados na direção radial (acima) e na direção axial.	3
2.1	Turbina comercial a vapor com capacidade de geração de até 10MW.	5
2.2	Exemplo genérico de curva de magnetização para um material ferromagnético qualquer.	8
2.3	Linhas de fluxo para ímãs em diferentes formatos e direções de magnetização.	10
2.4	Diferentes formatos de ímãs permanentes disponíveis no mercado.	10
2.5	Circuito magnético de um eletroímã para levitação magnética.	11
2.6	Circuito magnético equivalente do sistema da Figura 2.5.	12
2.7	Modelo esquemático para cálculo da força magnética entre dois ímãs cilíndricos.	15
3.1	Mancal de rolamento: Mancal axial de roletes cônicos	19
3.2	Ilustração esquemática da seção transversal de um mancal hidrodinâmico.	20
3.3	Ilustração esquemática de um eixo apoiado em dois mancais radiais e um axial.	22
3.4	Desbalanceamento estático: centro de massa deslocado.	24
3.5	Desbalanceamento dinâmico: cargas pontuais geram torque transversal sobre o eixo.	24
3.6	Efeito de rotações transversais do eixo no entreferro a do mancal axial.	25
4.1	Posição do rotor [mm] x Tempo [ms] - Magnetização axial	29
4.2	Exemplo da análise de malha para um dos casos estudados neste trabalho. Em destaque o critério de convergência e número de iterações de refinamento.	31
4.3	Vista isométrica do modelo 3D da bancada ilustrando os mancais radiais e a o mancal axial proposto.	31

4.4	Configuração simplificada - Mancal com Rotor e Estatores magnetizados axialmente	32
4.5	Vista em corte de um quarto de seção do mancal axial com geometria em disco - Direção de magnetização dos ímãs permanentes no rotor e estatores.	33
4.6	Ilustração esquemática das dimensões do modelo simplificado de mancal axial magnetizado axialmente.	33
4.7	Superfície comparativa dos casos paramétricos para o estudo do mancal magnetizado na direção axial.	35
4.8	Reação de apoio F_z [N] x Tempo [ms] para um ciclo de deslocamento do rotor - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25	36
4.9	Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25	36
4.10	Rigidez do mancal axial [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25.	37
4.11	Vista isométrica do modelo simplificado para um mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e no mesmo sentido. Neste arranjo somente 1 estator é necessário para o mancal atuar nos dois sentidos da direção axial.	38
4.12	Vista esquemática do mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e no mesmos sentido.	39
4.13	Ilustração esquemática das dimensões do modelo simplificado do mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial.	39
4.14	Superfície comparativa dos casos paramétricos para o estudo do mancal magnetizado na direção radial com ímãs em atração.	41
4.15	Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização Radial - Atração: Casos 5, 21 e 22	41
4.16	Rigidez do mancal [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização Radial - Atração: Casos 5, 21, 22.	42
4.17	Vista isométrica do modelo simplificado para um mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e em sentidos opostos.	43
4.18	Vista esquemática em seção do mancal de magnetização radial com dois estatores.	43
4.19	Magnitude da reação de apoio em função dos parâmetros do estudo paramétrico para a topologia de mancal axial passivo magnetizado na direção radial com ímãs em repulsão.	44
4.20	Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização Radial - Força Repulsiva: Casos 5, 21 e 22	45

4.21	Rigidez do mancal axial [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização Radial - Força Repulsiva: Casos 5, 21, 22	46
4.22	Modelo numérico da rigidez da reação de apoio para faixa de deslocamento admissível do mancal. Gráfico comparativo dos casos selecionado nas topologias axial e radial.	47
4.23	Modelo numérico da rigidez da reação de apoio para faixa de deslocamento admissível do mancal. Gráfico comparativo dos casos selecionado nas topologias axial e radial.	48
4.24	F_z Máx. x Massa total de material magnético. Gráfico comparativo entre os casos para F_z mínimo, máximo e geometria selecionada entre as topologias estudadas.	48
5.1	Reprodução da Figura 4.6	50
5.2	Vista da seção transversal do mancal de magnetização axial.	51
5.3	Vetores densidade de fluxo magnético para o Caso 4 com o rotor em posição neutra.	52
5.4	Vetores densidade de fluxo magnético para o Caso 4, Entreferro $a = 2.75\text{mm}$, quando próximo de $F_{z,sup}$ máximo.	52
5.5	Refinamento adaptativo da malha de elementos finitos - Magnetização Axial	53
5.6	Malha de elementos finitos refinada após último passe adaptativo - Magnetização Axial	54
5.7	Mag. Axial – Força x Posição – Estudo paramétrico para a rigidez do mancal	54
5.8	Mag. Axial – Rigidez x Posição – Estudo paramétrico para a rigidez do mancal	55
5.9	Força Magnética e Rigidez do mancal projetado.	56
5.10	Deslocamento transversal imposto ao rotor. Na figura, um deslocamento angular positivo em torno de x	56
5.11	Comportamento do mancal para deslocamento transversal do rotor.	57
5.12	Vista isométrica em corte de meia-seção do mancal magnético axial passivo de magnetização axial.	58
A.1	Reprodução da Figura 4.6 - Dimensões do modelo simplificado de mancal axial magnetizado axialmente	66
A.2	F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 1 a 5	68
A.3	F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 1 a 5	68
A.4	F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 11 a 15	68
A.5	F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 16 a 20	68
A.6	F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 21 a 25	68

A.7	Reprodução da Figura 4.13 - Dimensões do modelo simplificado do mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial.	69
A.8	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 1 a 5	70
A.9	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 1 a 5	70
A.10	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 11 a 15	70
A.11	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 16 a 20	70
A.12	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 21 a 25	70
A.13	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 1 a 5	71
A.14	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 1 a 5	71
A.15	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 11 a 15	71
A.16	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 16 a 20	71
A.17	F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 21 a 25	71
B.1	Desenho Mecânico – Mancal magnetizado na direção axial – Montagem e Lista de Materiais	73
B.2	Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Rotor	74
B.3	Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Estator	75
B.4	Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Estator	76

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa entre materiais magnéticos comerciais.	11
2.2	Parâmetros da expressão analítica da força axial entre dois ímãs magnetizados na direção axial.	15
4.1	Propriedades do material Arnold Magnetics N42.	28
4.2	Parâmetros geométricos para o modelo de mancal axial com ímãs magnetizados axialmente da Figura 4.6	34
4.3	Sumário de casos do estudo paramétrico para o mancal magnetizado axialmente. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.1	34
4.4	Mancal de magnetização axial - Casos Mínimo, Máximo e Selecionado	34
4.5	Parâmetros geométricos para os modelos de mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial da Figura 4.13. O modelo é definido a partir dos valores de D_1 e a . Os valores de cada parâmetro individualmente em cada caso pode ser encontrado nas Tabelas A.2 e A.3	39
4.6	Sumário de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado na direção radial e de força magnética atrativa. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.2 . . .	40
4.7	Mancal de magnetização radial - Força atrativa - Casos mínimo, máximo e selecionado	40
4.8	Sumário de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado na direção radial e de força magnética repulsiva. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.3 .	44
4.9	Mancal de magnetização radial - Força Repulsiva - Casos de F_z mínimo, máximo e geometria selecionada	45
4.10	Sumário comparativo entre os casos selecionados nos estudos paramétricos de cada topologia.	47
5.1	Dimensões dos ímãs permanentes utilizados no projeto do mancal axial de magnetização axial para a bancada do LAVI.	51

5.2	Características mecânicas do mancal axial projetado para ser implementado na bancada do LAVI.	57
5.3	Lista de materiais - Mancal axial magnetizado axialmente - Componentes da montagem da Figura B.1	58
A.1	Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado axialmente. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 6mm$	67
A.2	Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado radialmente e reação de apoio oriunda da atração magnética. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 5mm$	67
A.3	Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado radialmente e reação de apoio por repulsão magnética. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 5mm$	69

Capítulo 1

Introdução

Máquinas rotativas são equipamentos dos mais utilizados na engenharia. Nelas, temos essencialmente um rotor que gira com certa velocidade cujo movimento realiza alguma tarefa: transmitir, gerar ou consumir energia. Quanto mais estável for este movimento de rotação da máquina, sem que se desperdice energia cinética em deslocamentos transversais, menor será a parcela de energia perdida e não convertida em trabalho útil, e maior a eficiência mecânica do equipamento. Na maior parte dos casos, isto significa que o rotor deve ser livre para mover-se apenas girando em torno de seu eixo longitudinal, apoiado em mancais. Seja em aplicações de baixa ou alta velocidade de rotação, um bom mancal oferece mínima resistência ao movimento do eixo. Mais ainda, os mancais mantêm a posição radial e axial do rotor, e para tal devem amortecer e transmitir as cargas externas às quais o eixo está submetido.

Existem hoje diferentes tipos de mancais, cada qual com particularidades que os tornam mais ou menos atraentes para cada aplicação. Podemos separá-los em dois grandes grupos:

- Mancais de contato mecânico – mancais de rolamento ou de deslizamento;
- Mancais sem contato mecânico – mancais hidrodinâmicos ou de ar comprimido e os mancais magnéticos.

Em mancais de contato, o atrito entre os elementos de rolamento e/ou entre as pistas externa e interna são fenômenos inevitáveis que consomem energia útil da máquina e desgastam os componentes que interagem mecanicamente. As reações de apoio deste tipo de mancal são essencialmente rígidas, com capacidade de amortecimento limitada.

As principais vantagens dos mancais magnéticos provêm, naturalmente, da ausência de contato mecânico entre as partes que se movem entre si. Isto reduz a dissipação de energia de rotação da carga, e elimina o desgaste destes componentes em comparação aos mancais de contato.

Além disso, com certos mancais magnéticos, torna-se possível controlar a rigidez e o amortecimento das reações do mancal. Em aplicações de alta velocidade de rotação, este é um recurso de extremo valor para se neutralizar os efeitos de vibrações, por exemplo.

Uma outra vantagem dos mancais magnéticos está na construção do eixo. Como não há contato mecânico entre o rotor e o estator, a qualidade de acabamento exigida para as superfícies externa do eixo e interna do mancal, é baixa. Isto pode tornar o mancal mais barato de se fabricar, por exemplo. Além disso, devido à ausência total de contato físico, elimina-se a necessidade de sistemas de lubrificação e, conseqüentemente, a contaminação das partes por óleo lubrificante.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é discutir diferentes configurações de mancal magnético axial passivo com ímãs em formato de anel e ao fim propor um modelo para implementação na bancada experimental de levitação magnética existente no Laboratório de Acústica e Vibrações - LAVI. Para isso, diferentes topologias de mancal magnético axial são analisadas por meio de simulações por elementos finitos quanto a sua capacidade como elemento de máquina. A partir desses resultados, define-se um modelo sobre o qual se desenvolve o projeto mecânico de implementação do mancal para a bancada do LAVI. Atualmente a bancada conta com dois mancais magnéticos radiais ativos desenvolvidos em [1] e [2], e serve como plataforma de desenvolvimento para outros trabalhos nas áreas de rotodinâmica e mancais magnéticos [3, 4].

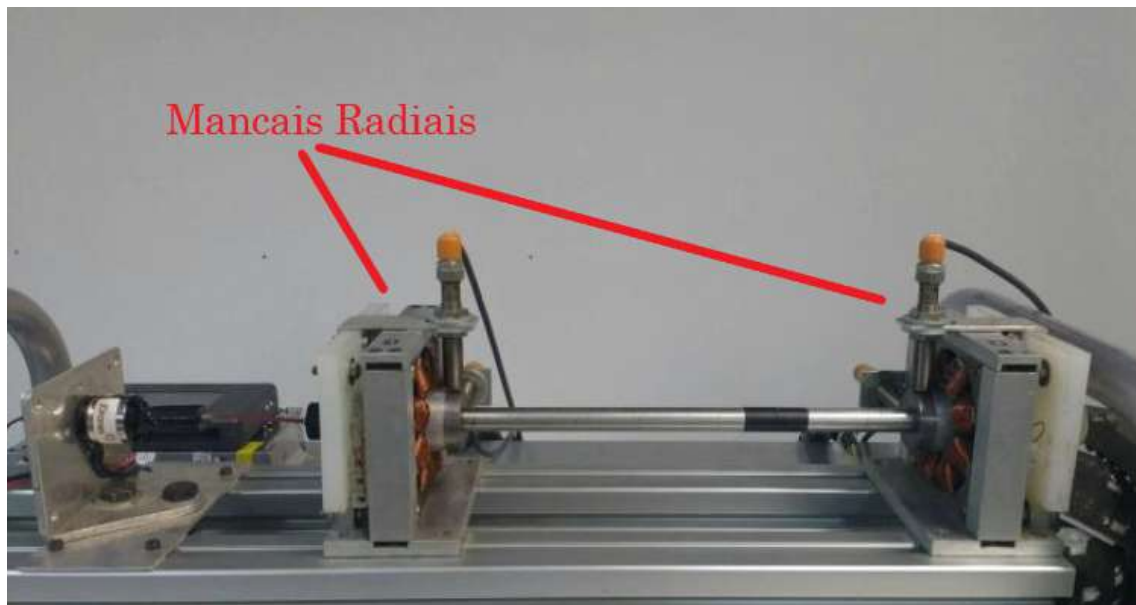


Figura 1.1: Bancada experimental de levitação magnética do LAVI. Adaptado de [3]

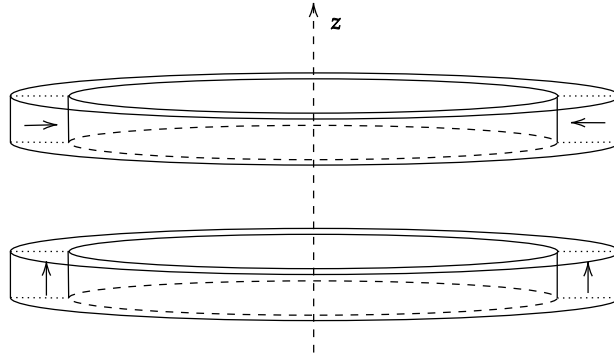


Figura 1.2: Ímãs permanentes em formato de anel magnetizados na direção radial (acima) e na direção axial.

Considerou-se implementar na bancada do laboratório um mancal magnético axial puramente ativo, em que o campo magnético é gerado exclusivamente por eletroímãs. A construção de um mancal ativo, no entanto, é mais complexa e demanda o uso de equipamentos adicionais como controladores, sensores e módulos de eletrônica de potência. Optou-se, portanto, tornar o foco do estudo para os mancais axiais passivos, em que o campo magnético é gerado somente pelos ímãs permanentes e a implementação, portanto, mais simples.

Em princípio, dois grupos de formas construtivas para o mancal magnético axial passivo são analisados: um com os ímãs permanentes do rotor magnetizados na direção axial, e outro com os ímãs do rotor magnetizados na direção radial.

A partir dos resultados das simulações numéricas por elementos finitos para estas formas construtivas, comparou-se as características mecânicas de cada topologia e foi escolhida a forma construtiva para ser implementada na bancada experimental do laboratório. Sobre este modelo, desenvolveu-se mais um estudo paramétrico, desta vez para analisar a rigidez da reação de apoio.

Ao fim do trabalho, foi desenvolvido um projeto mecânico detalhado para construir e implementar o mancal magnético axial de acordo com a capacidade máxima de carga e a rigidez desejada para a reação de apoio. Os detalhes construtivos do mancal são introduzidos no Capítulo 5 e os desenhos mecânicos encontrados no Anexo B.

No futuro, com a implementação do mancal axial, deve-se conduzir experimentos na bancada a fim de validar as simulações tridimensionais e propor melhorias ao projeto. Finalmente o rotor da bancada poderá operar totalmente sem contato físico e ser utilizado como ferramenta para experimentos na área de rotodinâmica.

Capítulo 2

Introdução a Mancais Magnéticos

2.1 Mancais magnéticos na engenharia

Nos últimos 30 anos, mancais de levitação magnética vem ganhando espaço na engenharia e sendo utilizados em diversas aplicações. Dentre as de maior relevância, podemos citar:

- Máquinas rotativas de alta velocidade: turbinas, compressores, bombas, etc. [5, 6]
- Máquinas-ferramenta para fabricação de alta precisão. [7, 8]
- Equipamentos operados em áreas classificadas – Submersos ou em atmosfera explosiva. [9, 10]
- Transporte - Trens de levitação magnética (MagLev) [11, 12]
- Dispositivos médicos [13, 14]

Dentro da própria UFRJ existem pelo menos duas aplicações que fazem uso da levitação magnética construídos em escala real para testes: São eles o percurso experimental do MagLev e o compressor de CO_2 do CEGN – o rotor gira apoiado em mancais magnéticos para testes de selos internos.

Podemos separar os mancais magnéticos em três grupos segundo a capacidade ou não de controle ativo das reações de apoio ao eixo. Na literatura esses grupos são encontrados como:

- Mancais Magnéticos Ativos
- Mancais Magnéticos Passivos
- Mancais Magnéticos Híbridos

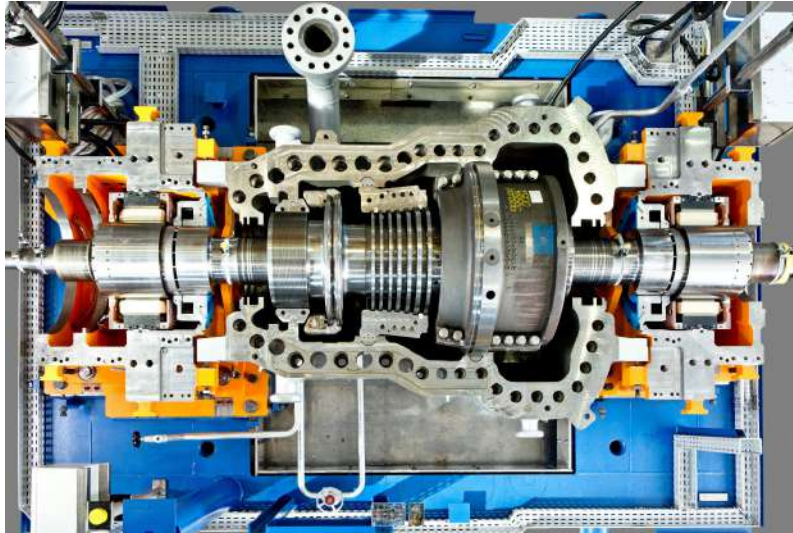


Figura 2.1: Turbina comercial a vapor com capacidade de geração de até 10MW – A turbina opera totalmente sem contato mecânico, levitando sobre mancais magnéticos.

Fonte: <https://www.magneticbearings.org/2015/09/25/10mw-magnetically-levitated-turbine/>

Em mancais puramente ativos, as forças magnéticas provêm do núcleo de eletroímãs cujos enrolamentos são alimentados por uma corrente elétrica. A corrente elétrica induz um campo magnético no estator e o circuito magnético se completa com o material ferromagnético do rotor.

No caso dos mancais puramente passivos, o campo magnético é gerado somente pelos ímãs permanentes posicionados nos estatores e/ou rotor. A levitação magnética puramente passiva, porém, é instável, conforme verificado pelo Teorema de Earnshaw, sendo necessário um ponto de contato ou uma componente ativa nas forças de sustentação que agem sobre o rotor.

No grupo dos mancais passivos existem também os mancais magnéticos supercondutores, cujo funcionamento se baseia no efeito Meissner, observado em materiais supercondutores quando estes são resfriados abaixo da sua temperatura crítica. Nesta condição, o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes do rotor (ou estator) é repelido pelo material supercondutor da outra parte do mancal, o que gera a força magnética de sustentação.

Finalmente, os mancais híbridos combinam eletroímãs com ímãs permanentes no estator do mancal provendo um fluxo magnético de base para a força de levitação magnética [15, 16].

Em diferentes trabalhos discutem-se diversas aplicações e modelos para o mancal magnético axial. Em [17], o autor apresenta o projeto genérico de um mancal magnético axial ativo com um eletroímã e rotor ferromagnético em formato de disco. Verifica-se também na literatura modelos híbridos para mancais axiais, com o fluxo

magnético gerado parcialmente por um ímã permanente. Em alguns trabalhos este recurso permite construções de rotor relativamente compacto, em formato cilíndrico [18, 19].

Neste trabalho, busca-se apresentar um projeto de implementação relativamente barata e simples para a bancada experimental já existente. Assim, fatores como facilidade de fabricação e montagem, e capacidade de modularização foram também ponderados na escolha da forma do mancal.

2.2 Materiais Magnéticos

Toda a matéria, em qualquer estado ou temperatura possui propriedades magnéticas. No entanto, para aplicações práticas, nem todo material é magnético. O magnetismo tem origem no momento angular do *spin* dos elétrons que compõem cada elemento químico. O movimento de cada elétron – uma carga elétrica – produz um campo magnético, um campo vetorial que induzirá forças magnéticas sobre outras partículas e cargas elétricas no espaço. Sob esse aspecto, um elétron pode ser visto como um pequeno ímã, com polos norte e sul. A forma como estão organizados os elétrons nos níveis de energia de um átomo conferem a este sua característica magnética como elemento.

A definição de campo magnético é dada por duas quantidades vetoriais, relacionadas a força mecânica e indução elétrica [20]. Estas são o campo magnético \mathbf{B} , medido no SI em Tesla, e o campo magnético \mathbf{H} , cuja unidade no SI é A m^{-1} .

O campo magnético \mathbf{B} , é uma grandeza vetorial cuja magnitude é função da força que exerce o campo magnético sobre uma carga elétrica que nele se move e cuja direção é aquela em que a força é nula [?]. Esta grandeza também é referida na literatura como a Densidade de Fluxo Magnético: O fluxo magnético pode ser representado por linhas de campo, como na Figura 2.3, em que a densidade das linhas de fluxo sobre uma superfície representa a magnitude do campo, enquanto a direção e sentido do vetor campo magnético são paralelos às linhas. A densidade de fluxo magnético em uma superfície depende também do material da superfície, como será visto mais adiante.

O campo magnético \mathbf{H} está relacionado à corrente elétrica – ou cargas elétricas que se movem – sobre em um condutor elétrico. Este campo magnético é gerado simetricamente ao redor do condutor elétrico. A direção do vetor \mathbf{H} é tangencial a um círculo hipotético concêntrico ao condutor e o módulo do vetor é inversamente proporcional ao raio destes círculos [20].

Por desambiguação, o vetor \mathbf{H} é tradicionalmente referido como Intensidade de Campo Magnético e o vetor \mathbf{B} como Densidade de Fluxo Magnético. Esta será a nomenclatura adotada neste trabalho.

A forma como se organizam as moléculas de um material descrevem a forma como interagem os sólidos deste material quando submetidos a um campo magnético externo. E é com relação a esta forma de interação que nos interessa a classificação dos materiais como magnéticos ou não-magnéticos.

O magnetismo, ou a interação dos elementos com um campo magnético externo, pode ocorrer em diferentes formas. Sob o ponto de vista do estudo de mancais magnéticos e máquinas elétricas, a forma de magnetismo que interessa é o Ferromagnetismo.

Os materiais ferromagnéticos – ligas de Ferro, Níquel, Cobalto e/ou elementos de Terras-Raras –, tem elétrons sem par, livres, tal como nos materiais paramagnéticos. A diferença, no entanto, é que num ferromagneto os momentos magnéticos desses elétrons livres tendem a se alinhar paralelamente entre si, mantendo o elemento num estado de baixo nível energético [21]. Essa característica faz com que os momentos magnéticos se mantenham alinhados mesmo quando o campo magnético externo é removido.

Em termos práticos, esse mecanismo é observado quando, por exemplo, um sólido é atraído por um campo magnético, ou em um ímã permanentemente. A capacidade ferromagnética de um material depende da sua temperatura. Acima de um determinado valor, a temperatura de Curie, específica para cada material, o corpo perde essas propriedades.

2.2.1 Magnetização

A capacidade dos materiais ferromagnéticos de se manterem magnetizados tornas-os excelentes para o uso em eletroímãs ou como ímãs permanentes. Em um transformador, por exemplo, o núcleo ferromagnético é constantemente magnetizado e desmagnetizado pelo campo magnético induzido pela corrente elétrica circulando nos enrolamentos ao seu redor. Neste caso, é mais interessante que o material seja capaz de reter pouco da magnetização para que possa ser desmagnetizado rapidamente quando a corrente elétrica circular no sentido oposto, por exemplo.

No caso de um ímã permanente deseja-se o contrário: na maioria das aplicações, espera-se que o ímã seja magnetizado quando fabricado e que mantenha a intensidade do campo tempos depois, mesmo quando submetido a outros campos magnéticos externos.

A partir do diagrama ilustrado na Figura 2.2, pode-se verificar o ciclo de histerese de um material ferromagnético e a relação entre a densidade de fluxo magnético B no material e a intensidade do campo magnético H a que ele está exposto. Nota-se que a partir de determinada intensidade de campo magnético ao qual é submetido o material, a densidade de fluxo magnético não se altera mais. Nesta condição o

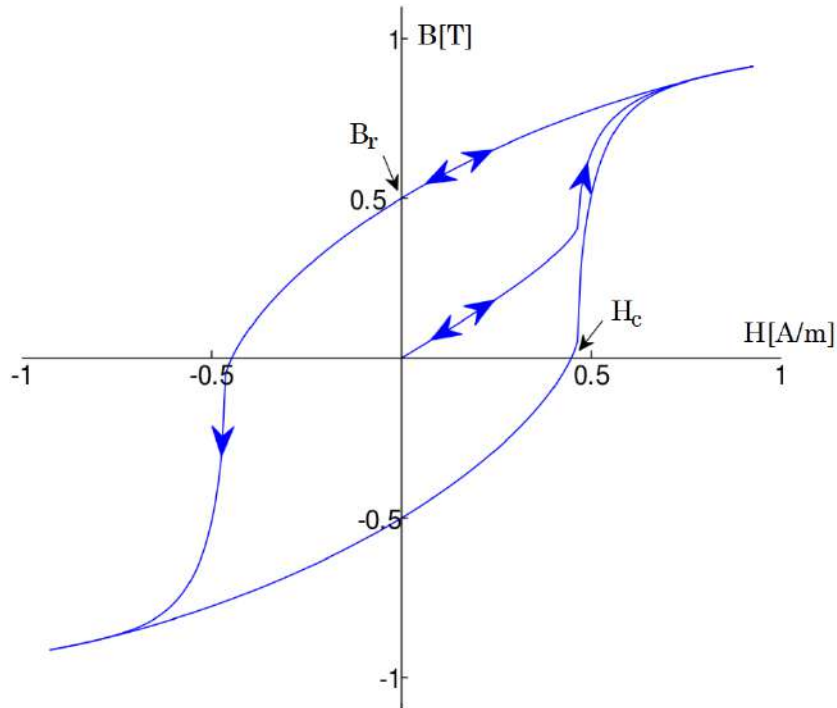


Figura 2.2: Exemplo genérico de curva de magnetização para um material ferromagnético qualquer.

Adaptado de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11564564>

material é dito saturado magneticamente.

Um ponto importante da curva para ímãs permanentes é a densidade de fluxo magnético quando o campo aplicado é zero. Essa quantidade, B_r , é denominada de Densidade de Fluxo Remanente, ou Remanência do material e representa quanto magnetizado permanece o material.

Outro valor extraído da Curva de Magnetização é a força coercitiva do material, H_c . Esta quantidade indica a intensidade de campo magnético necessária para reduzir a densidade de fluxo magnético no material a zero. Para aplicações com ímãs permanentes, desejam-se materiais com alta Remanência e alta Força Coercitiva.

Enquanto a intensidade de um campo magnético depende tão somente da fonte que o gera – uma carga elétrica em movimento ou um material magnetizado –, o quanto se magnetiza o material que está submetido a este campo é determinado pela densidade de fluxo magnético no meio.

A relação entre a densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético é apresentada na Equação 2.1 e depende da permeabilidade magnética do material. Esta quantidade depende de vários fatores como temperatura, frequência de excitação do campo magnético externo, posição do material, entre outros, e é definida na equação 2.2, na qual μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e μ_r a permeabilidade magnética relativa do material. Além disso, em materiais

anisotrópicos μ não é um escalar mas um tensor.

Nos materiais ferromagnéticos, a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} também está sujeita ao ciclo de histerese e depende portanto do estado de magnetização do objeto. Importante notar na curva de magnetização da Figura 2.2, como μ_r não é constante. Para determinadas faixas de trabalho e limitando-se os parâmetros de estudo, é razoável adotar um modelo linearizado como o da Equação 2.1. Uma forma conveniente de utilizar este modelo para materiais ferromagnéticos é reescrever a Equação 2.1 na forma da Equação 2.3.

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \cdot \mu_r \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\Delta\mathbf{B} = \mu\Delta\mathbf{H} \quad (2.3)$$

Alguns materiais magnéticos modernos apresentam alta remanência e força coercitiva, o que permite o desenvolvimento de dispositivos com alta densidade de energia magnética. Dentre esses materiais, destacam-se os chamados ímãs de elementos de Terras Raras pela alta intensidade do campo magnético que geram, sendo os de ligas de Neodímio-Ferro-Boro – $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ – os mais populares na engenharia.

As propriedades ferromagnéticas dos ímãs variam com a temperatura do material, como já mencionado nesta seção. Essencialmente tanto o fluxo remanente quanto a força coercitiva diminuem com o aumento da temperatura. A perda do fluxo pode ser reversível – recuperável ao tornar o ímã de volta à temperatura ambiente – ou irreversível, quando o material é aquecido a uma temperatura maior que sua temperatura de Curie.

A direção em que se alinham os momentos magnéticos de um material é relevante às aplicações de ímãs permanentes. Os polos norte e sul estarão dispostos nas extremidades do sólido na direção de magnetização, vide Figura 2.3. Os fabricantes de ímãs permanentes são capazes de fornecer hoje ímãs nos mais diferentes formatos e direções de magnetização. Exemplos como os modelos na Figura 2.4 são facilmente encontrados nas páginas dos fabricantes na internet. Este é um recurso de valor para se adaptar os ímãs às necessidades da aplicação e/ou montar diferentes geometrias magnéticas a fim de aumentar a intensidade do campo gerado.

Os ímãs de Terras-Raras são, entretanto, mais caros do que outras ligas utilizadas para confecção de ímãs permanentes como AlNiCo ou Ferrita. Ainda assim, seu benefício acaba compensando em grande parte das aplicações em que as dimensões

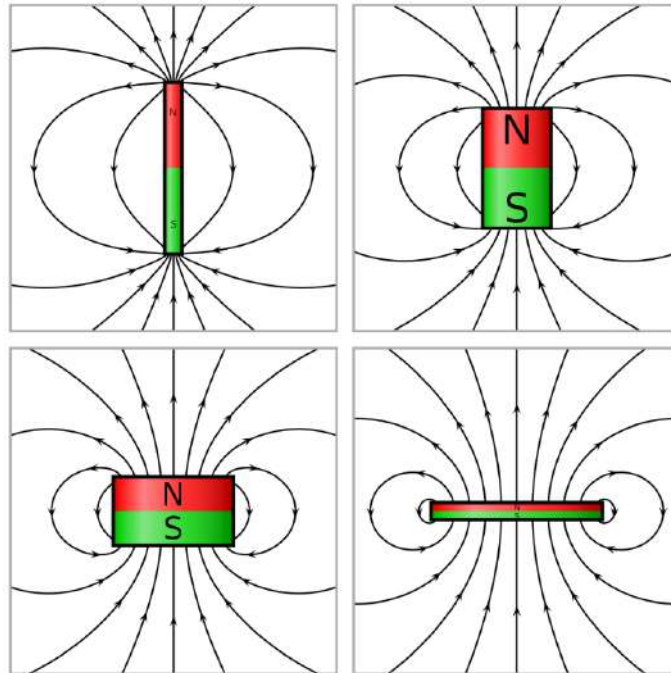


Figura 2.3: Linhas de fluxo para ímãs em diferentes formatos e direções de magnetização.

Fonte:

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83569125>

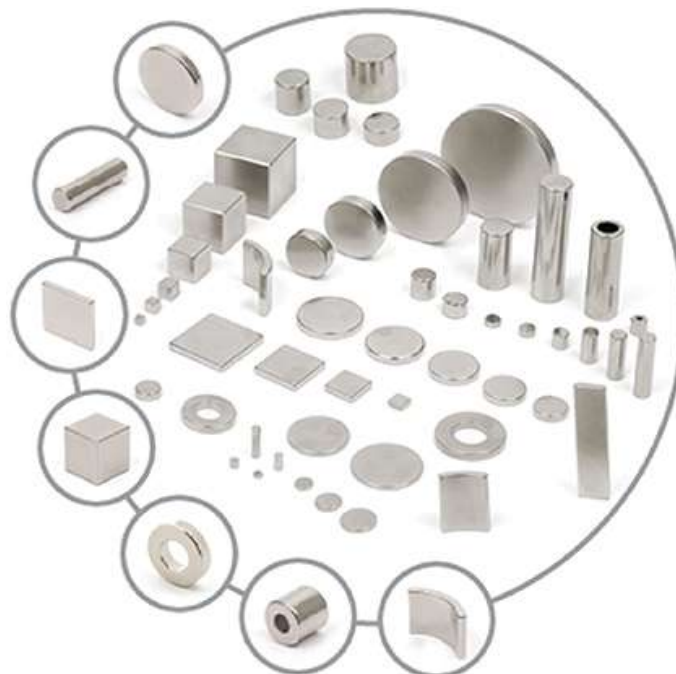


Figura 2.4: Diferentes formatos de ímãs permanentes disponíveis no mercado.

Fonte:

[https://www.magno-sphere.de/images/gallery/Magnosphere/Neodymium magnets.jpg](https://www.magno-sphere.de/images/gallery/Magnosphere/Neodymium_magnets.jpg)

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre materiais magnéticos comerciais.

Adaptado de: <https://www.first4magnets.com/tech-centre-i61/information-and-articles-i70/a-comparison-of-magnetic-materials-at-a-glance-i79>

Material	B_r [T]	H_c [kA m ⁻¹]	T_{max} [°C]	Densidade [g cm ⁻³]	Custo relativo
NdFeB Sinterizado (classe N42)	1.3	915.14	80	7.4	Alto
Alnico	1.25	50.9	500	7.3	Baixo
Ferrita	0.39	234.7	180	5.0	Baixo
SmCo (Samário-Cobalto)	1.1	771.9	350	8.4	Alto

e a quantidade total de ímãs permanentes é pequena.

2.3 Eletromagnetismo

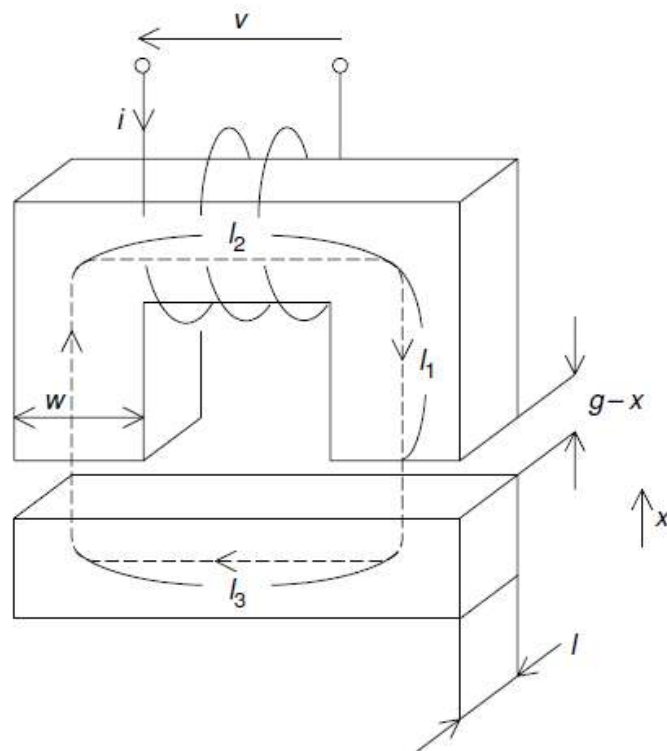


Figura 2.5: Circuito magnético de um eletroímã para levitação magnética.

Fonte: [22]

Tal como em outras máquinas elétricas, o eletromagnetismo, ou a relação entre a corrente elétrica que circula num condutor e o campo de forças magnéticas gerado ao redor desse material, é a base de funcionamento dos mancais magnéticos ativos.

Nos mancais magnéticos ativos, as forças de reação do mancal para controle da posição do eixo são geradas por eletroímãs, variando-se a densidade de fluxo magnético no entreferro em função da corrente que passa pelo enrolamento dos eletroímãs.

A presença do entreferro – ou *airgap* na literatura internacional – no circuito magnético altera a relutância magnética no circuito. De forma análoga a um circuito elétrico, a relutância no entreferro pode ser comparada a uma resistência elétrica. Similarmente, o fluxo magnético, ϕ é análogo à corrente elétrica do circuito.

Uma diferença fundamental, no entanto, é que a relutância não consome a energia magnética como um resistor converte energia elétrica em calor pelo efeito Joule. Ao contrário, a energia magnética que gera a força magnética do mancal está *armazenada* no entreferro [23].

Partindo das equações de Maxwell, podemos analisar o circuito magnético da Figura 2.5 e chegar às relações entre o eletromagnetismo e a magnitude da força de levitação magnética seguindo o modelo adaptado de [23]. O desenvolvimento completo desde as equações básicas não compete ao escopo deste trabalho.

Uma observação importante: Apresenta-se a seguir um modelo escalar, em que somente a magnitude da força magnética é calculada. Evidentemente, a força é uma grandeza vetorial, e para calcular a direção e sentido do vetor da força magnética, os operadores envolvendo as magnitudes de \mathbf{B} , \mathbf{H} , e \mathbf{A} seriam substituídos por operadores vetoriais.

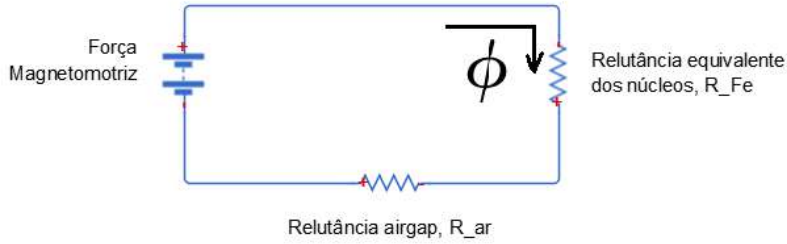


Figura 2.6: Circuito magnético equivalente do sistema da 2.5.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 2.6 representa o circuito magnético equivalente ao sistema do eletroímã da Figura 2.5, em que R_{ar} e R_{Fe} são as relutâncias do entreferro e do núcleo ferromagnético, respectivamente, $A = wl$ a área da seção transversal do entreferro, e l_1 , l_2 , e l_3 os comprimentos do circuito magnético:

$$R_{ar}(x) = \frac{2(g-x)}{\mu_0 A}, \quad R_{Fe} = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2.4)$$

A Força Magnetomotriz, F_{Mm} , é o resultado do somatório dos produtos da intensidade de campo magnético de cada segmento pelo seu respectivo comprimento. Assim, para o circuito completo,

$$F_{Mm} = H_{ar}(g-x) + H_{Fe}(l_1 + l_2 + l_3) = Ni \quad (2.5)$$

Em que N é o número de voltas dos enrolamentos de cobre do eletroímã e i a corrente elétrica no condutor.

Importante lembrar de não confundir a Força Magnetomotriz com a Força de sustentação magnética, obtida mais adiante na equação 2.9.

Desprezada a dispersão do campo magnético em entreferros pequenos, e considerando iguais as áreas das superfícies em que há interação entre o ar e os núcleos ferromagnéticos, na Figura 2.5, a densidade de fluxo magnético $B = \frac{\phi}{A}$ é constante ao longo do circuito.

Das equações 2.1 e 2.5, chegamos a:

$$B(x) = \frac{\mu_0 Ni}{(l_1 + l_2 + l_3)/\mu_r + 2(g - x)} \quad (2.6)$$

Sendo μ_r a permeabilidade magnética relativa do núcleo ferromagnético e, portanto, $\mu_r \gg 1$, podemos dizer que:

$$B(x) = \frac{\mu_0 Ni}{2(g - x)} \quad (2.7)$$

De forma similar, podemos calcular o fluxo magnético ϕ :

$$\phi(x) = B(x) \cdot A = \frac{Ni}{R_{ar}(x) + R_{Fe}} \quad (2.8)$$

A partir do balanço de energia mecânica do sistema e da aplicação do conceito de trabalho virtual, como deduzido em [23], podemos então exprimir a força de levitação magnética a partir da densidade de fluxo magnético no entreferro:

$$f = -\frac{1}{\mu_0} B^2 A \quad (2.9)$$

Substituindo a equação 2.7 em 2.9, temos a força magnética em função da corrente e do comprimento d do entreferro, tal que $d = g - x$:

$$f(i, x) = -\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{g - x} \right)^2 = -K_m \left(\frac{i}{d} \right)^2 \quad (2.10)$$

O sinal negativo indica que é uma força de atração.

2.4 Interação entre dois Ímãs Permanentes

Nos mancais magnéticos passivos, o campo magnético existente é gerado inteiramente por ímãs permanentes, sem a necessidade da circulação de correntes elétricas. Neste trabalho o campo e força magnética gerada pelos ímãs será calculado nume-

ricamente, por meio da solução das equações de Maxwell pelo método de elementos finitos. Nesta seção, porém, apresenta-se brevemente modelos analíticos ou semi-analíticos encontrados na literatura.

O campo magnético gerado por um ímã permanente depende, majoritariamente, da geometria do ímã, do seu material e da direção e magnitude de magnetização. Soluções analíticas e semi-analíticas tridimensionais para o campo magnético gerado por um ímã permanente aparecem em diversos trabalhos para o cálculo de forças magnéticas e/ou otimização de mancais magnéticos na literatura [24–31]. Um estudo mais recente apresenta uma solução exata para o cálculo do campo magnético gerado por um ímã cilíndrico [32].

Dois modelos para se calcular analiticamente a força de atração ou repulsão entre dois ímãs permanentes são encontrados na literatura. A diferença entre as duas abordagens – Amperiana e Coulombiana –, está no modelo eletromagnético utilizado para representar a origem do campo magnético gerado pelos ímãs.

Em ambos os casos os ímãs permanentes são substituídos por uma bobina fina. Na modelagem Amperiana, assume-se que uma corrente elétrica de polarização circula no interior da bobina e – para o caso de um ímã polarizado na direção axial – carrega as superfícies cilíndricas interna e externa do enrolamento.

Para esse mesmo ímã, consideraria-se na abordagem Coulombiana, que os planos superior e inferior da bobina estão carregados eletricamente por duas densidades superficiais de carga.

As duas representações podem ser utilizadas para descrever analiticamente a força magnética entre dois ímãs permanentes. No entanto, a depender da geometria dos ímãs em cada caso, o custo computacional para se chegar à solução pode ser significativamente maior ou menor de acordo com a abordagem utilizada [33, 34].

Para geometrias em formato de arco, o modelo puramente analítico pode ser limitado a calcular o campo nas proximidades do ímã [33]. Alguns modelos semi-analíticos encontrados na literatura [35–37] superam esta limitação e podem ser empregados para calcular o campo em qualquer ponto do espaço.

2.4.1 Atração entre ímãs cilíndricos

O modelo analítico desenvolvido em [34] para calcular a força de atração F_z entre os ímãs de magnetização J_1 e J_2 da Figura 2.7 é repetido sumariamente nesta seção. A relação entre k_n e J_n , com $n = 1, 2$, dada por:

$$k_n = \frac{J_n}{\mu_0} \quad (2.11)$$

A expressão geral para a força axial F_z :

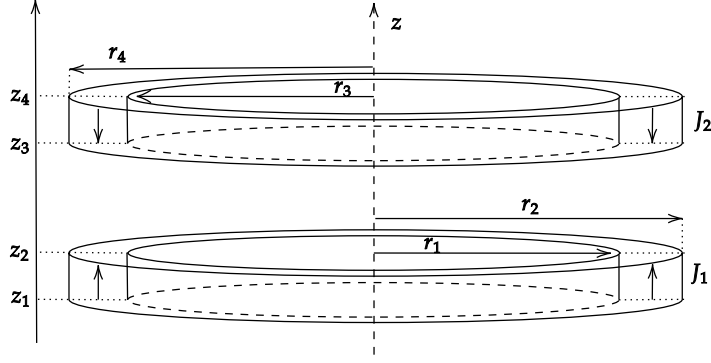


Figura 2.7: Modelo esquemático para cálculo da força magnética entre dois ímãs cilíndricos.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2.2: Parâmetros da expressão analítica da força axial entre dois ímãs magnetizados na direção axial. Fonte: [34]

Parâmetro	Definição
β	$\frac{b+c}{b-c}$
μ	$\frac{c}{b+c}$
ϵ	$\frac{c}{c-b}$

$$F_z = \frac{\mu_0 k_1 k_2}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=3}^4 (-1)^{1+i+j} f_z(r_i, r_j) \quad (2.12)$$

Sendo,

$$f_z(r_i, r_j) = r_i r_j \int_{\hat{z}=z_3}^{z_4} \int_{\tilde{z}=z_1}^{z_2} \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{(\tilde{z} - \hat{z}) \cos \theta}{(r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos \theta + (\tilde{z} - \hat{z})^2)^{3/2}} d\theta d\tilde{z} d\hat{z} \quad (2.13)$$

Utilizando os parâmetros da Tabela 2.2, a Equação 2.12 pode ser reescrita como:

$$F_z = \frac{J_1 J_2}{2\mu_0} \sum_{i,k=1}^2 \sum_{j,l=3}^4 (-1)^{1+i+j+k+l} F_{i,j,k,l} \quad (2.14)$$

E,

$$F_{i,j,k,l} = r_i r_j g(z_k - z_l, r_i^2 + r_j^2 + (z_k - z_l)^2, -2r_i r_j) \quad (2.15)$$

A função auxiliar $g(a, b, c)$ é definida como $g(a, b, c) = A + S$, em que:

$$A = \frac{a^2 - b}{c} \pi + \frac{\sqrt{c^2 - (a^2 - b^2)^2}}{c} \left(\log \left[\frac{-16c^2}{(c^2 - (a^2 - b^2)^2)^{3/2}} \right] + \log \left[\frac{c^2}{(c^2 - (a^2 - b^2)^2)^{3/2}} \right] \right)$$

$$\begin{aligned}
S = & \frac{2ia}{c\sqrt{b+c}} \left((b+c)E \left[\arcsin(\sqrt{\beta}), \beta^{-1} \right] - cF \left[\arcsin(\sqrt{\beta}), \beta^{-1} \right] \right) \\
& + \frac{2a}{c\sqrt{\epsilon(b-c)}} \left(\frac{c}{\sqrt{\mu}} E[\beta^{-1}] - c\sqrt{\mu} K[\beta^{-1}] \right) \\
& + \sqrt{\epsilon\beta^{-1}} \left((b-a^2)K[2\mu] + (a^2-b+c)\Pi \left[\frac{2c}{b+c-a^2}, 2\mu \right] \right)
\end{aligned}$$

Onde $F[\phi, m]$ é a integral elíptica incompleta do primeiro tipo:

$$F[\phi, m] = \int_0^\phi \frac{1}{\sqrt{1-m\sin^2\theta}} d\theta \quad (2.16)$$

E $K[m]$ é a integral elíptica completa do primeiro tipo,

$$K[m] = F\left[\frac{\pi}{2}, m\right] = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-m\sin^2\theta}} d\theta \quad (2.17)$$

$E[\phi, m]$ é a integral elíptica incompleta do segundo tipo:

$$E[\phi, m] = \int_0^\phi \sqrt{1-m\sin^2\theta} d\theta \quad (2.18)$$

Com $\phi = \pi/2$, na forma completa:

$$E[m] = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-m\sin^2\theta} d\theta \quad (2.19)$$

E $\Pi[n, \phi, m]$ é a integral elíptica incompleta do terceiro tipo:

$$\Pi[n, \phi, m] = \int_0^\phi \frac{1}{\sqrt{1-n\sin^2\theta}} \frac{1}{\sqrt{1-m\sin^2\theta}} d\theta \quad (2.20)$$

Na forma completa, $\Pi[n, m]$:

$$\Pi[n, m] = \Pi \left[n, \frac{\pi}{2}, m \right] \quad (2.21)$$

Diferenciando F_z com relação a z , obtém-se a expressão exata para a rigidez axial do mancal $K_z = -\frac{F_z}{z}$.

$$K_z = \frac{J_1 J_2}{2\mu_0} \sum_{i,k=1}^2 \sum_{j,l=3}^4 (-1)^{1+i+j+k+l} C_{i,j,k,l} \quad (2.22)$$

Em que:

$$C_{i,j,k,l} = 2\sqrt{\alpha}E \left[\frac{-4r_i r_j}{\alpha} \right] - 2 \frac{r_i^2 + r_j^2 + (z_k - z_l)^2}{\sqrt{\alpha}} K \left[\frac{-4r_i r_j}{\alpha} \right]$$

$$\alpha = (r_i - r_j)^2 + (z_k - z_l)^2$$

Capítulo 3

Aspectos Mecânicos dos Mancais Magnéticos

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos mecânicos por trás dos estudos de mancais magnéticos. Primeiramente, faz-se uma breve revisão dos tipos de mancais utilizados na engenharia. Em seguida, apresenta-se as equações de movimento para um eixo que levita sobre mancais magnéticos. Finalmente, pontua-se o escopo de atuação e quais as características mecânicas desejadas para o mancal axial que será desenvolvido nesta dissertação.

3.1 Tipos de Mancais

3.1.1 Mancais Com Contato Mecânico

Conforme já colocado no Capítulo 1, os mancais magnéticos apresentam-se como mais uma alternativa sem contato mecânico aos mancais de eixo difundidos na engenharia. Para relembrar, tem-se no grupo dos mancais de contato:

- Mancais de Rolamento
- Mancais de Deslizamento

Nos mancais de rolamento, as pistas da parte movente e estática estão conectadas por múltiplos elementos rolantes – esferas ou roletes, como o da figura 3.1 – sobre os quais a carga mecânica é distribuída. A área de contato entre cada elemento rolante e as pistas do mancal é muito pequena, podendo ser aproximada, num caso ideal, por ponto(s) (mancal de esferas) ou uma linha (mancal de roletes). Assim, o atrito estático na área de contato é tão alto que os componentes não deslizam entre si mas rolam. Desta forma, diminui-se a resistência ao movimento de rotação entre as partes da máquina.

Para o bom funcionamento de um mancal de rolamento, uma série de condições deve ser atendida: o material dos componentes do mancal deve ser mecanicamente resistente, duro – num mancal ideal o contato entre o elemento rolante e uma das pistas é pontual –, e constantemente lubrificado. Além disso, o aumento da temperatura limita as velocidades de operação deste tipo de mancal – quanto maior a temperatura, maior a porção de deslizamento nos contatos e maior o desgaste dos componentes.



Figura 3.1: Mancal de rolamento: Mancal axial de roletes cônicos
Fonte: www.schaeffler.de

Em mancais de deslizamento, o atrito provocado pelo movimento relativo entre as partes é distribuído sobre componentes de desgaste. Na maior parte dos casos, as pistas de contato são lubrificadas e/ou compostas por materiais e revestimentos deslizantes ou auto-lubrificantes, de baixo coeficiente de atrito. Entre estes materiais estão ligas de cobre, PTFE e alguns compósitos. Mancais axiais de deslizamento não são muito comuns na engenharia por sua baixa capacidade de carga – a maior parte das variações encontradas com contato axial são na realidade mancais hidrostáticos ou hidrodinâmicos. Este último, portanto, sem contato mecânico entre o eixo e o mancal.

3.1.2 Mancais Sem Contato Mecânico

Além dos mancais magnéticos, existem mais dois tipos de mancais de eixo sem contato mecânico entre o eixo e o mancal. Estes são os mancais hidrodinâmicos e mancais de ar comprimido.

O funcionamento de ambos é similar: O eixo é suspenso no mancal por uma camada de fluido sob pressão, tal como na ilustração da figura 3.2. A diferença evidente entre o mancal hidrodinâmico e o de ar comprimido é o fluido utilizado em cada um: no primeiro, utiliza-se óleos lubrificantes enquanto no segundo a levitação depende somente de ar comprimido.

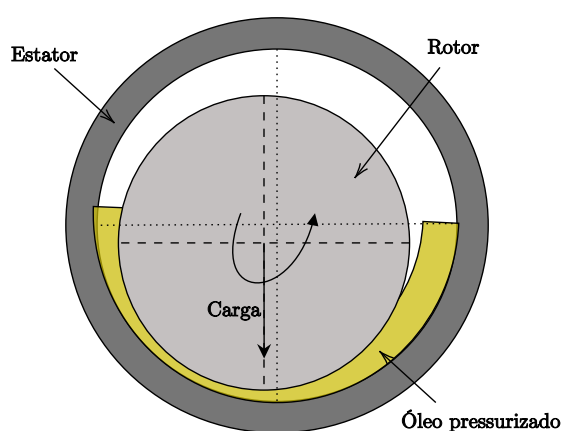


Figura 3.2: Ilustração esquemática da seção transversal de um mancal hidrodinâmico.

Fonte: Autoria própria.

Mancais hidrodinâmicos tem alta capacidade de carga e reações de apoio tipicamente rígidas. As superfícies de apoio do eixo do mancal precisam de altas tolerâncias de fabricação para melhor escoamento do fluido e para minimizar o atrito entre os componentes na partida e/ou parada da máquina, situações em que há contato entre o rotor e o estator. Uma outra desvantagem desse tipo de mancal com relação aos mancais magnéticos é a necessidade de um sistema externo de pressurização e condicionamento do fluido de trabalho. Além disso, a introdução de um meio externo como um óleo lubrificante, pode inviabilizar a utilização do mancal em aplicações com alta restrição a contaminações, como em equipamentos na indústria alimentícia ou biomédica.

3.2 Dinâmica do Rotor

O movimento pleno de um corpo compreende 6 graus de liberdade quando este corpo é livre para deslocar-se linear e angularmente nos 3 eixos ortogonais. O rotor rígido de uma máquina rotativa, quando apoiado em mancais de contato também rígidos, é um corpo cujo movimento é livre em apenas 1 grau de liberdade, uma vez que o eixo somente se move girando ao redor de sua linha de centro longitudinal.

Para o escopo deste trabalho, considera-se o eixo do rotor essencialmente rígido, desprezando-se assim quaisquer deformações devido ao carregamento sobre ele.

No caso de uma máquina cujo rotor é apoiado sem contato físico nos mancais, o conjunto de apoios deve de alguma forma restringir o movimento do rotor em 5 graus de liberdade para manter a posição do eixo respeitando as restrições geométricas da montagem. Devido a ausência de contato mecânico, existe movimento nas direções transversais e estes graus de liberdade não são formalmente restritos pelos mancais como no caso dos mancais rígidos. No entanto, as reações de apoio estão presentes e são, de forma geral, proporcionais aos deslocamentos do eixo com relação ao mancal. Define-se, portanto, este tipo de mancal como mancal flexível.

A figura 3.3 ilustra um rotor rígido, apoiado em dois mancais radiais e um axial, submetido a uma carga externa com componentes axial e radial.

3.2.1 Equações de movimento

Nesta seção serão apresentadas as equações de movimento do corpo rígido da Figura 3.3, que se move no referencial R . As equações são desenvolvidas sob o modelo da mecânica clássica newtoniana.

O movimento do Rotor C apoiado nos três mancais compreende translações e rotações. A parte translacional está relacionada à quantidade de movimento linear ${}^R\mathbf{G}^C$ do corpo. Pelo modelo de Newton, a variação desta quantidade, por sua vez, é igual à força resultante aplicada sobre este corpo no seu centro de massa O .

$${}^R\dot{\mathbf{G}}^C = \mathbf{F} = m\mathbf{a}^O \quad (3.1)$$

Para o modelo da Figura 3.3, as reações de apoio R_1 , R_2 , e R_T dos mancais sem contato podem ser separadas nas suas componentes elástica e de amortecimento, conforme exemplificado na equação 3.2.

$$\mathbf{R}_U = -k_U \cdot \delta_U \quad \mathbf{R}_{Uc} = c_U \cdot \dot{\delta}_U \quad (3.2)$$

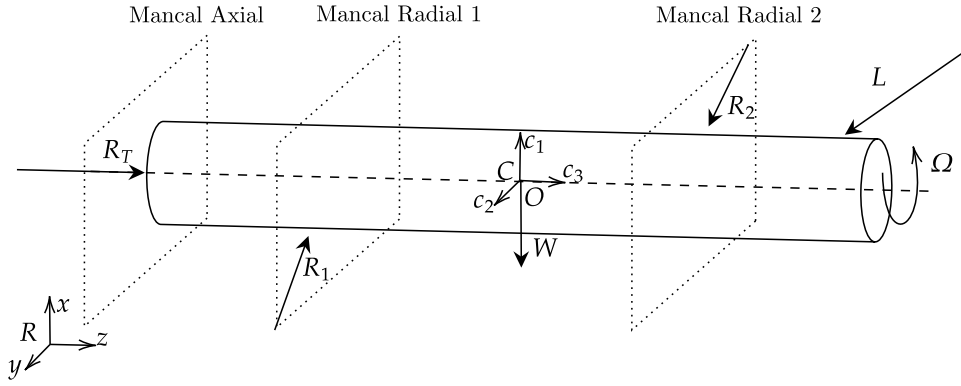


Figura 3.3: Ilustração esquemática de um eixo apoiado em dois mancais radiais e um axial.

Fonte: Autoria própria.

$$\delta_U = \begin{pmatrix} \delta_{U,x} \\ \delta_{U,y} \\ \delta_{U,z} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Em que o índice U pode ser substituído por T , 1 ou 2, de acordo com o mancal analisado. k_U e c_U são, respectivamente, a rigidez elástica e o coeficiente de amortecimento do mancal. O vetor δ corresponde à variação da posição do centro do eixo no centro geométrico do mancal.

Importante notar que o vetor da força \mathbf{R}_U tem componentes não-nulas somente nas direções em que o mancal em questão pode atuar. δ_1 e δ_2 , por exemplo, tem componentes apenas no plano xy , uma vez que estas são as direções em que os mancais radiais restringem o movimento do eixo.

Para o modelo simplificado da figura 3.3, as cargas externas são \mathbf{L} – uma carga externa qualquer com componentes radiais e axiais –, e o peso do rotor, $\mathbf{W} = m\mathbf{g}$; as reações dos mancais radiais 1 e 2, \mathbf{R}_1 e \mathbf{R}_2 ; e a reação do mancal axial, \mathbf{R}_T ;

Combinando as Equações 3.1 e 3.2 e considerando a reação do mancal axial como puramente elástica, as equações de movimento linear do Rotor C da Figura 3.3, expressas num sistema de coordenadas paralelo a R e com origem no centro de massa O , são:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1x} + R_{2x} + L_x - mg \\ R_{1y} + R_{2y} + L_y \\ R_T + L_z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Analogamente, o movimento de rotação do corpo está relacionado à quantidade de movimento angular ${}^R\mathbf{H}^{C/O}$. Esta grandeza vetorial é relativa, e representa o

momento angular do corpo em relação a um ponto determinado no espaço.

Sendo o ponto O o centro de massa do corpo C , a variação da quantidade de movimento angular \mathbf{H} é igual ao torque resultante naquele ponto devido à ação das forças externas sobre o corpo. Num primeiro momento, desconsidera-se quaisquer desbalanceamentos de massa no eixo:

$${}^R \dot{\mathbf{H}}^{C/O} = \mathbf{M}^{F_e/O} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{M}^{F_e/O} = \vec{\mathbf{I}}^{C/O} \cdot {}^R \boldsymbol{\alpha}^C + {}^R \boldsymbol{\omega}^C \times \vec{\mathbf{I}}^{C/O} \cdot {}^R \boldsymbol{\omega}^C \quad (3.6)$$

Em que:

- $\vec{\mathbf{I}}^{C/O}$ é o tensor de inércia de C para rotação em torno de O ;
- ${}^R \boldsymbol{\omega}^C$ é o vetor velocidade angular do corpo C em R ;
- ${}^R \boldsymbol{\alpha}^C$ é o vetor aceleração angular do corpo C em R ;

Combinando as equações 3.4 e 3.5, pode-se descrever o movimento do eixo por completo. Observa-se na figura 3.3 o referencial fixo ao rotor C no centro de massa O , com direções principais dadas por c_1, c_2 e c_3 . Pode ser mais conveniente utilizar um sistema de coordenadas fixo ao corpo C para descrever as forças que atuam sobre o eixo em vez do referencial R . Para o caso do mancal axial, em que os deslocamentos transversais não são considerados, o sistema de coordenadas paralelo ao referencial R é suficiente.

Considerando o rotor da figura 3.3 perfeitamente balanceado e simétrico com relação ao referencial O , cuja origem está no centro de massa do eixo, as direções x, y e z são as direções principais de inércia do rotor. Assim, o tensor de inércia $\vec{\mathbf{I}}^{C/O}$ é diagonal e da forma:

$$\vec{\mathbf{I}}^{C/O} = \begin{bmatrix} I_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z0} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.2.2 Desbalanceamento Estático

Um problema muito comum em rotores é garantir o perfeito balanceamento da massa girante. A qualidade do material e dos processos de fabricação podem causar pequenas variações na distribuição da massa do rotor dentro de seu volume.

A figura 3.4 ilustra o caso do desbalanceamento estático do eixo. Uma forma de modelar a diferença na distribuição da massa do eixo por cargas pontuais no rotor que deslocam o centro de massa do eixo para o ponto O' .

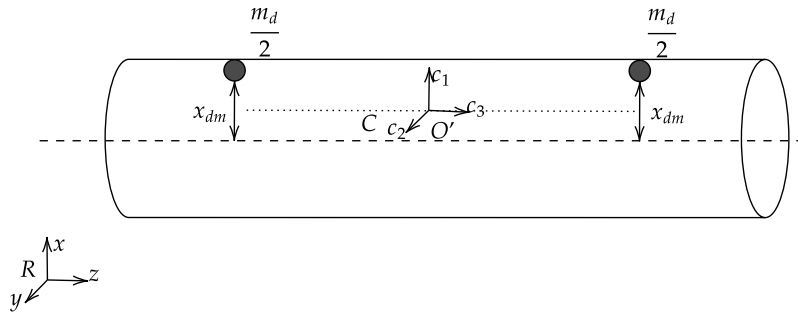


Figura 3.4: Desbalanceamento estático: centro de massa deslocado.
 Fonte: Autoria Própria

Quando o rotor estiver girando, uma força centrífuga atuará sobre cada carga pontuais, e será refletida nas reações de apoio dos mancais. Esta força pode ser escrita no referencial fixo ao corpo C na forma da Equação 3.8.

$$\mathbf{f}_m = \begin{bmatrix} \frac{m_d x_{dm} \Omega^2}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.2.3 Desbalanceamento Dinâmico

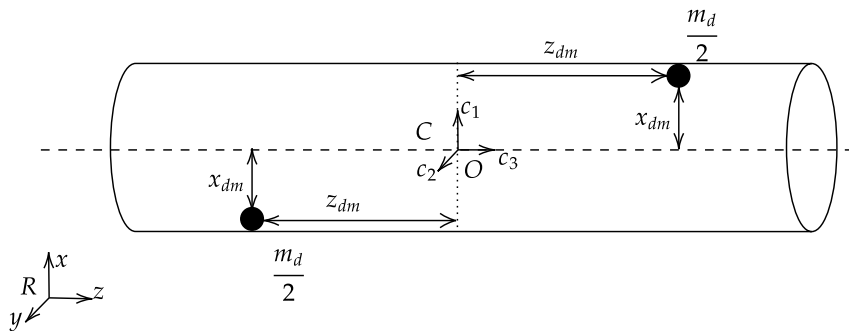


Figura 3.5: Desbalanceamento dinâmico: cargas pontuais geram torque transversal sobre o eixo.
 Fonte: Autoria Própria.

No caso da Figura 3.5, nota-se que as cargas pontuais se anulam em torno do centro de massa, mantendo sua posição inalterada. No entanto, quando o rotor estiver girando no eixo z , surgirão as forças centrífugas sobre estas massas pontuais que combinadas, geram um torque T_d em torno do ponto O transversal ao eixo.

Este torque tem também de ser compensado pelos mancais e pode ser expresso pela equação 3.9 no referencial C fixo ao corpo.

$$\mathbf{T}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ m_d x_{dm} \Omega^2 z_{dm} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

De forma geral, para qualquer desbalanceamento de massa presente no eixo, o corpo perde sua simetria e o tensor de inércia deixa de ser diagonal, como na Equação 3.7, e, ainda que simétrico, será da forma:

$$\vec{\mathbf{I}}^{C/O} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Evidentemente, com os produtos de inércia não nulos, surgirão termos adicionais na Equação 3.5 além do torque \mathbf{T}_d . Nota-se, porém, que estes termos não alteram a equação de movimento na direção axial do eixo.

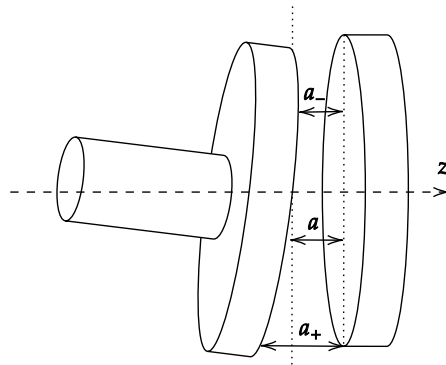


Figura 3.6: Efeito de rotações transversais do eixo no entreferro a do mancal axial.

As cargas transversais sobre o eixo causam rotações nas direções x e y . Se o mancal não é rígido o suficiente para impedir deslocamentos transversais do eixo, existirão velocidades e acelerações nestas direções, o que significa, essencialmente, vibrações transversais do eixo.

Dependendo da amplitude do deslocamento, a inclinação do rotor do mancal axial alteraria a distância do entreferro a do mancal axial como ilustrado da Figura 3.6. Com isto, a magnitude da reação axial nas porções superior e inferior do mancal axial seriam diferentes, o que causaria um torque transversal sobre o eixo. No entanto, para o modelo linearizado deste trabalho, considera-se que os deslocamentos transversais do eixo são pequenos e que a variação da distância no plano do rotor do mancal axial é desprezível.

3.3 Força e Rigidez

No modelo mecânico de um mancal de eixo, as reações de apoio possuem geralmente componentes elásticas e de amortecimento. A magnitude destes coeficientes é determinada pelo tipo e construção do mancal – geometria, materiais, etc. Esta ideia é mais intuitiva em mancais de contato mas o mesmo raciocínio se aplica para os mancais magnéticos.

Muito embora não seja possível controlar diretamente as constantes elástica e de amortecimento de um mancal magnético passivo durante sua operação, tal como num mancal magnético ativo, a geometria do mancal determina a rigidez elástica da reação. É necessário portanto identificar o comportamento mecânico desejado para o equipamento nas etapas iniciais do projeto.

No Capítulo 2, foi apresentado um modelo analítico da literatura para descrever a força magnética entre os ímãs do mancal axial e a rigidez nessa direção. Nos modelos numéricos que serão simulados neste trabalho, a rigidez da reação de apoio é obtida pela diferenciação numérica da reação com relação ao deslocamento axial do eixo.

Como verificado na literatura [34] [37] [36] [30], espera-se que a reação de apoio do mancal seja linear com rigidez constante para pequenos deslocamentos na direção axial.

Uma vez que a reação de apoio do mancal axial passivo não tem componente viscosa, o modelo matemático para a força magnética na direção z é:

$$R_T = F_z = -K_z(z)z(t) \quad (3.11)$$

Para não afetar o desempenho dos mancais radiais da bancada, a faixa de deslocamentos admissíveis ao eixo na direção axial é pequena. Para o escopo deste trabalho, o intervalo máximo admissível para o deslocamento axial do eixo será de $[-3, 3]$ mm.

Capítulo 4

Modelos Computacionais

4.1 Modelos Numéricos

Para computar a força magnética em diferentes geometrias, foi utilizado um modelo numérico pelo método de elementos finitos. Nesta análise paramétrica inicial, poderia-se utilizar também um modelo semi-analítico como o de [36], [35] e revisitos em [37] e [28]. No entanto, devido à facilidade de modelar diferentes geometrias com menos simplificações e a possibilidade de incluir no estudo o movimento relativo entre o rotor e estatores magnéticos, optou-se por utilizar um um modelo numérico.

Desta forma, na busca de avaliar as topologias possíveis para o mancal magnético axial, dois arranjos foram estudados por meio de simulações por elementos finitos em diferentes configurações. Conforme apresentado no Capítulo 2, os materiais podem ser magnetizados em diferentes direções, o que permite construir formas variadas de mancais magnéticos axiais de acordo com a orientação de magnetização dos ímãs instalados no rotor e estator.

As interações magnéticas nas topologias analisadas foram computadas por meio de dois tipos de estudo:

- Estudo magnetoestático.
- Estudo no domínio do tempo com translação do rotor.

No primeiro caso, o do estudo magnetoestático, não há movimento relativo entre o rotor e o estator do mancal. Este estudo é essencialmente igual ao caso do modelo semi-analítico, com a diferença natural de que, neste, a geometria e os materiais presentes no modelo são todos incluídos no estudo, sem necessidade de simplificar o modelo excessivamente a ponto de descaracterizá-lo.

Para computar o campo magnético na geometria estudada pelo método de elementos finitos, as equações de Maxwell na forma das Equações 4.1 a 4.3 são avaliadas numericamente para cada elemento de uma malha de elementos tridimensional. A

Tabela 4.1: Propriedades do material Arnold Magnetics N42, utilizado para os ímãs permanentes das simulações. Dados da biblioteca de materiais do Ansys Maxwell.

Propriedade	Valor
Densidade de Fluxo Remanente, B_r [T]	1.3
Força Coercitiva, H_c [A/m]	10^6
Densidade [kg/m ³]	7500

geração da malha e a solução das equações foram obtidas utilizando o *software* ANSYS R19.2:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (4.3)$$

Em todas as análises deste trabalho, o material escolhido para os ímãs foi o ArnoldMagnetics N42, um ímã de NdFeB disponível comercialmente. As propriedades magnéticas deste material já vem definidas na biblioteca do ANSYS para diferentes temperaturas. Nas simulações realizadas, assumiu-se a temperatura de trabalho como 20°C. As propriedades magnéticas do material a esta temperatura são apresentadas na tabela 4.1.

Evidentemente, as propriedades dos materiais magnéticos, ainda que de mesma classe, como o N42, podem variar de acordo com o fabricante. Espera-se, portanto, alguma diferença para os ímãs que de fato forem adquiridos para a construção do mancal proposto neste trabalho.

Simulações no Domínio do Tempo

Na simulação no domínio do tempo, a excitação sobre o modelo se dá pelos ímãs permanentes. A translação ao longo do eixo z é imposta aos corpos que compõem o rotor do mancal. Muito embora o movimento real do eixo levitante ocorra em pelo menos 3 direções, não é possível na versão atual do software utilizado combinar movimentos em mais do que uma direção no estudo transiente. Assim, os deslocamentos laterais são nulos no escopo das simulações. Evidentemente, por mais rígidas que possam ser as reações de apoio dos mancais magnéticos radiais, sempre existirá algum movimento lateral do rotor. Afinal, os mancais magnéticos radiais são ativos e a reação de apoio depende diretamente da medição do deslocamento transversal do eixo.

Apesar de a simulação ocorrer no domínio do tempo, nenhuma das variáveis envolvidas e consideradas na simulação dependem efetivamente do tempo, com ex-

ceção da posição axial do rotor. Ainda assim, os efeitos da inércia do rotor não são considerados no cálculo da força magnética. Essencialmente, portanto, estas simulações tornam-se similares aos estudos magnetostáticos, sendo o tempo um parâmetro adicional que, neste caso, somente simplifica a forma de posicionar o rotor ao longo da trajetória esperada na operação do mancal.

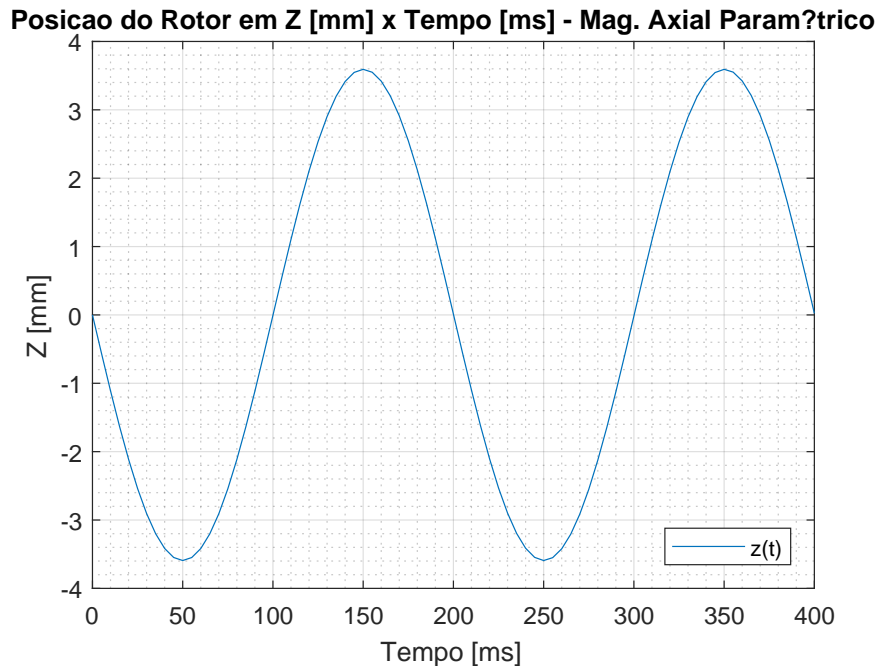


Figura 4.1: Posição do rotor [mm] x Tempo [ms] - Magnetização axial

Um exemplo do movimento de translação imposto ao rotor em cada um dos estudos paramétricos é apresentado na figura 4.1. Adicionalmente a força magnética é obtida em intervalos regulares deste deslocamento, como mostrado na figura 4.8. Para os outros estudos paramétricos, omite-se estas curvas uma vez que a característica de interesse do mancal é a relação entre força magnética e posição axial do rotor.

Sendo assim, seria de grande importância, num trabalho futuro, combinar de alguma forma nas simulações os deslocamentos axiais com deslocamentos excêntricos ao eixo, e incluir os efeitos dinâmicos para avaliar o sistema de forma mais completa.

Seguindo recomendação da documentação do *software*, as faces laterais dos cilindros do modelo são recortadas, de forma que a seção transversal de um corte no plano normal ao eixo longitudinal do mancal teria a forma de um polígono de 22 lados. Isto leva a pequenas diferenças nas massas magnéticas dos objetos das simulações se estes fossem cilindros perfeitamente redondos.

O cálculo do campo magnético resultante sobre o modelo neste caso é obtido

pela solução numérica das equações de Maxwell na forma da Equação 4.4.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma(\mathbf{E}) \quad (4.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.5)$$

Que combinadas resultam nas Equações 4.6 e 4.7

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (4.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.7)$$

Malha e Convergência

O software utilizado para as análises por elementos finitos foi o ANSYS Maxwell R19.2. Nele foram desenhados os modelos sobre os quais gera-se uma malha inicial de elementos finitos.

Esta malha inicial conta também com controles locais em que os elementos próximos às superfícies de interesse é reduzido com relação ao resto do modelo. Procurou-se utilizar os menores elementos iniciais possíveis para a malha mantendo o custo computacional razoável.

Em seguida, cada modelo é analisado em passos consecutivos em que a malha é refinada a cada iteração até atingir o critério de convergência ou o número máximo de iterações estabelecido. Para todas as simulações rodadas, definiu-se como critério de convergência que o erro máximo da energia do sistema é de 1%.

Após a análise magnetostática, a malha refinada é utilizada pelas análises no domínio do tempo. No caso dos estudos paramétricos, um novo estudo magnetostático é executado para cada alteração da geometria do problema. A Figura 4.2 mostra o resumo dos dados da malha de um dos problemas simulados nesta dissertação.

4.2 Topologias Estudadas

A bancada de levitação magnética do LAVI conta atualmente com dois mancais magnéticos radiais. Com a adição do mancal axial que será proposto neste trabalho, o rotor da bancada poderá operar em total levitação, sem contato mecânico. A figura 4.3 apresenta um representação 3D da bancada com um modelo de mancal axial.

Nesta seção serão apresentadas as topologias de mancal axial em anel estudadas parametricamente que levaram à escolha de uma determinada configuração para o

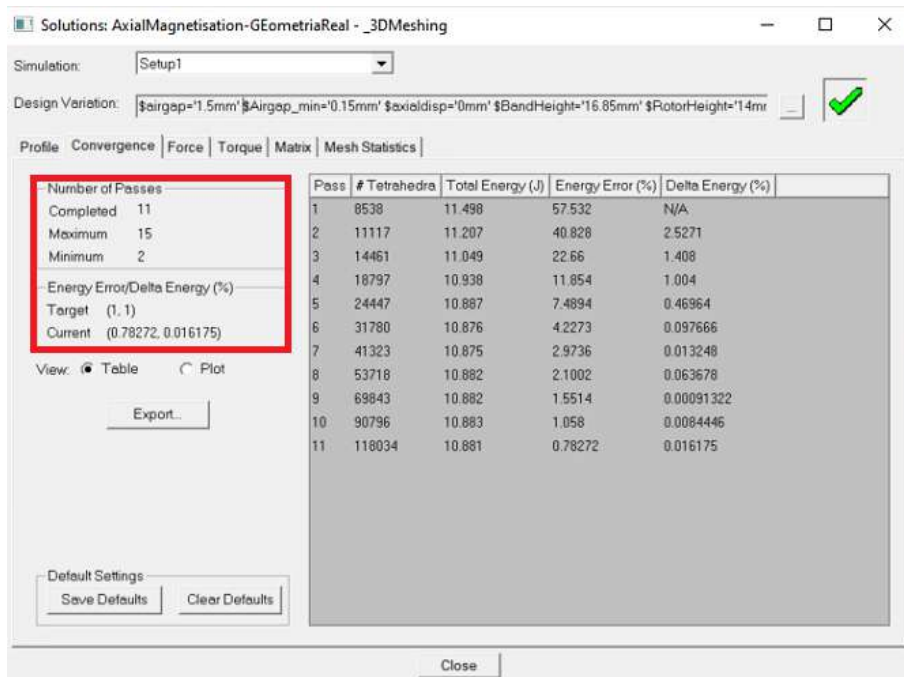


Figura 4.2: Exemplo da análise de malha para um dos casos estudados neste trabalho. Em destaque o critério de convergência e número de iterações de refinamento.

projeto.

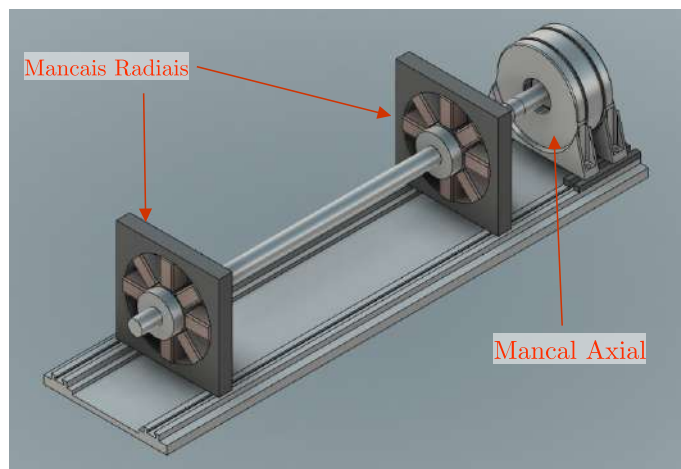


Figura 4.3: Vista isométrica do modelo 3D da bancada ilustrando os mancais radiais e a o mancal axial proposto.

4.2.1 Magnetização Axial

A primeira topologia estudada consiste em um mancal axial com rotor e estatores em formato de disco, ilustrado nas figuras 4.4 e 4.5.

Nesta configuração, tem-se um rotor com um ou mais ímãs permanentes disposto entre dois estatores com ímãs permanentes idênticos. Os ímãs dos estatores estão orientados na mesma direção e opostos ao ímã do rotor. Na figura 4.5, pode-se

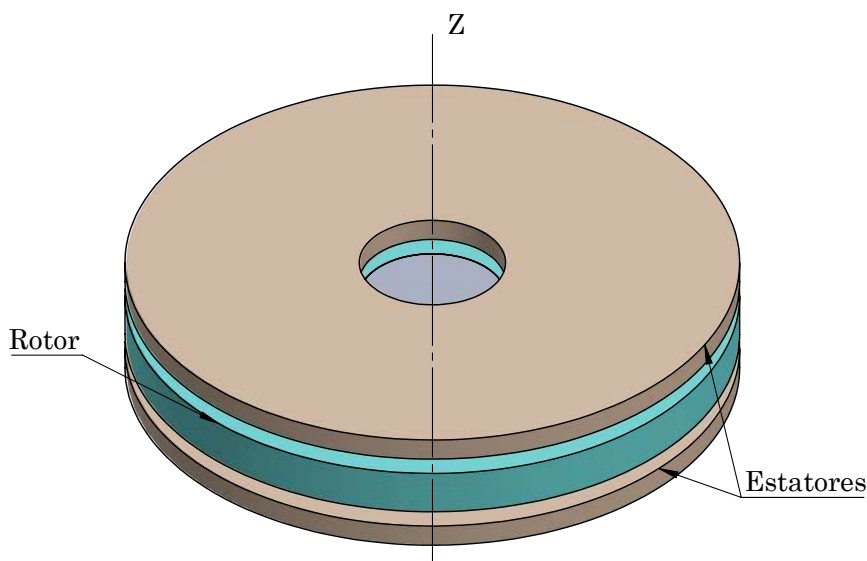


Figura 4.4: Configuração simplificada - Mancal com Rotor e Estatores magnetizados axialmente

observar que o rotor tem seu polo norte magnético orientado na direção $-z$, enquanto a face polar norte de cada estator está alinhada com $+z$.

A reação de apoio ao eixo na direção axial tem origem, portanto, na força magnética de repulsão entre o rotor e estator, devido à mesma direção de polarização das superfícies superior do rotor e inferior do estator superior e vice-versa. Por isto a necessidade de dois estatores nesta configuração de mancal.

Naturalmente, surgirão componentes transversais da reação de apoio no plano xy . Para o escopo deste trabalho entende-se que tais componentes podem ser plenamente absorvidas pelos mancais radiais dispostos ao longo do eixo. Além disso, poderia-se esperar também um torque de pequena magnitude na direção z devido às componentes transversais. Entretanto, quando o rotor é mantido alinhado no eixo o torque verificado nas simulações paramétricas foi da ordem de 10^{-6} N m e desprezado na comparação.

Na Figura 4.6, a distância entre z_1 e z_2 é de 20mm. Como a altura do rotor é de 12mm, a faixa máxima de deslocamento efetiva do rotor é de 8mm, no intervalo $[-4\text{mm}, 4\text{mm}]$. Assume-se, porém, uma margem de segurança de operação de 10% para evitar o contato entre o rotor e os estatores. Assim, a faixa do deslocamento máximo do rotor nesta simulação foi de $[-3.6\text{mm}, 3.6\text{mm}]$. Importante ressaltar que, nesta topologia, as maiores reações de apoio ocorrem quando a distância entre o rotor e um dos estatores é mínima. Isto é, quando a posição do rotor é $z(t) = \pm 3.6\text{mm}$.

O dimensionamento do modelo inicial teve como base a bancada já existente no LAVI. Como se deseja implementar o mancal axial com mínimas modificações no equipamento existente, o diâmetro externo do rotor e estator limitou-se ao volume

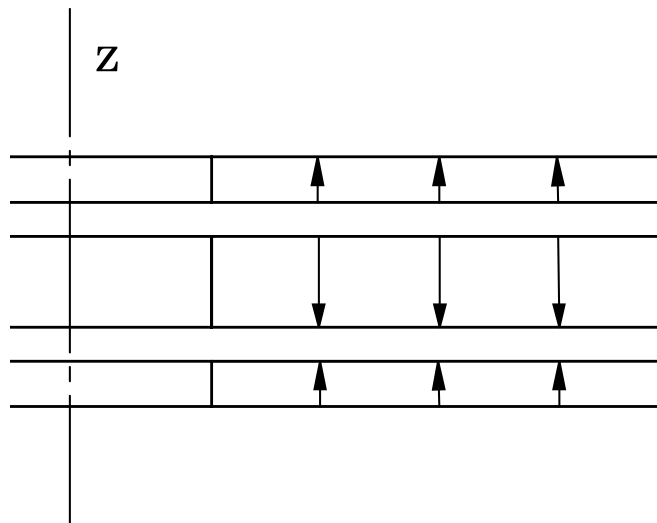


Figura 4.5: Vista em corte de um quarto de seção do mancal axial com geometria em disco - Direção de magnetização dos ímãs permanentes no rotor e estatores.

disponível na bancada atual.

Resultados iniciais - Magnetização Axial

Para o mancal magnetizado axialmente da Figura 4.6 e da Tabela 4.2, montou-se um estudo paramétrico com variações sobre a geometria dos ímãs permanentes. Com base nas limitações geométricas da bancada atual e em uma pesquisa de mercado em que se identificou dimensões comuns de ímãs de Terras-Raras com disponibilidade imediata, foi preparado o modelo paramétrico variando as dimensões do rotor e do

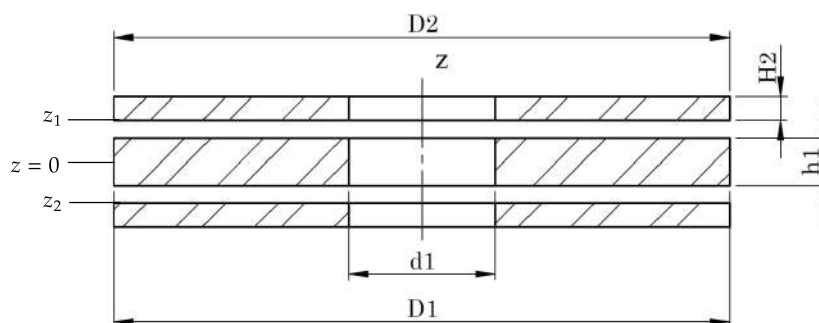


Figura 4.6: Ilustração esquemática das dimensões do modelo simplificado de mancal axial magnetizado axialmente.

Tabela 4.2: Parâmetros geométricos para o modelo de mancal axial com ímãs magnetizados axialmente da Figura 4.6

Parâmetros Geométricos - Magnetização Axial	
Descrição	Símbolo
Diâmetro interno do Rotor e Estator	d_1
Diâmetro externo do Rotor e Estator	D_1, D_2
Altura do Rotor	h_1
Altura do Estator	H_2

Tabela 4.3: Sumário de casos do estudo paramétrico para o mancal magnetizado axialmente. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.1

Parâmetro	Símbolo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Intervalo	Número de Casos
Diâmetro int. Rotor e Estator	d_1	20mm	40mm	5mm	5
Diâmetro ext. Rotor e Estator	D_1, D_2	70mm	100mm	7.5mm	5
Altura do ímã do Rotor	h_1	12mm	12mm	—	—
Altura dos ímãs dos Estatores	H_2	6mm	6mm	—	—
Total:					25

estator do mancal.

Nesta topologia, o mesmo tipo de ímã pode ser utilizado tanto no estator como no rotor. A diferença entre um e outro está na orientação que estão posicionados entre si em função da direção de magnetização. No estudo paramétrico o rotor está magnetizado na direção $-z$ e os estatores na direção $+z$. Foram simuladas 25 variações geométricas desta topologia, variando-se os diâmetros interno e externo do ímã permanente, conforme os casos da Tabela 4.3.

A figura 4.7 ilustra como está distribuída a força máxima da reação de apoio do mancal para cada caso geométrico simulado. Dos 25 casos simulados, serão apresentados nesta seção os Casos 1 e 25, que apresentaram a menor e maior capacidade de carga, respectivamente, além do Caso 17, cujas dimensões mais se aproximam de um ímã disponível no mercado. A Tabela 4.4 apresenta como variou-se as dimensões no estudo paramétrico.

Na superfície da Figura 4.7, o caso 17 está indicado por um círculo. Este caso apresenta capacidade de carga próxima a 400N. O diâmetro externo de 80mm é

Tabela 4.4: Mancal de magnetização axial - Casos Mínimo, Máximo e Selecionado

Parâmetro	Caso 1	Caso 25	Caso 17
d_1, d_2 [mm]	20	40	35
D_1, D_2 [mm]	70	100	77.5
h_1 [mm]	12	12	12
H_2 [mm]	6	6	6
$F_{z,Max}$ [N]	306.5	483.9	386.1
Massa magnética do rotor [g]	315.0	588	334.7
Massa magnética por estator [g]	157.5	294	137.4
Massa magnética total [g]	630	1176	669.4

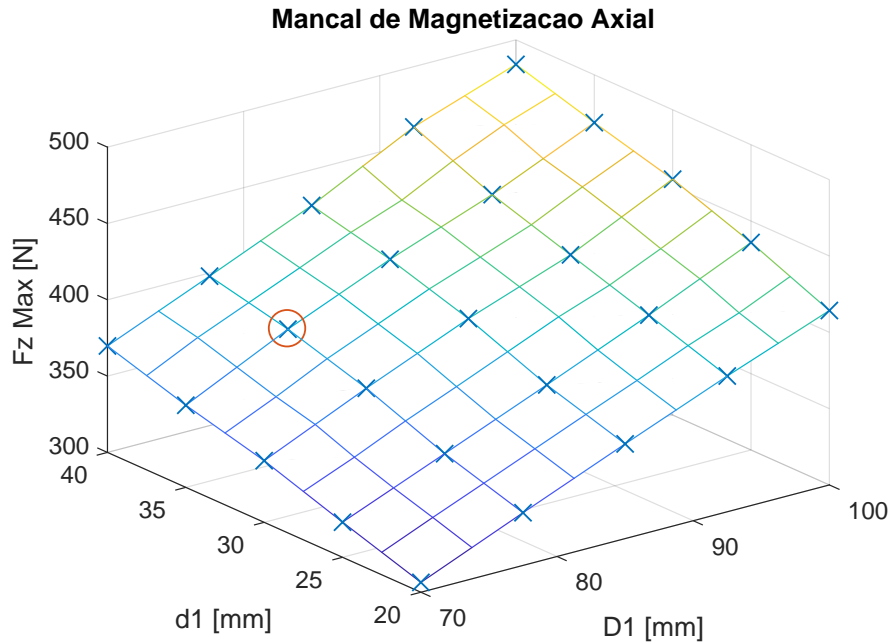


Figura 4.7: Superfície comparativa dos casos paramétricos para o estudo do mancal magnetizado na direção axial.

atraente para a bancada existente por preencher quase todo o espaço disponível para o mancal axial. Além disso, esta combinação de diâmetro interno e externo é encontrada no mercado varejista como já mencionado. O mancal da configuração do caso 17 torna-se assim um candidato viável para implementação na bancada do LAVI.

A primeira etapa da simulação foi o estudo magnetostático de onde obteve-se a malha de elementos finitos refinada para o estudo transiente. Na simulação no domínio do tempo, o deslocamento do rotor ao longo de z é imposto ao sistema e a força magnética é calculada na posição atual do rotor em cada intervalo de tempo da amostra. Para melhor aproveitar o tempo de simulação, optou-se por uma função periódica para o deslocamento do rotor com período $T = 200\text{ms}$ e frequência angular $\omega = 10\pi$. O rotor desloca-se de $z_1' = -3.6\text{mm}$ a $z_2' = 3.6\text{mm}$ e o movimento é descrito na Figura 4.1. A Figura 4.8 apresenta a variação da força magnética em função do tempo.

A Figura 4.9 apresenta a magnitude da força magnética calculada pelo método de elementos finitos em função da posição axial do rotor para os casos selecionados acima. No Anexo A encontra-se as mesmas curvas para os outros casos deste estudo paramétrico.

Para se obter um modelo para $F_z(z)$ do caso 17, adapta-se um polinômio à curva da Figura 4.9. Assumindo que $F_z(z = 0) = 0$ e sendo o modelo da força magnética

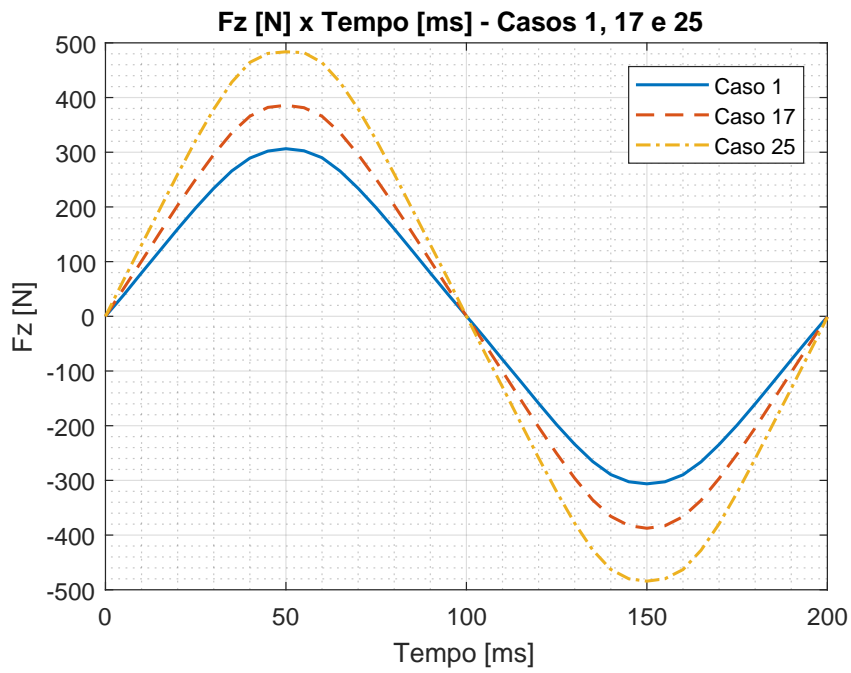


Figura 4.8: Reação de apoio F_z [N] x Tempo [ms] para um ciclo de deslocamento do rotor - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25

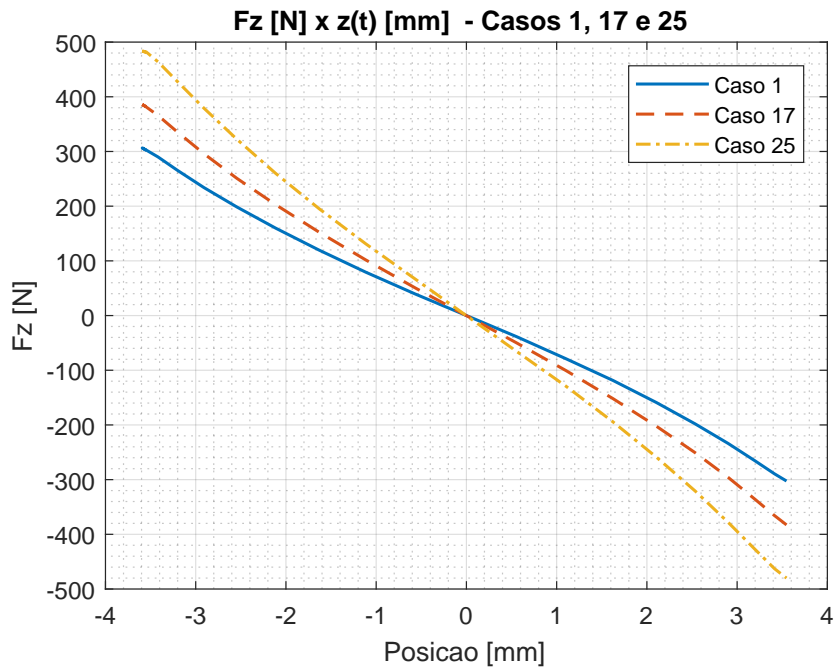


Figura 4.9: Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25

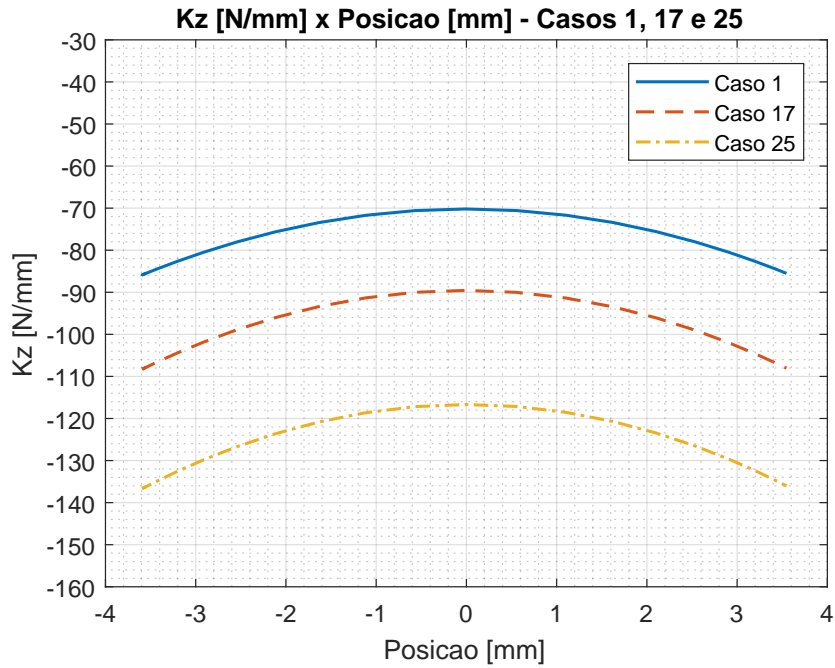


Figura 4.10: Rigidez do mancal axial [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização axial: Casos 1, 17 e 25.

$F_z = -K_z z(t)$, chega-se com este mesmo polinômio a uma função para $K_z(z)$. Para o caso 17 deste estudo paramétrico, tem-se $K_z(z)$ e $F_z(z)$ dados pelas equações 4.8 e 4.9:

$$K_z(z) = 1.46z^2 + 0.034z + 89.55 \quad (4.8)$$

Da equação 4.8, nota-se o peso do termo constante na rigidez da reação de apoio do mancal com relação aos demais termos do polinômio. Isto é verificado também por inspeção da Figura 4.9, em que a relação entre o deslocamento axial do rotor e a magnitude da força magnética é quase linear.

$$F_z(z) = -K_z(z)z = -1.46z^3 - 0.034z^2 - 89.55z \quad (4.9)$$

4.2.2 Magnetização Radial

Uma forma alternativa para o mancal magnético axial compreende que os ímãs permanentes no rotor e estator estejam magnetizados na direção radial do rotor. Com esta topologia, são possíveis configurações em que a reação de apoio na direção axial provém tanto da força de repulsão entre polos magnéticos iguais, ou da atração entre polos magnéticos opostos.

Quando os polos magnéticos da superfície interna do estator e da superfície

externa do rotor são opostos, a reação de apoio do mancal é a força magnética de atração gerada entre esses polos. O rotor tende a se manter no centro do estator e o sentido da reação de apoio é oposto ao deslocamento do eixo. A Figura 4.11 ilustra essa configuração.

No caso de ímãs magnetizados em sentidos opostos e, portanto, com a força de apoio do mancal gerada devido à repulsão dos polos magnéticos, são necessários dois estatores. Diferente do caso da Figura 4.11, o rotor é mantido axialmente externo ao estator como na Figura 4.17. Desta forma é possível ter reações de apoio nos dois sentidos da direção axial do mancal.

Ímãs em atração

A primeira configuração estudada para o mancal axial magnetizado na direção radial, foi aquela que a força magnética é de atração. A configuração é composta por um rotor e um estator, magnetizados conforme na Figura 4.12. A força de apoio do mancal provém da atração magnética entre as superfícies externa do rotor e interna do estator, de polaridades opostas.

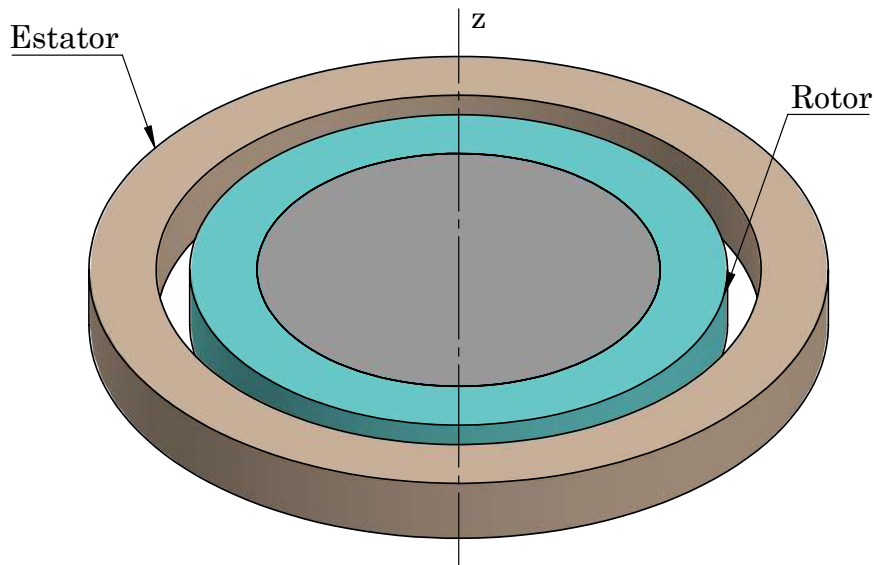


Figura 4.11: Vista isométrica do modelo simplificado para um mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e no mesmo sentido. Neste arranjo somente 1 estator é necessário para o mancal atuar nos dois sentidos da direção axial.

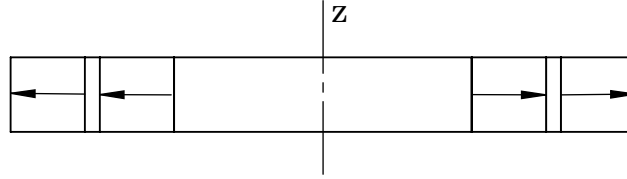


Figura 4.12: Vista esquemática do mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e no mesmo sentido.

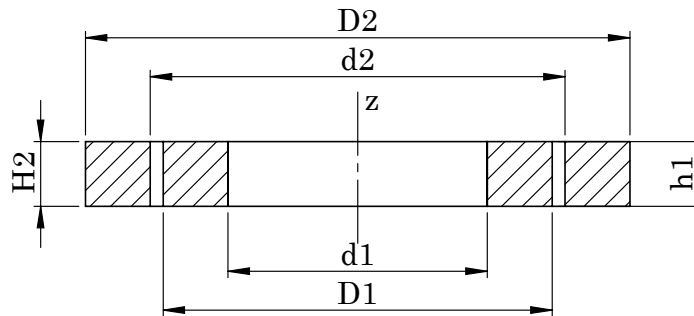


Figura 4.13: Ilustração esquemática das dimensões do modelo simplificado do mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial.

O modelo construído é parametrizado e definido a partir do diâmetro externo do Rotor e do entreferro nominal. Na Tabela 4.6 descreve-se como os parâmetros foram variados nos 25 casos estudados. As expressões para os parâmetros dependentes são apresentadas na Tabela 4.5. A espessura dos ímãs do rotor e do estator em todos os casos é de 3 mm.

Tabela 4.5: Parâmetros geométricos para os modelos de mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial da Figura 4.13. O modelo é definido a partir dos valores de D_1 e a . Os valores de cada parâmetro individualmente em cada caso pode ser encontrado nas Tabelas A.2 e A.3

Parâmetros - Magnetização Radial		
Descrição	Símbolo	Expressão/Valor
Diâmetro interno do Rotor	d_1	$d_1 = D_1 - 6$
Diâmetro externo do Rotor	D_1	—
Entreferro nominal	a	—
Altura do Rotor e Estator	h_1, H_2	5mm
Diâmetro interno do Estator	d_2	$d_2 = D_1 + 2a$
Diâmetro externo do Estator	D_2	$D_2 = d_2 + 6$

Neste estudo os casos 5 e 21 apresentam, respectivamente, a maior e menor capacidade de carga na direção axial. Quanto ao fator disponibilidade no mercado, os casos 2 e 22 tem as configurações mais vantajosas. No entanto, o entreferro na

Tabela 4.6: Sumário de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado na direção radial e de força magnética atrativa. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.2

Parâmetro	Símbolo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Intervalo	Número de Casos
Diâmetro externo do Rotor	D1	30mm	66mm	9mm	5
Entreferro nominal	a	0.9mm	3mm	0.525mm	5
Altura do rotor e estator	h_1, H_2	5mm	5mm	—	—
Altura do rotor e estator	h_1, H_2	5mm	5mm	—	—
Total:					25

Tabela 4.7: Mancal de magnetização radial - Força atrativa - Casos mínimo, máximo e selecionado

Parâmetro:	Caso 5	Caso 21	Caso 22
d1 [mm]	60	24	33
D1 [mm]	66	30	39
d2 [mm]	67.8	36	45
D2 [mm]	73.8	42	51
h1, H2 [mm]	5	5	5
Força magnética máxima $F_{z,max}$ [N]	151.48	37.28	47.99
Massa magnética do rotor [g]	22.26	9.54	12.72
Massa magnética do estator [g]	25.02	13.78	16.96
Massa magnética total [g]	47.29	23.32	29.69

configuração do caso 2 é de apenas 0.9 mm, o que significa menor tolerância para deslocamentos transversais do eixo.

Na Figura 4.14 verifica-se a magnitude da reação de apoio do mancal axial em função das variações geométricas no estudo. A localização do caso 22 é indicada por um círculo na superfície. Apesar da reação de apoio menor com relação ao caso 2, a configuração do caso 22 mostra-se mais vantajosa para a bancada de testes por ser mais tolerante a deslocamentos laterais do rotor.

De forma análoga ao mancal de polarização axial, obtém-se um modelo matemático para a reação de apoio $F_z(z)$ adaptando um polinômio aos dados numéricos na faixa de deslocamento desejada para esta configuração do mancal, $-3\text{mm} < z < 3\text{mm}$, apresentados na Figura 4.15.

Assumindo que a força magnética é nula quando o rotor está na posição $z = 0\text{mm}$, o polinômio ajustado para a curva do Caso 22 na Figura 4.16, é expresso na Equação 4.11. A Figura 4.16 apresenta a rigidez da reação de apoio para os casos selecionados de acordo com o polinômios ajustados.

$$F_z(z) = 0.144z^3 + 0.004z^2 - 17.23z \quad (4.10)$$

E a rigidez do mancal do caso 22 do estudo paramétrico para o mancal de magnetização radial com ímãs em atração:

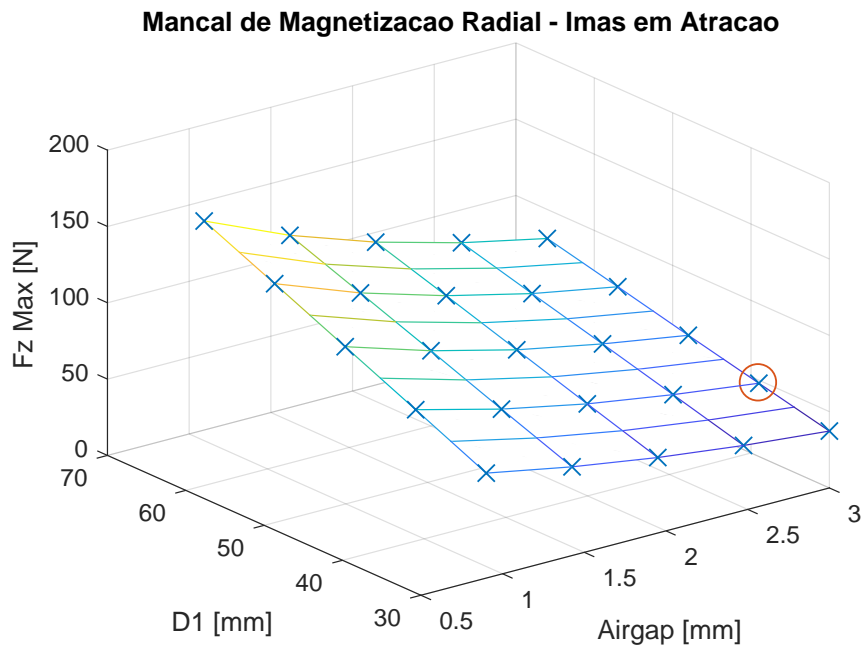


Figura 4.14: Superfície comparativa dos casos paramétricos para o estudo do mancal magnetizado na direção radial com ímãs em atração.

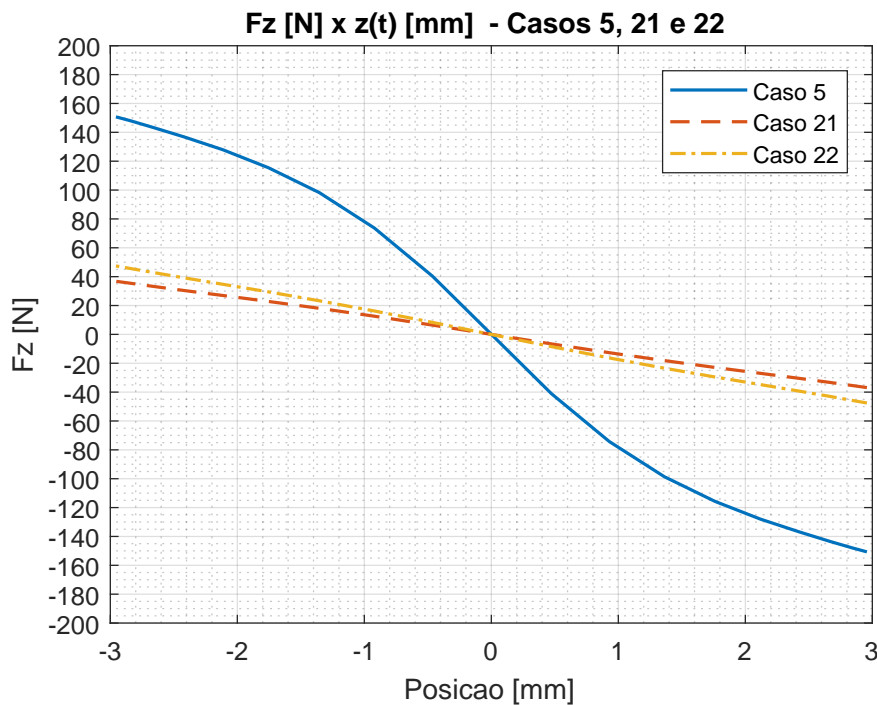


Figura 4.15: Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização Radial - Atração: Casos 5, 21 e 22

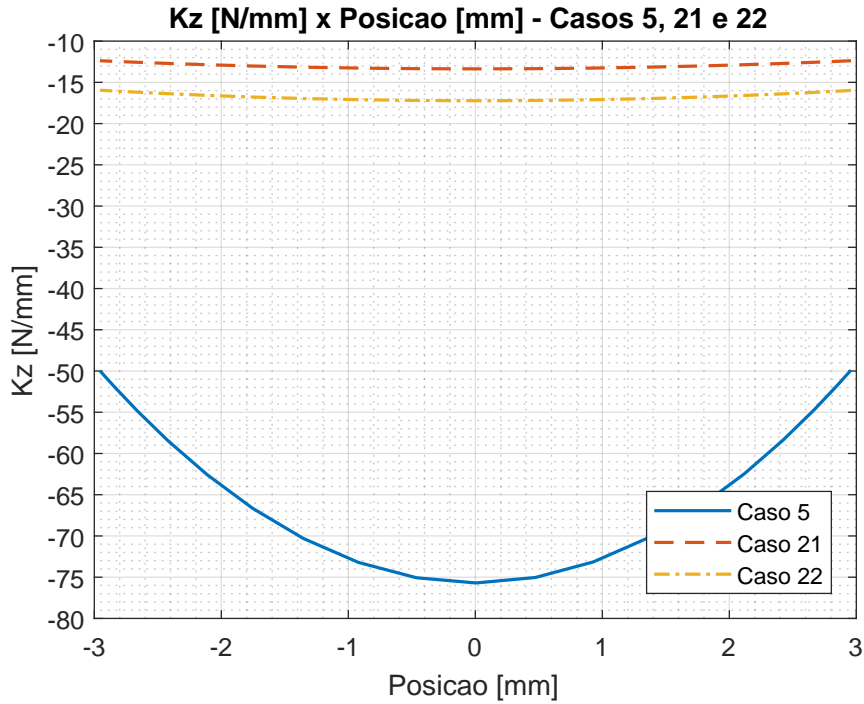


Figura 4.16: Rigidez do mancal [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização Radial - Atração: Casos 5, 21, 22.

$$K_z(z) = \frac{-F_z(z)}{z} = -0.144z^2 - 0.004z + 17.23 \quad (4.11)$$

Novamente, verifica-se a dominância do termo constante na Equação 4.11. Isto evidencia a linearidade da reação de apoio para pequenos deslocamentos axiais. Importante notar, no entanto, que nestas simulações os deslocamentos transversais são nulos e que a mesma relação entre intensidade de força magnética e distância entre os ímãs é esperada quando o rotor se desloca na direção transversal ao eixo de rotação. Provavelmente, esta seria a configuração do mancal axial que demandaria maior capacidade de atuação e menor tempo de resposta dos mancais radiais, para se evitar o contato entre os ímãs do mancal axial.

Ímãs em repulsão

A configuração em que a reação de apoio provém da repulsão entre as superfícies de mesma polaridade dos ímãs é exibida na Figura 4.17. Para que o sentido da reação seja sempre oposto ao do deslocamento do rotor em z , são necessários 2 estatores, tal como na topologia de magnetização axial, magnetizados conforme ilustrado na Figura 4.18.

Na posição de equilíbrio, a menor distância axial entre o rotor e os estatores é

de 2.5mm. Optou-se por uma faixa de deslocamento um pouco menor para o rotor nesta topologia para manter a construção compacta axialmente enquanto o rotor é mantido fora do volume interno dos estatores. A translação do rotor foi então limitada ao intervalo $-2.5\text{mm} < z < 2.5\text{mm}$.

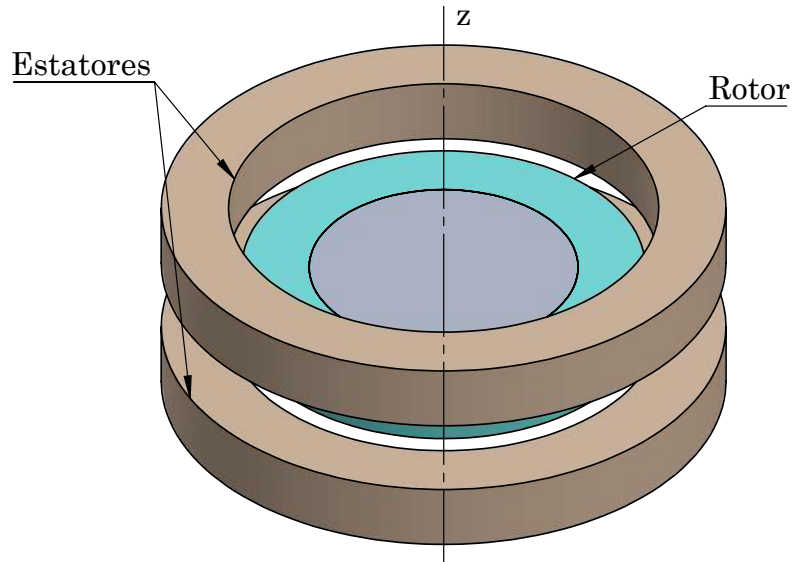


Figura 4.17: Vista isométrica do modelo simplificado para um mancal axial com ímãs magnetizados radialmente e em sentidos opostos.

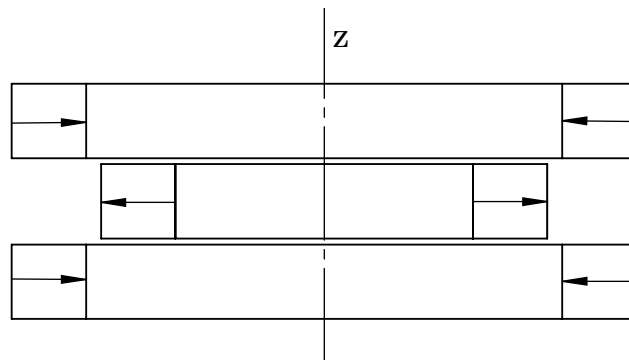


Figura 4.18: Vista esquemática em seção do mancal de magnetização radial com dois estatores.

O estudo paramétrico elaborado para esta geometria também tomou como base as dimensões de ímãs encontrados no mercado. Sendo esta também uma topologia de magnetização radial, a mesma limitação geométrica do caso anterior se aplica e os anéis do rotor e dos estatores seriam na realidade compostos por ímãs em forma de segmentos de arco.

A Tabela 4.8 apresenta o resumo dos 25 casos paramétricos para o mancal de magnetização radial e força repulsiva. Neste estudo as dimensões escolhidas são muito próximas da versão magnetizada radialmente e força atrativa.

Tabela 4.8: Sumário de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado na direção radial e de força magnética repulsiva. A descrição completa dos casos é encontrada no anexo, na Tabela A.3

Parâmetro	Símbolo	Valor Inicial	Valor Final	Intervalo	Número de Casos
Diâmetro externo do Rotor	D1	25mm	60mm	8.75mm	5
Entreferro nominal	a	0.9mm	3mm	0.525mm	5
Altura do rotor e estator	h_1, H_2	5mm	5mm	—	—
Total:					25

As Figuras 4.20 a 4.21 apresentam a reação de apoio e rigidez do mancal nos casos selecionados. Novamente, foram selecionados os casos em que a reação de apoio é mínima (Caso 21), máxima (Caso 5), e na configuração que a geometria é mais atrativa quanto à disponibilidade dos ímãs no mercado (Caso 22).

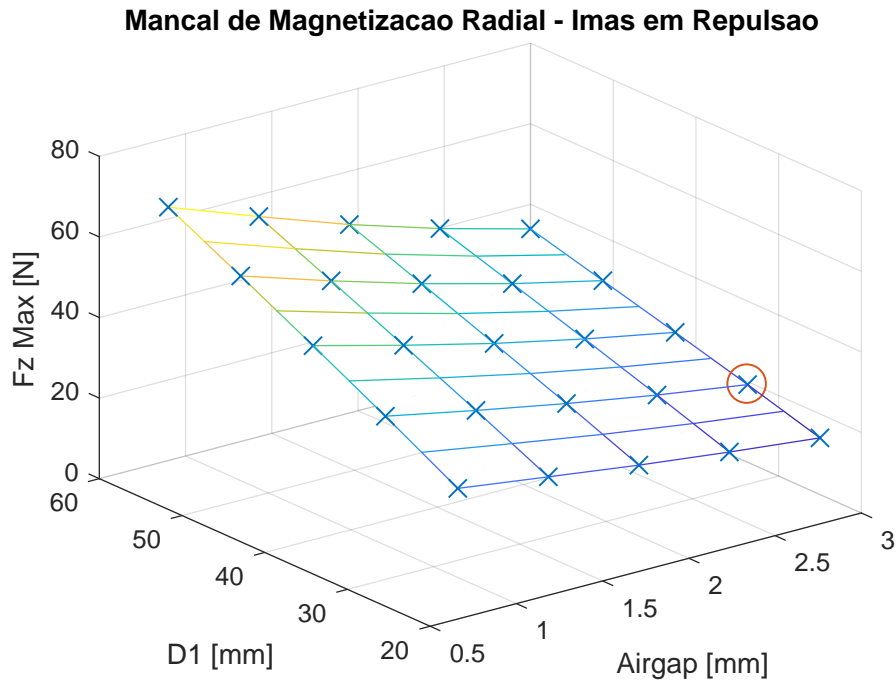


Figura 4.19: Magnitude da reação de apoio em função dos parâmetros do estudo paramétrico para a topologia de mancal axial passivo magnetizado na direção radial com ímãs em repulsão.

A Figura 4.19 apresenta os valores máximos obtidos para a magnitude da reação de apoio nesta configuração em função dos parâmetros variados neste estudo. No Anexo A encontram-se os gráficos da força de apoio em função de z para os outros casos do estudo.

Para obter a função que descreve a reação de apoio conforme os dados de simulação para o caso 22, ajusta-se um polinômio de grau 3 para os valores obtidos de $F_z(z)$. A função está descrita na Equação 4.12.

Tabela 4.9: Mancal de magnetização radial - Força Repulsiva - Casos de F_z mínimo, máximo e geometria selecionada

Parâmetro:	Caso 5	Caso 21	Caso 22
d_1 [mm]	54	19	27.75
D_1 [mm]	60	25	33.75
d_2 [mm]	61.8	31	39.75
D_2 [mm]	67.8	37	45.75
h_1, H_2 [mm]	5	5	5
Força magnética máxima $F_{z,max}$ [N]	62.90	14.07	19.28
Massa magnética do rotor [g]	19.98	7.71	10.78
Massa magnética por estator [g]	22.71	11.92	14.98
Massa magnética total [g]	65.4	31.55	40.74

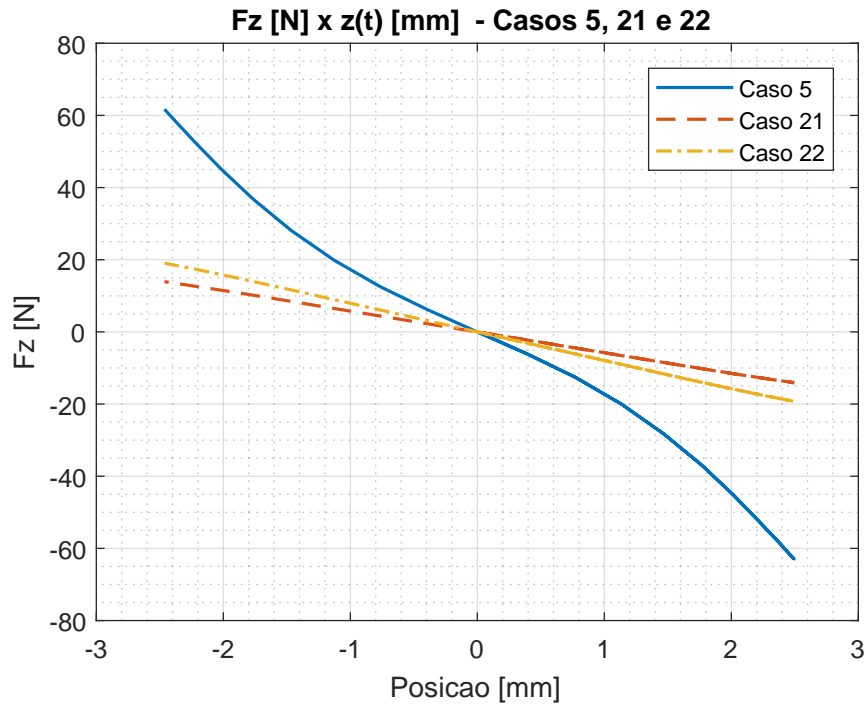


Figura 4.20: Reação de apoio F_z [N] x Posição do rotor [mm] - Magnetização Radial - Força Repulsiva: Casos 5, 21 e 22

$$F_z(z)[N] = 0.047z^3 + 0.002z^2 - 8.036z \quad (4.12)$$

E, a rigidez da reação de apoio:

$$K_z(z)[N/mm] = -\frac{dF_z(z)}{dz} = -0.047z^2 - 0.002z + 8.036 \quad (4.13)$$

Novamente, nota-se na Equação 4.13 o peso do termo constante na rigidez de apoio.

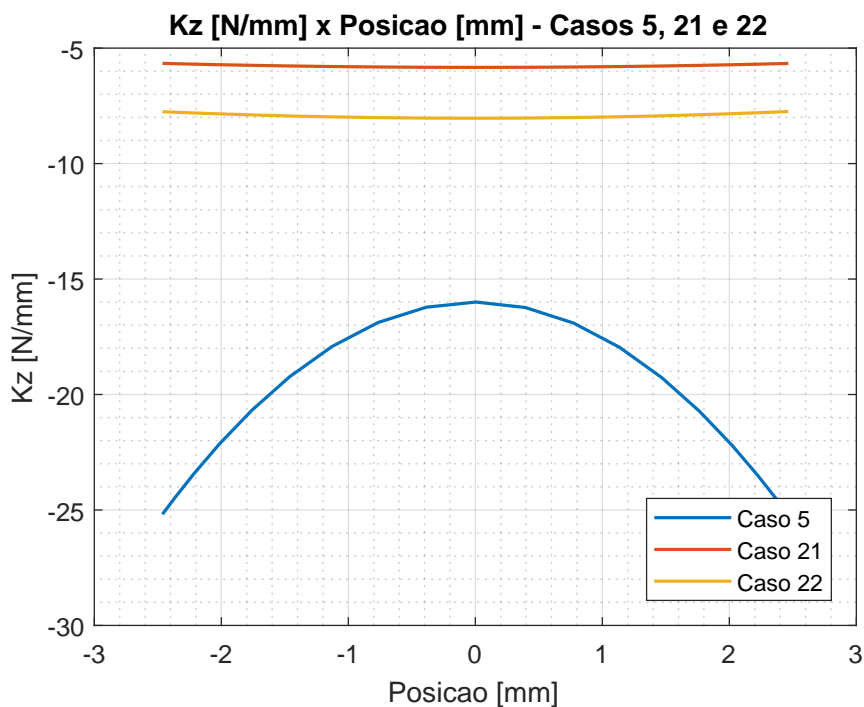


Figura 4.21: Rigidez do mancal axial [N/mm] x Posição [mm] - Magnetização Radial - Força Repulsiva: Casos 5, 21, 22

4.2.3 Sumário Comparativo – Estudos Paramétricos

Além evidentemente da magnitude da reação de apoio F_z , outro aspecto comparativo para as topologias do mancal é a rigidez da força para dada faixa de trabalho. Em todas as topologias, para a faixas de deslocamento axial desejada para o mancal, a rigidez da reação de apoio em função do deslocamento axial do rotor é aproximada por um polinômio de segundo grau, muito embora pudesse ser aproximada por uma reta para pequenos deslocamentos.

Uma diferença entre as topologias, evidenciada nos casos de maior magnitude em cada estudo paramétrico nas Figuras 4.10, 4.16 e 4.21, é que nas topologias de magnetização axial e radial com força repulsiva, a reação do mancal fica mais rígida a medida que o rotor se afasta da posição neutra. No caso da configuração de polarização radial e força atrativa, ocorre o inverso: a reação de apoio é mais rígida quando o rotor está mais próximo da posição neutra.

Apesar de menor, a rigidez da reação nas configurações magnetizadas radialmente é quase constante, o que pode ser mais vantajoso na hora de incluir o modelo do mancal axial no controlador dos mancais radiais.

As perturbações transversais esperadas para cada topologia também são relevantes para a avaliação do desempenho dos mancais. Devido à condição de contorno

de que os deslocamentos transversais são nulos nas simulações, este efeito não pode ser observado nos resultados obtidos pelas simulações.

Para efeitos de comparação, inclui-se na Tabela 4.10: as forças máximas obtidas nas simulações dos casos selecionados para cada topologia, a massa total de material magnético e a curva de rigidez ajustada para a faixa de deslocamento $-3\text{mm} < z < 3\text{mm}$. O gráfico das funções $F_z(z)$ e $K_z(z)$ para os casos selecionados de cada topologia são apresentados comparativamente nas Figuras 4.22 e 4.23

Tabela 4.10: Sumário comparativo entre os casos selecionados nos estudos paramétricos de cada topologia.

	Mag. Axial	Mag. Radial - Atração	Mag. Radial - Repulsão
Caso	17	22	22
Massa magnética total [g]	669.4	29.7	40.7
$F_{z,Max}$ [N]	386.1	48	19.3
z_{min}, z_{max} [mm]	[-3, 3]	[-3, 3]	[-2.5, 2.5]
K_z [N mm ⁻¹]	$1.46z^2 + 0.34z + 89.55$	$-0.144z^2 - 0.004z + 17.23$	$-0.047z^2 - 0.002z + 8.036$

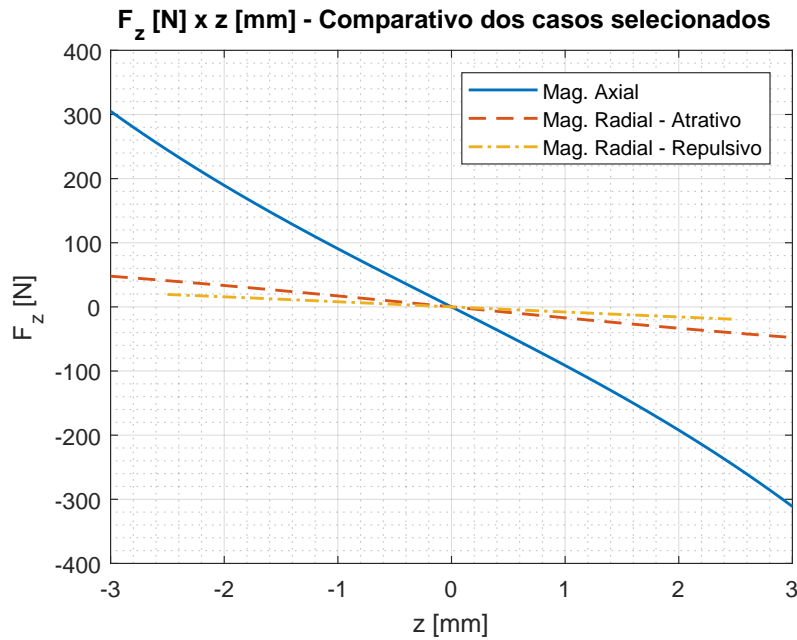


Figura 4.22: Modelo numérico da rigidez da reação de apoio para faixa de deslocamento admissível do mancal. Gráfico comparativo dos casos selecionado nas topologias axial e radial.

A Figura 4.24 sumariza a carga máxima suportada por cada topologia em função da massa total de material magnético do mancal. Em todos os casos, utilizou-se a mesma liga de NdFeB para os ímãs permanentes, o ArnoldMagnetics N42, à temperatura de 20°C, conforme mencionado no início do capítulo.

Por inspeção da Tabela 4.10, verifica-se facilmente que as topologias de magnetização radial possuem maior capacidade específica de carga por massa de material

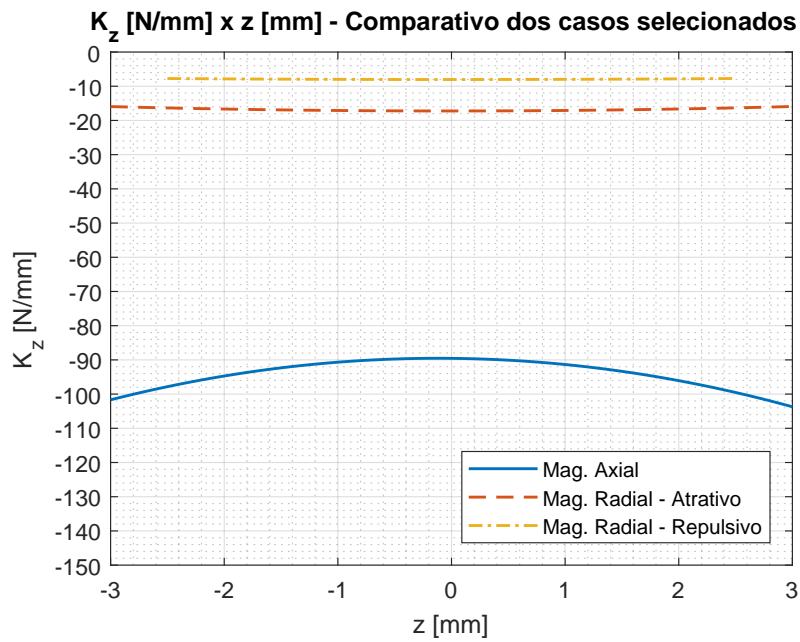


Figura 4.23: Modelo numérico da rigidez da reação de apoio para faixa de deslocamento admissível do mancal. Gráfico comparativo dos casos selecionado nas topologias axial e radial.

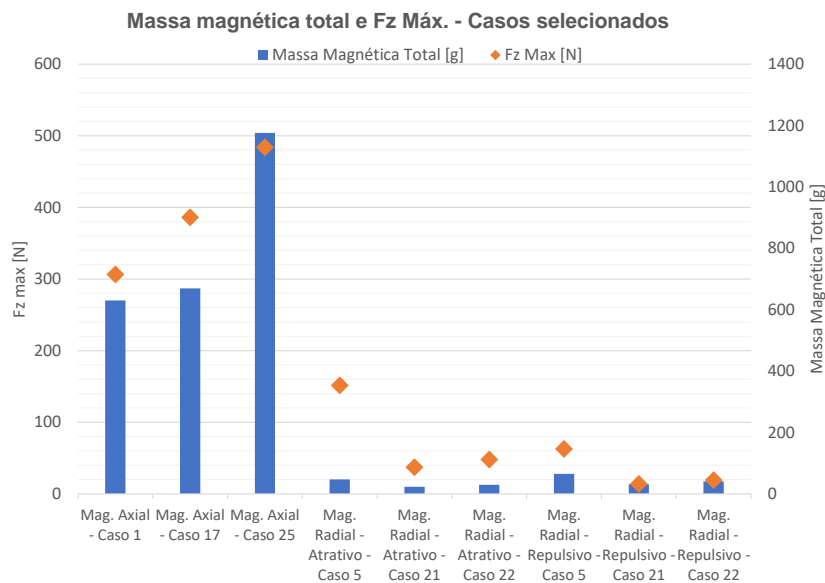


Figura 4.24: F_z Máx. x Massa total de material magnético. Gráfico comparativo entre os casos para F_z mínimo, máximo e geometria selecionada entre as topologias estudadas.

magnético. Entretanto a implementação desta configuração pode ser mais desafiadora. Seria necessário, por exemplo, uma forma de conter e proteger os ímãs na direção radial. Além disso, como já mencionado, encontrar o par certo de ímãs em segmento de arco para o estator e rotor pode ser complexo para pedidos de baixo volume.

Por estes motivos, optou-se pela topologia com ímãs magnetizados na direção axial para o projeto do mancal axial a ser implementado na bancada experimental do LAVI.

Capítulo 5

Projeto de um Mancal Magnético Axial Passivo

Este capítulo trata do projeto de mancal magnético axial desenvolvido especificamente para a bancada experimental do LAVI, representada na na figura 4.3.

5.1 Topologia Escolhida

Com base nos resultados das simulações paramétricas e ponderando-se os fatores construtivos que viabilizam a construção do mancal axial, foi escolhida uma configuração sobre a qual desenvolveu-se o projeto de implementação do mancal na bancada experimental do LAVI.

A escolha da topologia com ímãs magnetizados axialmente se deu após avaliação do desempenho mecânico por meio das simulações de elementos finitos, e da viabilidade construtiva do mancal, como a complexidade de montagem e a disponibilidade e custo dos materiais no mercado.

As dimensões dos ímãs permanentes escolhidos para o mancal projetado, conforme o esquema da figura 4.6, repetido na figura 5.1, são apresentados na Tabela

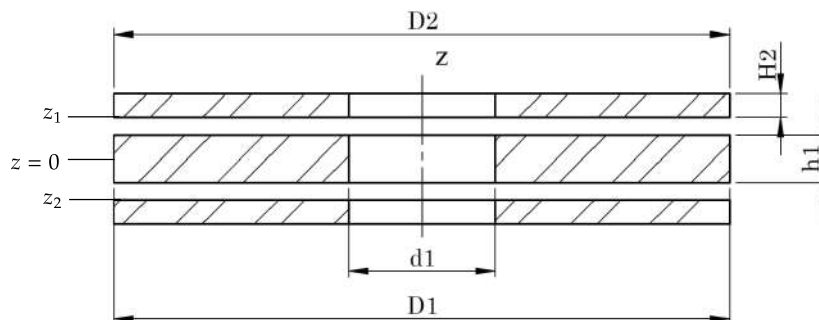


Figura 5.1: Reprodução da Figura 4.6

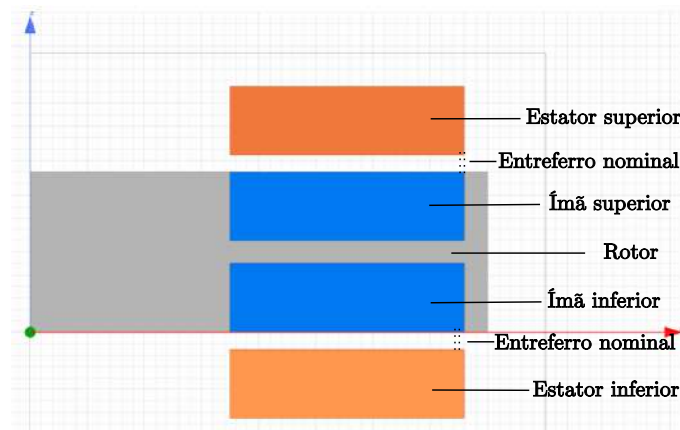


Figura 5.2: Vista da seção transversal do mancal de magnetização axial.

5.1:

Tabela 5.1: Dimensões dos ímãs permanentes utilizados no projeto do mancal axial de magnetização axial para a bancada do LAVI.

Descrição	Símbolo	Valor
Diâmetro interno do Rotor e Estator	d_1	35mm
Diâmetro externo do Rotor e Estator	D_1	76mm
Entreferro nominal	a	2.75mm
Altura do Rotor e Estator	h_1, H_2	6mm

Quanto ao desempenho mecânico, tanto a magnitude da reação de apoio máximo observada e a rigidez do mancal para a faixa de deslocamento admissível para o eixo são adequadas para a aplicação da bancada experimental.

Um outro fator vantajoso a essa topologia, quando comparada à de magnetização radial com ímãs em atração, é a menor susceptibilidade a perturbações radiais. Como a intensidade da força magnética de atração aumenta com a proximidade entre as superfícies magnetizadas, o mancal de magnetização radial é menos tolerante a deslocamentos transversais do eixo e, portanto, altamente dependente do desempenho dos mancais radiais. Desta forma, tratando-se de uma bancada experimental, a configuração de magnetização axial apresenta-se mais segura neste aspecto.

5.1.1 Desempenho Mecânico e Modelo Matemático

Uma vez definida a geometria, o modelo selecionado para o mancal foi simulado novamente com menos simplificações geométricas. Foram rodadas simulações transientes de rotação e translação ao longo do eixo z .

Utilizou-se para o projeto as dimensões dos ímãs do caso 17 do estudo paramétrico para o mancal de magnetização axial. A vista de seção transversal do modelo final é ilustrada na Figura 5.2.

No mancal de magnetização axial, a posição relativa entre os estatores e o rotor determina a rigidez da reação de apoio. Isto porque a magnitude da força de repulsão é inversamente proporcional à distância entre as superfícies magnetizadas do rotor e estator. É possível verificar nas Figuras 5.3 e 5.4 o aumento da densidade de fluxo magnético quando o rotor se aproxima de um dos estatores.

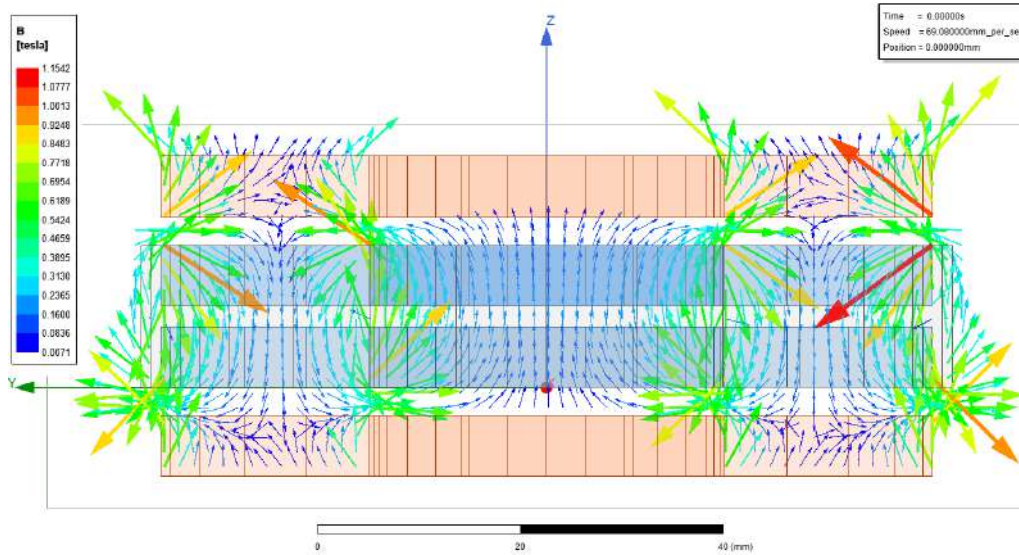


Figura 5.3: Vetores densidade de fluxo magnético para o Caso 4 com o rotor em posição neutra.

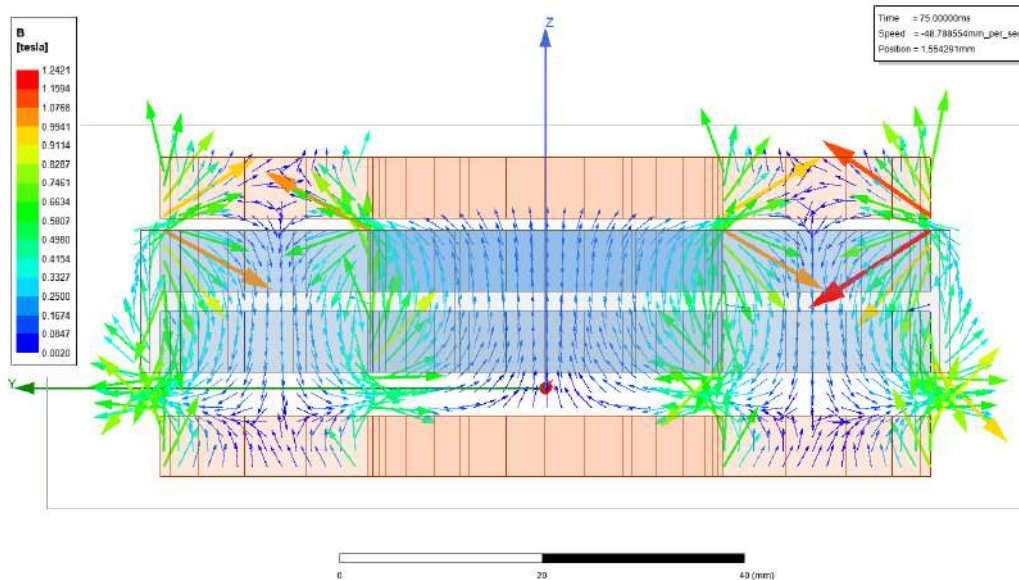


Figura 5.4: Vetores densidade de fluxo magnético para o Caso 4, Entreferro $a = 2.75\text{mm}$, quando próximo de $F_{z,sup}$ máximo.

Quanto mais próxima a superfície superior do rotor estiver da superfície inferior do estator superior, maior será a força gerada por estes na direção $-z$, $F_{z,sup}$. Analogamente, para as superfícies inferior do rotor e superior do estator inferior, vale o

mesmo princípio para $F_{z,inf}$. Finalmente, a reação de apoio resultante sobre o eixo numa posição axial z é:

$$F_z(z) = F_{z,inf} - F_{z,sup} \quad (5.1)$$

Com base nesta observação, montou-se mais um estudo paramétrico do mancal de magnetização axial para melhor entender e comparar o efeito da distância entre os rotores no comportamento mecânico do mancal. Neste estudo variou-se o entreferro nominal do mancal – a distância entre os estatores e o rotor do mancal na posição neutra como na figura 5.2 –, entre 1.5mm e 4mm com passos de 0.5mm. Por fim, simulou-se mais um caso, desta vez com a distância em $2.75mm$, a partir das observações da primeira sequência de estudos.

Como nas simulações para a geometria simplificada, a malha adaptativa de elementos finitos é gerada por um estudo magnetostático e a simulação transiente rodada para um deslocamento prescrito do rotor. A malha final e os dados da malha de elementos finitos para o Caso 4, com entreferro de $2.75mm$ são apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6

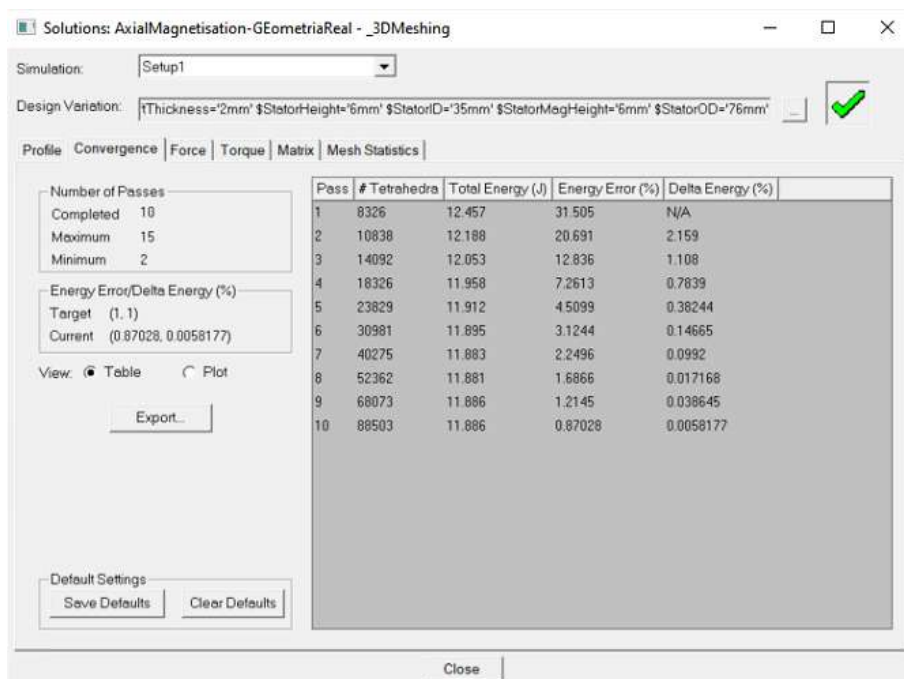


Figura 5.5: Refinamento adaptativo da malha de elementos finitos - Magnetização Axial

Pode-se verificar nas Figuras 5.7 e 5.8 o comportamento da reação de apoio do mancal para 7 configurações diferentes em que varia-se a distância entre o rotor e estatores na posição neutra esta distância será referida como o entreferro nominal a do mancal.

De forma análoga ao método do Capítulo 4, para se obter um modelo mate-

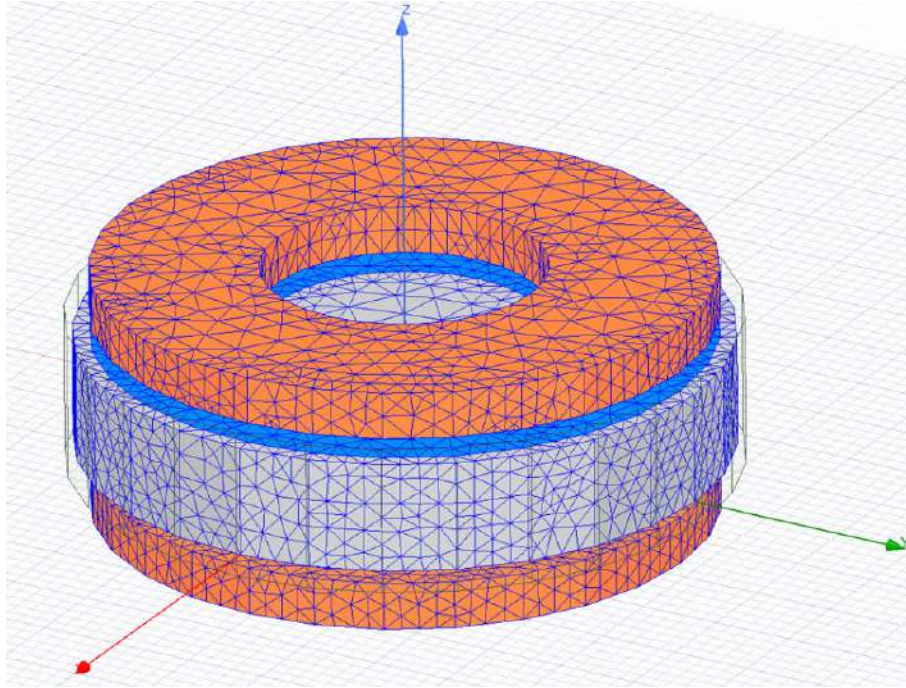


Figura 5.6: Malha de elementos finitos refinada após último passe adaptativo - Magnetização Axial

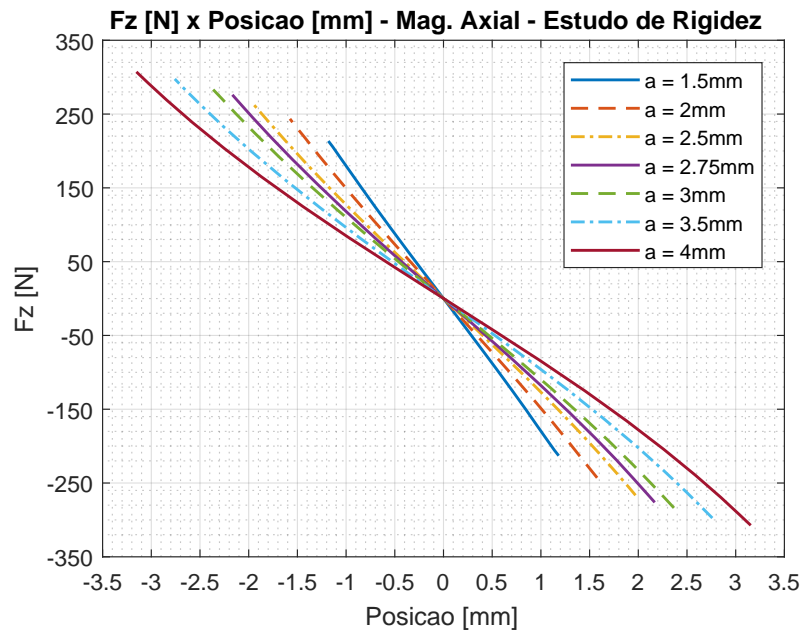


Figura 5.7: Mag. Axial – Força x Posição – Estudo paramétrico para a rigidez do mancal

mático para a magnitude da reação de apoio $F_z(z)$ do mancal axial com entreferro de 2.75mm, adapta-se um polinômio para a curva da figura 5.7 que em seguida é diferenciado em z para se obter a rigidez $K_z(z)$ do mancal.

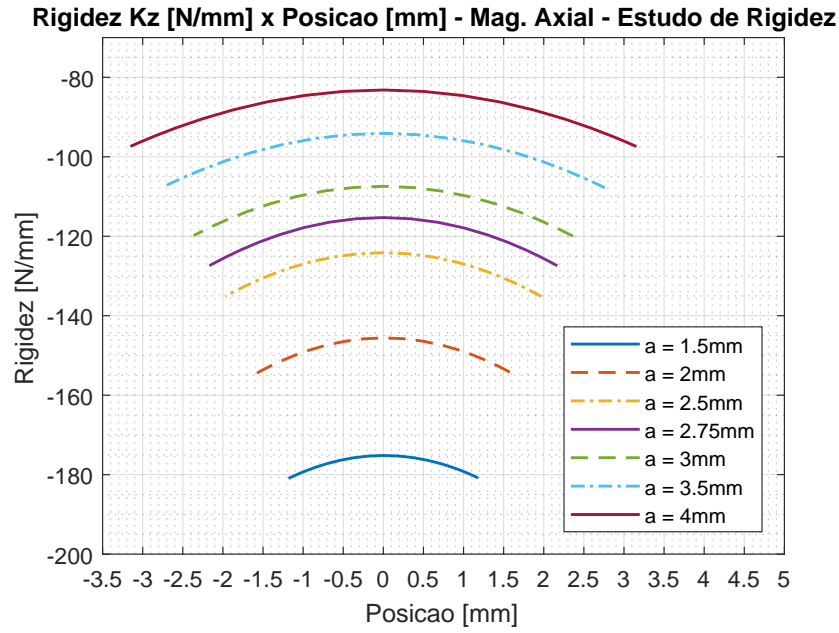


Figura 5.8: Mag. Axial – Rigidez x Posição – Estudo paramétrico para a rigidez do mancal

$$F_z(z)[N] = -2.579z^3 - 0.003z^2 - 115.3z \quad (5.2)$$

$$K_z(z)[N/mm] = -\frac{F_z}{z} = 2.579z^2 + 0.003z + 115.3 \quad (5.3)$$

Foi simulado também de forma simplificada o comportamento do mancal quando o rotor gira em uma das direções transversais do eixo principal de rotação, como indicado na Figura 3.6. Neste caso, impõe-se um pequeno deslocamento angular numa das direções transversais representando uma perturbação lateral do eixo. Com este movimento, o rotor se aproxima de um estator e se afasta do outro, como ilustrado na Figura 5.10.

A força magnética de repulsão gera então um torque sobre o rotor na direção do deslocamento transversal. A relação entre o deslocamento e o torque restaurador pode ser vista na Figura 5.11. Apesar de tender a restaurar o rotor para a posição neutra, este torque deve ser visto como uma perturbação para os mancais radiais, uma vez que pode desestabilizar o eixo quando combinado com as outras forças e torques que atuam sobre ele.

Tal como feito para a reação de apoio na direção axial, pode-se estabelecer um modelo matemático para o Torque transversal T_x em função de um deslocamento angular θ em torno do eixo x e assumindo que o torque $T_x = 0$ para $\theta = 0$.

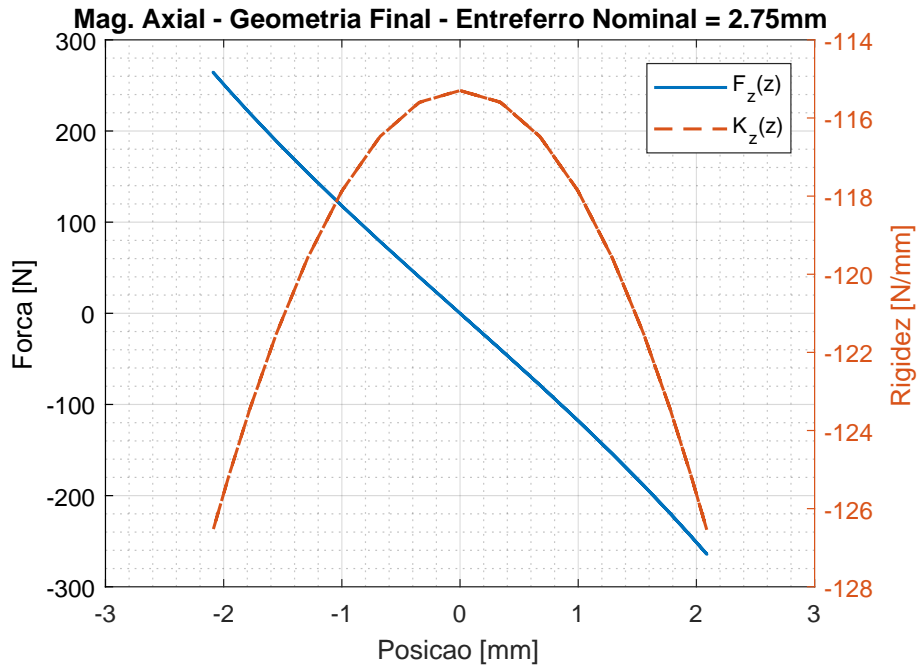


Figura 5.9: Força Magnética e Rigidez do mancal projetado.

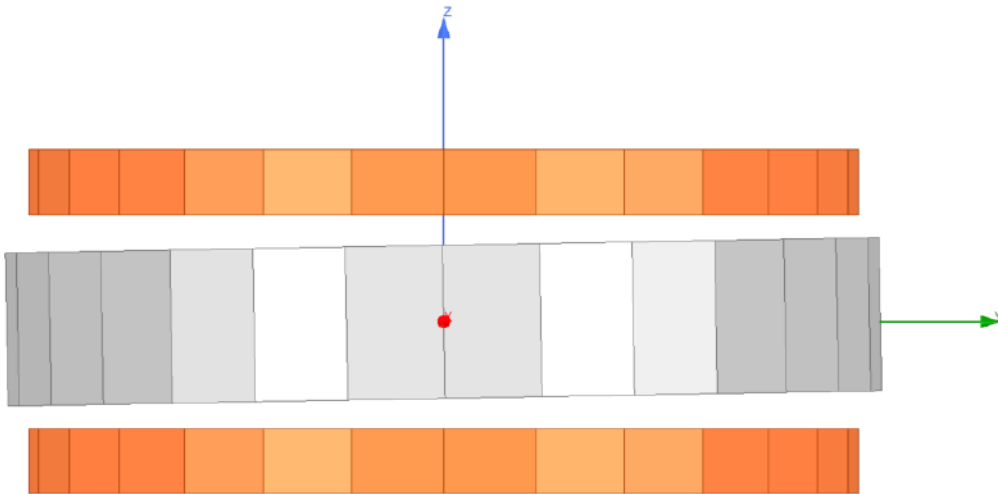


Figura 5.10: Deslocamento transversal imposto ao rotor. Na figura, um deslocamento angular positivo em torno de x .

$$T_x(\theta)[\text{N m}] = -680.3\theta^3 - 0.533\theta^2 - 59.33\theta \quad (5.4)$$

A expressão da rigidez torsional na mesma direção, K_{T_x} , fica:

$$K_{T_x}(\theta)[\text{Nm/rad}] = \frac{-T_x}{\theta} = 680.3\theta^2 + 0.533\theta + 59.33 \quad (5.5)$$

Novamente, verifica-se que a rigidez do mancal é quase constante.

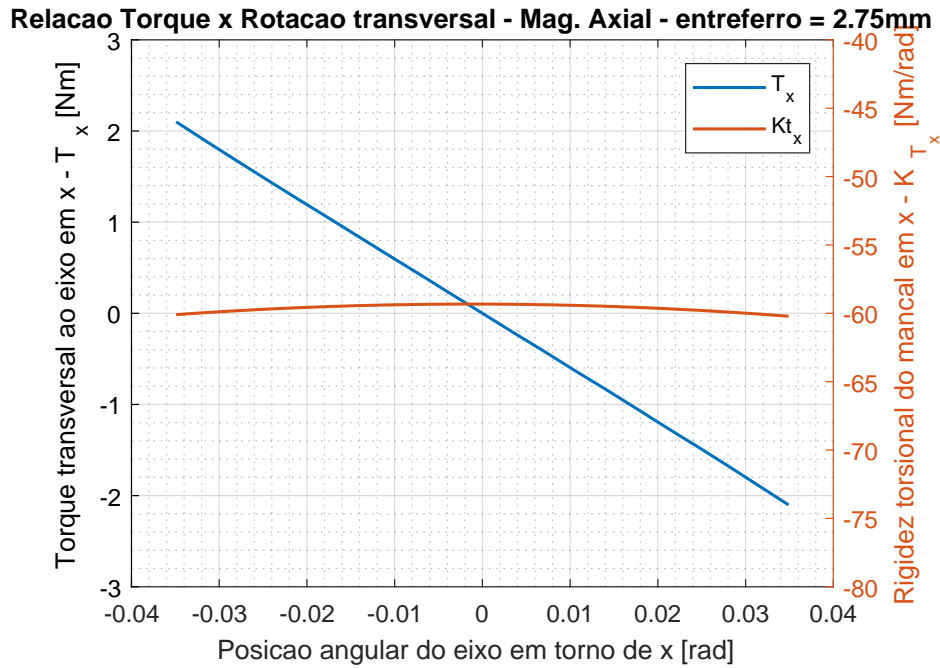


Figura 5.11: Comportamento do mancal para deslocamento transversal do rotor.

Tabela 5.2: Características mecânicas do mancal axial projetado para ser implementado na bancada do LAVI.

Parâmetro	Valor
Entreferro nominal [mm]	2.75
Massa magnética total [g]	660.5
$F_{z,Max}$ [N]	280.43
Rigidez axial - $K_z(z)$ [N/mm]	$2.579z^2 + 0.003z + 115.3$
Rigidez torsional - $K_{T_x}(\theta)$ [Nm/rad]	$680.3\theta^2 + 0.533\theta + 59.33$

5.2 Projeto Mecânico

Com o rotor e estator trabalhando em repulsão magnética, não se faz necessário um ajuste de alta interferência na montagem dos ímãs no rotor. A atração entre a face superior e inferior dos ímãs do rotor ajuda a manter as partes unidas. O conjunto dispensa o uso de um adesivo ou de uma tampa externa para este fim.

O mancal axial na configuração de magnetização axial apresenta facilidades construtivas que o tornam mais atrativo para implementação na bancada experimental. De início, a quantidade menor de ímãs necessários com relação a configuração magnetização radial facilita a montagem do mancal. Mais ainda, os ímãs do rotor e estator tem a mesma dimensão, variando somente na direção de magnetização.

Na Tabela 5.3, apresenta-se a lista completa de componentes para o mancal axial passivo de magnetização axial. Os componentes da estrutura são peças usinadas em

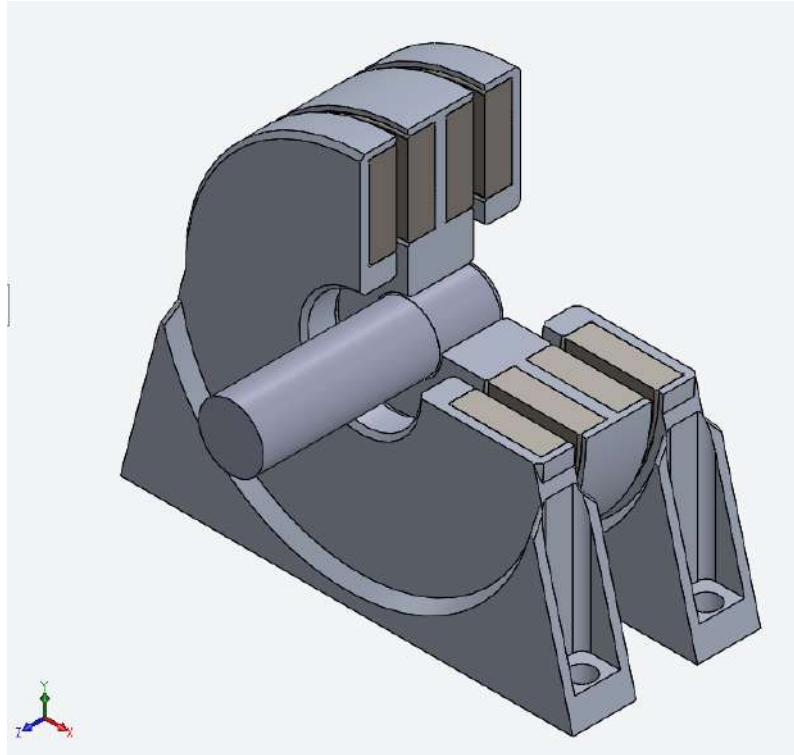


Figura 5.12: Vista isométrica em corte de meia-seção do mancal magnético axial passivo de magnetização axial.

Tabela 5.3: Lista de materiais - Mancal axial magnetizado axialmente - Componentes da montagem da Figura B.1

Componente	Material	Massa [kg]	Inércia I_{zz} [kgmm ²]	Qtd.:	Desenho
Base Rotor	Al 6061-T6	0.069	47.46	1	Figura B.2
Base Estator	Al 6061-T6	0.083	—	2	Figura B.3
Ímã Rotor	NdFeB N42	0.161	140.44	2	Figura B.4
Ímã Estator	NdFeB N42	0.161	—	2	Figura B.4

torno e/ou fresamento CNC. Os desenhos com dimensões e tolerâncias geométricas encontram-se no Anexo B.

A montagem do rotor do mancal axial é feita por interferência. O eixo existente é feito em alumínio, tal como o rotor do mancal axial. Idealmente o rotor deve ser montado com mínima intervenção na bancada atual. Desta forma, foi escolhido um ajuste com interferência leve, em que uma pequena diferença de temperatura entre as partes permite a montagem com esforço leve.

Capítulo 6

Conclusão

Com o trabalho realizado nesta dissertação foi possível desenvolver o projeto mecânico detalhado para a implementação do mancal magnético axial passivo de ímãs permanentes na bancada de levitação magnética do LAVI.

Foi desenvolvido um modelo computacional por elementos finitos para o mancal axial, que permitiu identificar as características mecânicas de diferentes topologias de mancal axial passivo encontradas na literatura.

A escolha da topologia de mancal a ser implementado pode ser feita a partir dos resultados dos estudos paramétricos baseados neste modelo computacional para as configurações apresentadas no Capítulo 4. Desta forma, foi possível fazer uma avaliação objetiva – resumida na Tabela 4.10 –, sobre qual a forma de mancal magnético passivo melhor atende os interesses do laboratório.

Uma vez que não há especificamente um financiamento para o projeto, o custo e complexidade de implementação foram fatores subjetivos influentes na escolha da configuração. Sob esse aspecto, optou-se por ímãs permanentes de liga de Neodímio-Ferro-Boro de média graduação, mais acessíveis e disponíveis no mercado.

A escolha do mancal de polarização axial se deu por sua capacidade de carga e pela simplicidade de integração à bancada existente. Apesar de carregar ímãs mais pesados, este arranjo é mais permissivo a deslocamentos transversais do eixo, o que é desejável para uma aplicação experimental. Além do projeto mecânico, pode-se desenvolver também um modelo matemático para as reações do mancal na direção axial. Esta função deve ser introduzida no sistema de controle dos mancais magnéticos ativos para que o sistema girante continue representado de forma fidedigna.

6.1 Trabalhos Futuros

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se:

- Executar novas simulações para as topologias estudadas considerando desloca-

mentos transversais do rotor do mancal axial – Evidentemente que no caso real o movimento de rotação do eixo não é perfeitamente concêntrico ao estator do mancal.

- Acoplar o modelo magnético ao modelo mecânico da bancada e simular o conjunto.
- Fazer o ensaio experimental do mancal proposto para validar as observações deste trabalho.

Finalmente, uma vez que o primeiro mancal axial da bancada estiver implementado, poderia-se propor o projeto de um outro mancal axial, eletrodinâmico, que dispensaria o uso de ímãs permanentes no estator, substituídos por enrolamentos de cobre.

Nesta configuração de mancal magnético, a variação de fluxo magnético provocada pelo movimento de rotação do rotor induz correntes parasitas nos enrolamentos do estator. Isto gera uma força eletromotriz que atua sobre o rotor suspendendo-o [38–41]. Uma desvantagem deste modelo com relação aos mancais magnéticos ativos ou de ímãs permanentes é a dependência do mancal eletrodinâmico da velocidade de rotação do rotor, sendo a força de sustentação nula quando o rotor está parado.

Com este tipo de arranjo pode-se atingir a estabilidade do rotor suspenso magneticamente de forma puramente passiva [42, 43]. Num estudo recente [44], os autores analisam a estabilidade deste tipo de mancal magnético a partir de um modelo dinâmico analítico que permite garantir a estabilidade do rotor em certa velocidade de rotação.

O mancal eletrodinâmico é portanto uma alternativa interessante para aplicações em que se deseja a ausência de contato físico entre os componentes do sistema ao mesmo tempo que o consumo de energia precise ser mantido baixo, como na bancada experimental deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] COELHO, J. *Construção de uma Bancada com Mancais Magnéticos para Estudo da Dinâmica de Rotores*. Tese de Mestrado, UFRJ/Coppe, 2016.
- [2] SIQUEIRA, R. D. S. D. *Projeto e Implementação de um Mancal magnético ativo com controle por modos deslizantes*. Tese de Mestrado, UFRJ/Coppe, 2013.
- [3] DIAZ, D. A. G., PINTO, F. A. N. C., RITTO, T., et al. “Nonparametric identification of a small AMB test rig at several rotating speeds”. In: *Proceedings of 16th International Symposium on Magnetic Bearings*, Beijing, 2018.
- [4] DIAZ, D. A. G., PINTO, F. A. N. C., RITTO, T., et al. “Stepped Sine and Multisine Signal Excitation for Identification in a Small AMB Test Rig”, 2018. doi: 10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0414.
- [5] IMOBERDORF, P., ZWYSSIG, C., ROUND, S. D., et al. “Combined Radial-Axial 500 , 000 rpm Permanent Magnet Machine”, *Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1434–1440, 2007.
- [6] YOON, S. Y., LIN, Z., ALLAIRE, P. E. *Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings -Theory and Implementation*. London, Springer, London, 2013. ISBN: 9781447142393. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4240-9>.
- [7] ZHENYU, X. “Characteristics of motorized spindle supported by active magnetic bearings”, *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 27, n. 6, pp. 1619–1624, 2014. ISSN: 1000-9361. doi: 10.1016/j.cja.2014.10.031. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2014.10.031>>.
- [8] LEE, R.-M., CHEN, T.-C. “Adaptive Control of Active Magnetic Bearing against Milling Dynamics”, *Applied Sciences*, 2016. ISSN: 2076-3417. doi: 10.3390/app6020052.

- [9] VOIGT, A. J. *Towards Identification of Rotordynamic Properties for Seals in Multiphase Flow Using Active Magnetic Bearings*. Tese de Doutorado, DTU - Technical University of Denmark, 2016.
- [10] LAURIDSEN, J. S., SANTOS, I. *Control Design of Active Magnetic Bearings for Rotors Subjected to Destabilising Seal Forces*. Tese de Doutorado, DTU - Technical University of Denmark, 2017.
- [11] SOTELO, G. G., DIAS, D. H. N., DE ANDRADE, R., et al. “Tests on a superconductor linear magnetic bearing of a full-scale MagLev vehicle”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3 PART 2, pp. 1464–1468, 2011. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/TASC.2010.2086034.
- [12] MOTTA, E. S., DIAS, D. H. N., SOTELO, G. G., et al. “Optimization of a linear superconducting levitation system”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 5, pp. 3548–3554, 2011. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/TASC.2011.2161986.
- [13] GREATREX, N. A., TIMMS, D. L., KURITA, N., et al. “Axial magnetic bearing development for the BiVACOR rotary BiVAD/TAH”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 57, n. 3, pp. 714–721, 2010. ISSN: 00189294. doi: 10.1109/TBME.2009.2033389.
- [14] SAITO, T., MASUZAWA, T., NAKAYAMA, N. “Development of a Novel Hybrid Type Magnetic Bearing And Application to Small Impeller Centrifugal Pump for Artificial Hearts”, *Journal of Life Support Engineering*, v. 18, n. 4, pp. 148–153, 2006.
- [15] JIANCHENG, F., JINJI, S., YANLIANG, X., et al. “A new structure for permanent-magnet-biased axial hybrid magnetic bearings”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 12, pp. 5319–5325, 2009. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2009.2024687.
- [16] JIANCHENG, F., JINJI, S., HU, L., et al. “A novel 3-DOF axial hybrid magnetic bearing”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 46, n. 12, pp. 4034–4045, 2010. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2010.2074206.
- [17] BARBARACI, G. “Axial active magnetic bearing design”, *JVC/Journal of Vibration and Control*, v. 22, n. 5, pp. 1190–1197, 2016. ISSN: 17412986. doi: 10.1177/1077546314534720.
- [18] HIJIKATA, K., KOBAYASHI, S., TAKEMOTO, M., et al. “Basic Characteristics of an Active Thrust Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor Core”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 44, n. 11, pp. 4167–4170, 2008.

- [19] HIJIKATA, K., TAKEMOTO, M., OGASAWARA, S., et al. “Behavior of a novel thrust magnetic bearing with a cylindrical rotor on high speed rotation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 10, pp. 4617–4620, 2009. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2009.2022178.
- [20] SCHWEITZER, G., MASLEN, E. *Magnetic Bearings - Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Berlin-Heidelberg, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN: 9783642004964.
- [21] WIKIPEDIA.ORG. “Magnetism”. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetism#Types_of_magnetism>.
- [22] CHIBA, A., FUKAO, T., ICHIKAWA, O., et al. *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Elsevier, 2005. ISBN: 0750657278.
- [23] STEPHAN, R. M., PINTO, F. A. D. N. C., GOMES, A. C. D. N., et al. *Mancais Magnéticos - Mecatrônica sem Atrito*. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, 2013. ISBN: 978-85-399-0479-2.
- [24] FURLANI, E. P., REZNIK, S., KROLL, A. “A Three-Dimensional Field Solution for Radially Polarized Cylinders”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 31, n. 1, pp. 844–851, 1995. ISSN: 19410069. doi: 10.1109/20.364587.
- [25] RAVAUD, R., LEMARQUAND, G., LEMARQUAND, V. “Halbach Structures For Permanent Magnets Bearings”, *Progress In Electromagnetics Research M*, v. 14, pp. 263–277, 2010. ISSN: 1937-8726. doi: 10.2528/PIERM10100401. Disponível em: <<http://www.jpier.org/PIERM/pier.php?paper=10100401>>.
- [26] RAVAUD, R., LEMARQUAND, G., BABIC, S., et al. “Cylindrical magnets and coils: Fields, forces, and inductances”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 46, n. 9, pp. 3585–3590, 2010. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2010.2049026.
- [27] MARKOVIC, M., PERRIARD, Y. “Optimization design of a segmented halbach permanent-Magnet motor using an analytical model”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 7, pp. 2955–2960, 7 2009. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2009.2015571.
- [28] ROBERTSON, W., CAZZOLATO, B., ZANDER, A. “Axial force between a thick coil and a cylindrical permanent magnet: Optimizing the geometry of an electromagnetic actuator”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 48, n. 9, pp. 2479–2487, 2012. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2012.2194789.

- [29] AKYEL, C., BABIC, S. I., KINCIC, S., et al. “Magnetic force calculation between thin circular coils and thin filamentary circular coil in air”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, v. 21, n. 9, pp. 1273–1283, 2007. ISSN: 15693937. doi: 10.1163/156939307794731132.
- [30] BEKINAL, S. I., ANIL, T. R., JANA, S. “Analysis of axially magnetized permanent magnet bearing characteristics”, *Progress In Electromagnetics Research B*, , n. 47, pp. 87–105, 2013. ISSN: 19376472. doi: 10.2528/PIERB12102005.
- [31] BEKINAL, S. I., ANIL, T. R., JANA, S. “Analysis of Radial Magnetized Permanent Magnet Bearing Characteristics”, v. 47, n. October 2012, pp. 87–105, 2013.
- [32] CACIAGLI, A., BAARS, R. J., PHILIPSE, A. P., et al. “Exact expression for the magnetic field of a finite cylinder with arbitrary uniform magnetization”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 456, pp. 423–432, 2018. ISSN: 03048853. doi: 10.1016/j.jmmm.2018.02.003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.02.003>>.
- [33] RAVAUD, R., LEMARQUAND, G. “Comparison of the coulombian and amperian current models for calculating the magnetic field produced by radially magnetized arc-shaped permanent magnets”, *Progress In Electromagnetics Research*, v. 95, pp. 309–327, 2009.
- [34] LEMARQUAND, V., LEMARQUAND, G. “Passive Permanent Magnet Bearing for Rotating Shaft : Analytical Calculation”. In: *Magnetic Bearings: Theory and Applications*, Intech, pp. 85–116, 2016. doi: 10.5772/10085. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/magnetic-bearings--theory-and-applications/permanent-magnet-bearing-for-rotating-shaft-analytical-calculation>>.
- [35] RAVAUD, R., LEMARQUAND, G., LEMARQUAND, V. “Force and stiffness of passive magnetic bearings using permanent magnets. part 2: Radial magnetization”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 9, pp. 3334–3342, 2009. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2009.2025315.
- [36] RAVAUD, R., LEMARQUAND, G., LEMARQUAND, V. “Force and stiffness of passive magnetic bearings using permanent magnets. Part 1: Axial Magnetization”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, n. 7, pp. 2996–3002, 2009. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2009.2025315.

- [37] ROBERTSON, W., CAZZOLATO, B., ZANDER, A. “A simplified force equation for coaxial cylindrical magnets and thin coils”, *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 47, n. 8, pp. 2045–2049, 2011. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2011.2129524.
- [38] SANDTNER, J., BLEULER, H. “Electrodynamic Passive Magnetic Bearing with Planar Halbach Array”, *International Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 1–6, 2004. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228401193>>.
- [39] FILATOV, A. *"Null-E" Magnetic Bearings A Dissertation*. Tese de Doutorado, University of Virginia, 2002.
- [40] SANDTNER, J., BLEULER, H. “Passive Electrodynamic Magnetic Thrust Bearing Especially Designed for Constant Speed Applications”, *10th International Symposium on Magnetic Bearings*, , n. August, 2006.
- [41] AMATI, N., ZENERINO, E., TONOLI, A., et al. “Design methodology of electrodynamic bearings”, , n. January 2009, 2009.
- [42] IMPINNA, F., DETONI, J. G., AMATI, N., et al. “Passive magnetic levitation of rotors on axial electrodynamic bearings”, *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 49, n. 1, pp. 599–608, 2013. ISSN: 00189464. doi: 10.1109/TMAG.2012.2209124.
- [43] TONOLI, A., AMATI, N., IMPINNA, F., et al. “A solution for the stabilization of electrodynamic bearings: Modeling and experimental validation”, *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, v. 133, n. 2, 2011. ISSN: 10489002. doi: 10.1115/1.4002959.
- [44] VAN VERDEGHEM, J., KLUYSKENS, V., DEHEZ, B. “Stability and performance analysis of electrodynamic thrust bearings”, *Actuators*, v. 8, n. 1, 2019. ISSN: 20760825. doi: 10.3390/act8010011.

Apêndice A

Resultados das Simulações

Estudo Paramétrico - Magnetização Axial

Estudo paramétrico para diferentes combinações geométricas para o mancal de magnetização axial. Simulação por método de elementos finitos tridimensional transiente.

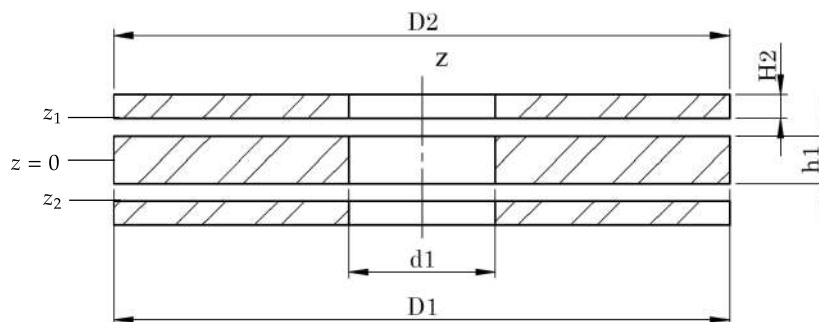


Figura A.1: Reprodução da Figura 4.6 - Dimensões do modelo simplificado de mancal axial magnetizado axialmente

Estudo Paramétrico - Magnetização Radial - Atração

Estudo Paramétrico - Magnetização Radial - Repulsão

Tabela A.1: Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado axialmente. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 6mm$

	d1, d2 [mm]	D1, D2 [mm]	Massa rotor [g]	Massa estator [g]	Massa total[g]	$F_{z,Max}$ [N]
Caso 1	20	70	315.00	157.50	630.00	306.46
Caso 2	20	77.5	392.44	196.22	784.87	334.53
Caso 3	20	85	477.75	238.87	955.50	362.04
Caso 4	20	92.5	570.94	285.47	1141.87	388.95
Caso 5	20	100	672.00	336.00	1344.00	414.29
Caso 6	25	70	299.25	149.62	598.50	323.00
Caso 7	25	77.5	376.69	188.34	753.37	350.31
Caso 8	25	85	462.00	231.00	924.00	377.78
Caso 9	25	92.5	555.19	277.59	1110.37	405.94
Caso 10	25	100	656.25	328.12	1312.50	435.96
Caso 11	30	70	280.00	140.00	560.00	340.39
Caso 12	30	77.5	357.44	178.72	714.87	370.27
Caso 13	30	85	442.75	221.37	885.50	398.32
Caso 14	30	92.5	535.94	267.97	1071.87	422.50
Caso 15	30	100	637.00	318.50	1274.00	454.54
Caso 16	35	70	257.25	128.62	514.50	353.81
Caso 17	35	77.5	334.69	167.34	669.37	386.09
Caso 18	35	85	420.00	210.00	840.00	414.28
Caso 19	35	92.5	513.19	256.59	1026.37	439.07
Caso 20	35	100	614.25	307.12	1228.50	468.65
Caso 21	40	70	231.00	115.50	462.00	369.75
Caso 22	40	77.5	308.44	154.22	616.87	397.90
Caso 23	40	85	393.75	196.87	787.50	426.63
Caso 24	40	92.5	486.94	243.47	973.87	460.51
Caso 25	40	100	588.00	294.00	1176.00	483.92

Tabela A.2: Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado radialmente e reação de apoio oriunda da atração magnética. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 5mm$

	D1 [mm]	Entreferro [mm]	d2 [mm]	Massa Rotor [g]	Massa Estator [g]	Massa Total [g]	$F_{z,Max}$ [N]
Caso 1	30	0.9	31.8	9.54	12.29	21.84	68.76
Caso 2	39	0.9	40.8	12.72	15.48	28.20	89.70
Caso 3	48	0.9	49.8	15.90	18.66	34.57	110.36
Caso 4	57	0.9	58.8	19.09	21.84	40.93	131.04
Caso 5	66	0.9	67.8	22.27	25.02	47.29	151.48
Caso 6	30	1.425	32.85	9.54	12.67	22.21	58.12
Caso 7	39	1.425	41.85	12.72	15.85	28.57	75.33
Caso 8	48	1.425	50.85	15.90	19.03	34.94	92.94
Caso 9	57	1.425	59.85	19.09	22.21	41.30	110.20
Caso 10	66	1.425	68.85	22.27	25.39	47.66	127.33
Caso 11	30	1.95	33.9	9.54	13.04	22.58	49.46
Caso 12	39	1.95	42.9	12.72	16.22	28.95	64.00
Caso 13	48	1.95	51.9	15.90	19.40	35.31	78.81
Caso 14	57	1.95	60.9	19.09	22.58	41.67	93.63
Caso 15	66	1.95	69.9	22.27	25.76	48.03	108.11
Caso 16	30	2.475	34.95	9.54	13.41	22.96	42.61
Caso 17	39	2.475	43.95	12.72	16.59	29.32	55.28
Caso 18	48	2.475	52.95	15.90	19.77	35.68	67.91
Caso 19	57	2.475	61.95	19.09	22.96	42.04	80.26
Caso 20	66	2.475	70.95	22.27	26.14	48.40	92.96
Caso 21	30	3	36	9.54	13.78	23.33	37.28
Caso 22	39	3	45	12.72	16.96	29.69	48.00
Caso 23	48	3	54	15.90	20.15	36.05	58.79
Caso 24	57	3	63	19.09	23.33	42.41	69.98
Caso 25	66	3	72	22.27	26.51	48.77	80.99

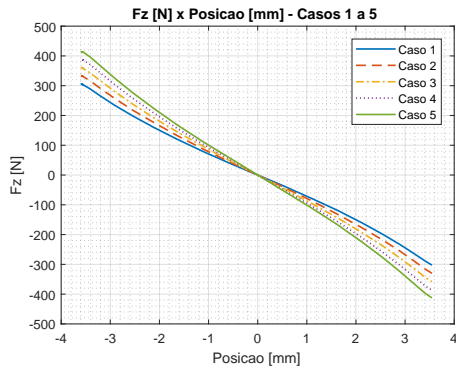


Figura A.2: F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 1 a 5

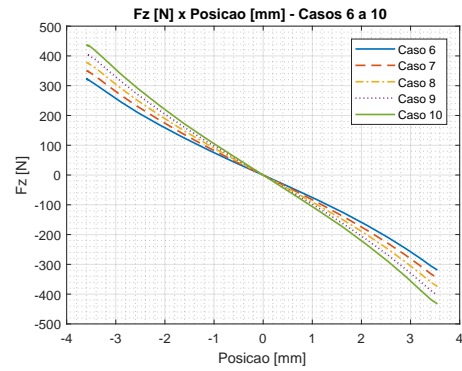


Figura A.3: F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 6 a 10

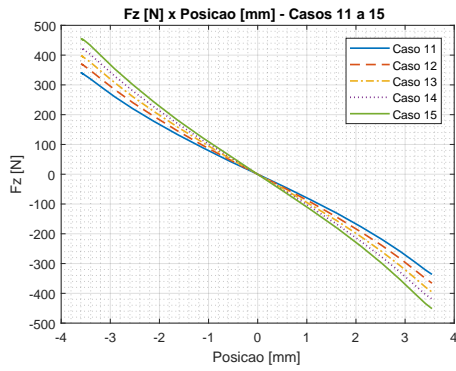


Figura A.4: F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 11 a 15

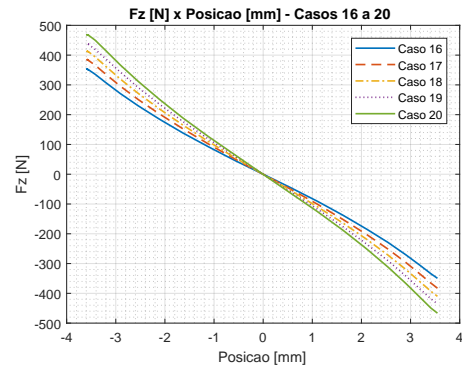


Figura A.5: F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 16 a 20

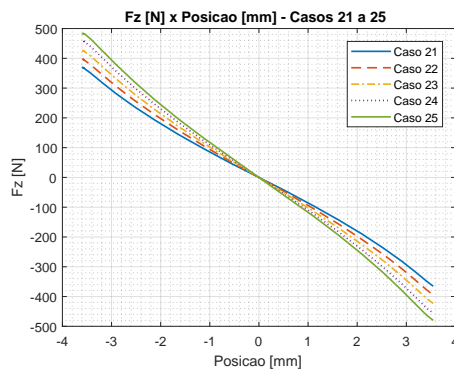


Figura A.6: F_z [N] x z [mm] – Mag. axial – Casos 21 a 25

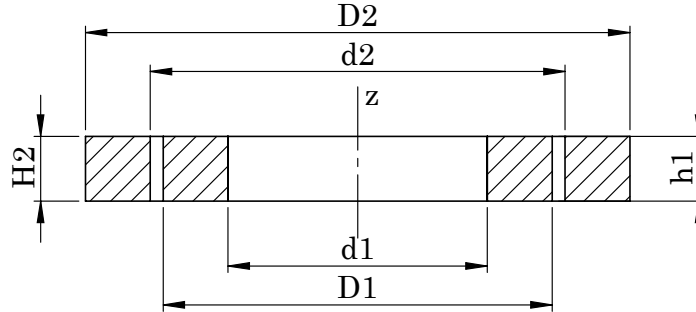


Figura A.7: Reprodução da Figura 4.13 - Dimensões do modelo simplificado do mancal axial com ímãs magnetizados na direção radial.

Tabela A.3: Identificação de casos do estudo paramétrico para o modelo de mancal magnetizado radialmente e reação de apoio por repulsão magnética. Para todos os casos a espessura dos ímãs é $h1 = 5mm$

	D1 [mm]	Entreferro [mm]	d2 [mm]	Massa Rotor [g]	Massa Estator [g]	Massa total[g]	$F_{z,Max}$ [N]
Caso 1	25	0.9	26.8	7.71	10.44	28.59	25.15
Caso 2	33.75	0.9	35.55	10.78	13.51	37.8	35.05
Caso 3	42.5	0.9	44.3	13.84	16.58	47	44.55
Caso 4	51.25	0.9	53.05	16.91	19.64	56.19	53.83
Caso 5	60	0.9	61.8	19.98	22.71	65.4	62.90
Caso 6	25	1.425	27.85	7.71	10.81	29.33	22.11
Caso 7	33.75	1.425	36.6	10.78	13.88	38.54	30.58
Caso 8	42.5	1.425	45.35	13.84	16.95	47.74	38.74
Caso 9	51.25	1.425	54.1	16.91	20.01	56.93	46.72
Caso 10	60	1.425	62.85	19.98	23.08	66.14	54.67
Caso 11	25	1.95	28.9	7.71	11.18	30.07	19.11
Caso 12	33.75	1.95	37.65	10.78	14.25	39.28	26.39
Caso 13	42.5	1.95	46.4	13.84	17.31	48.46	33.30
Caso 14	51.25	1.95	55.15	16.91	20.38	57.67	40.11
Caso 15	60	1.95	63.9	19.98	23.45	66.88	46.78
Caso 16	25	2.475	29.95	7.71	11.55	30.81	16.46
Caso 17	33.75	2.475	38.7	10.78	14.61	40	22.59
Caso 18	42.5	2.475	47.45	13.84	17.68	49.2	28.50
Caso 19	51.25	2.475	56.2	16.91	20.75	58.41	34.22
Caso 20	60	2.475	64.95	19.98	23.81	67.6	39.88
Caso 21	25	3	31	7.71	11.92	31.55	14.07
Caso 22	33.75	3	39.75	10.78	14.98	40.74	19.28
Caso 23	42.5	3	48.5	13.84	18.05	49.94	24.24
Caso 24	51.25	3	57.25	16.91	21.12	59.15	29.06
Caso 25	60	3	66	19.98	24.18	68.34	33.89

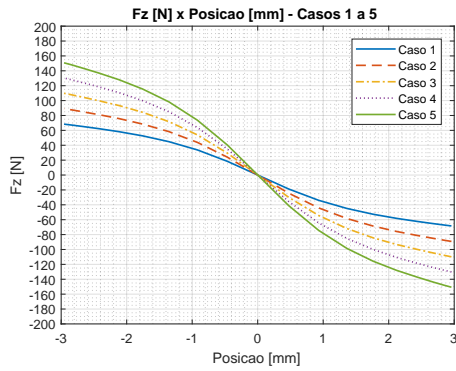


Figura A.8: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 1 a 5

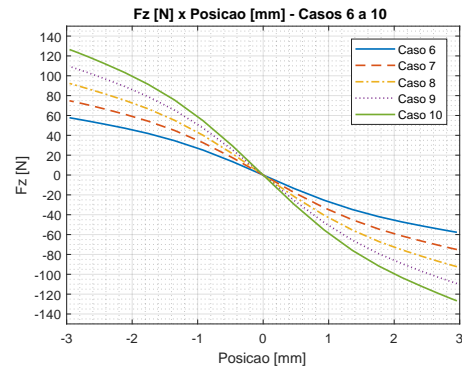


Figura A.9: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 6 a 10

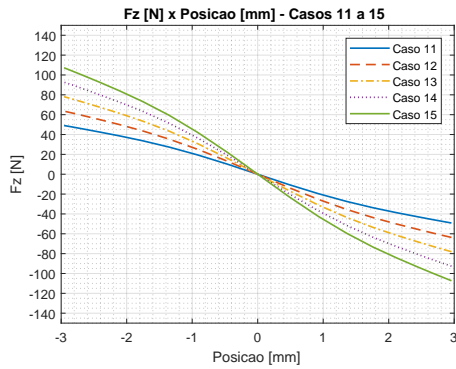


Figura A.10: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 11 a 15

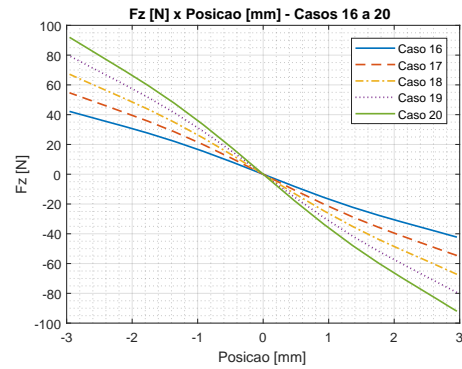


Figura A.11: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 16 a 20

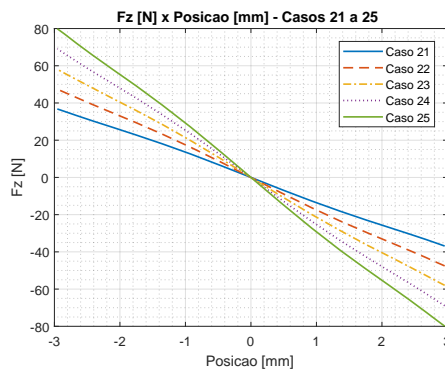


Figura A.12: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Atração – Casos 21 a 25

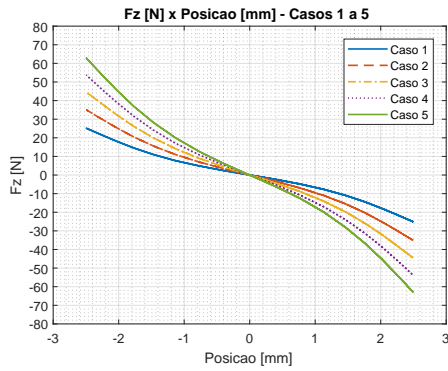


Figura A.13: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 1 a 5

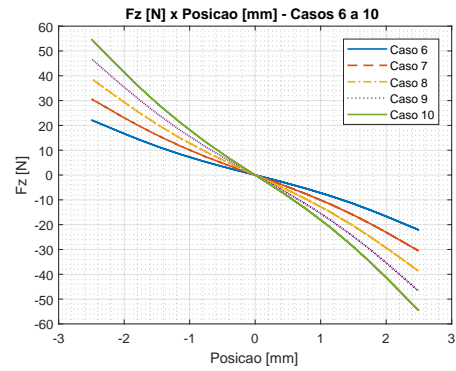


Figura A.14: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 6 a 10

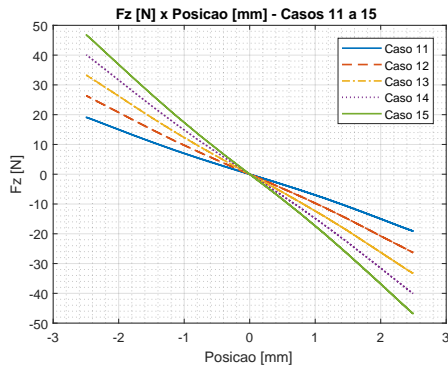


Figura A.15: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 11 a 15

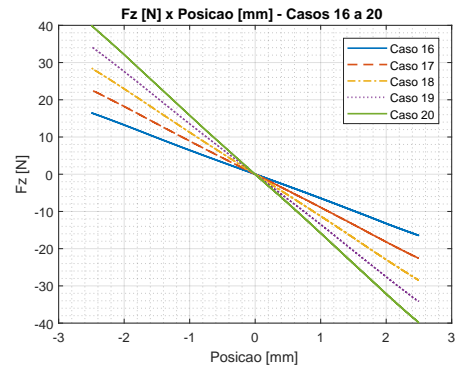


Figura A.16: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 16 a 20

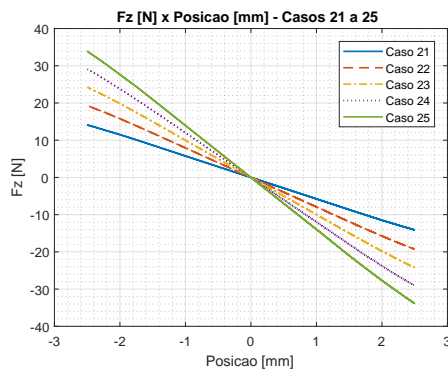


Figura A.17: F_z [N] x z [mm] – Mag. Radial – Repulsão – Casos 21 a 25

Apêndice B

Desenhos Mecânicos

Figura B.1: Desenho Mecânico – Mancal magnetizado na direção axial – Montagem e Lista de Materiais

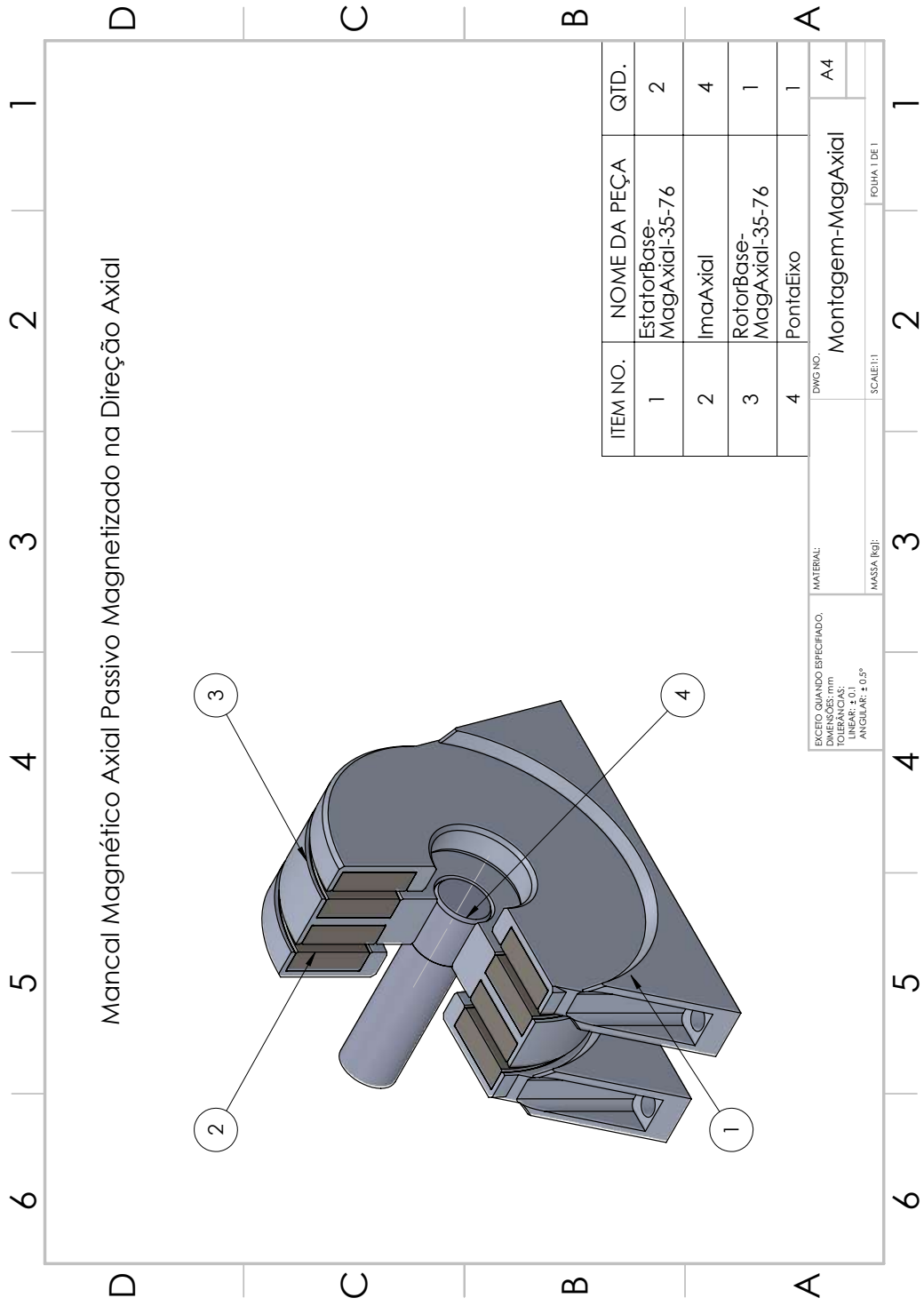


Figura B.2: Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Rotor

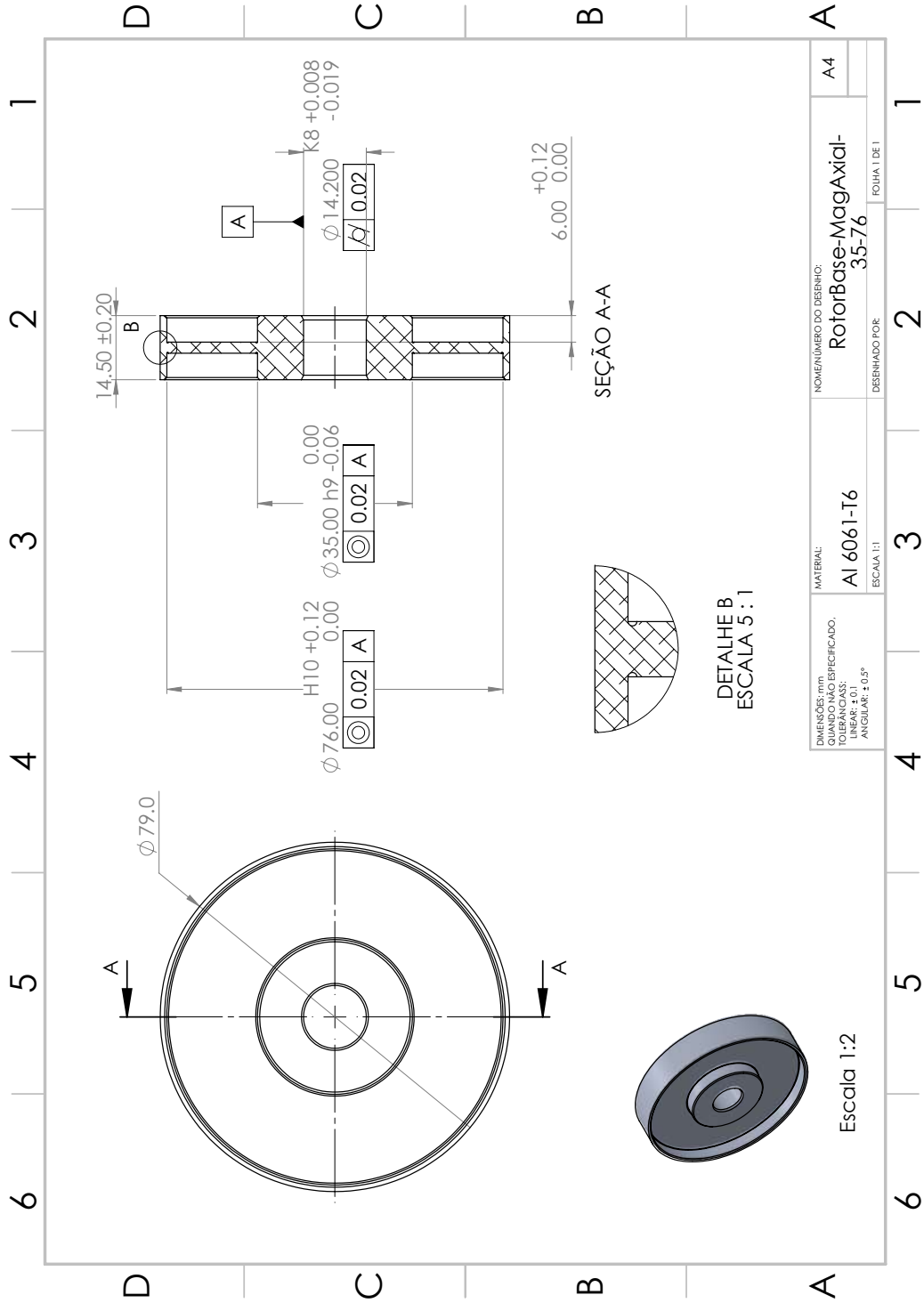


Figura B.3: Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Estator

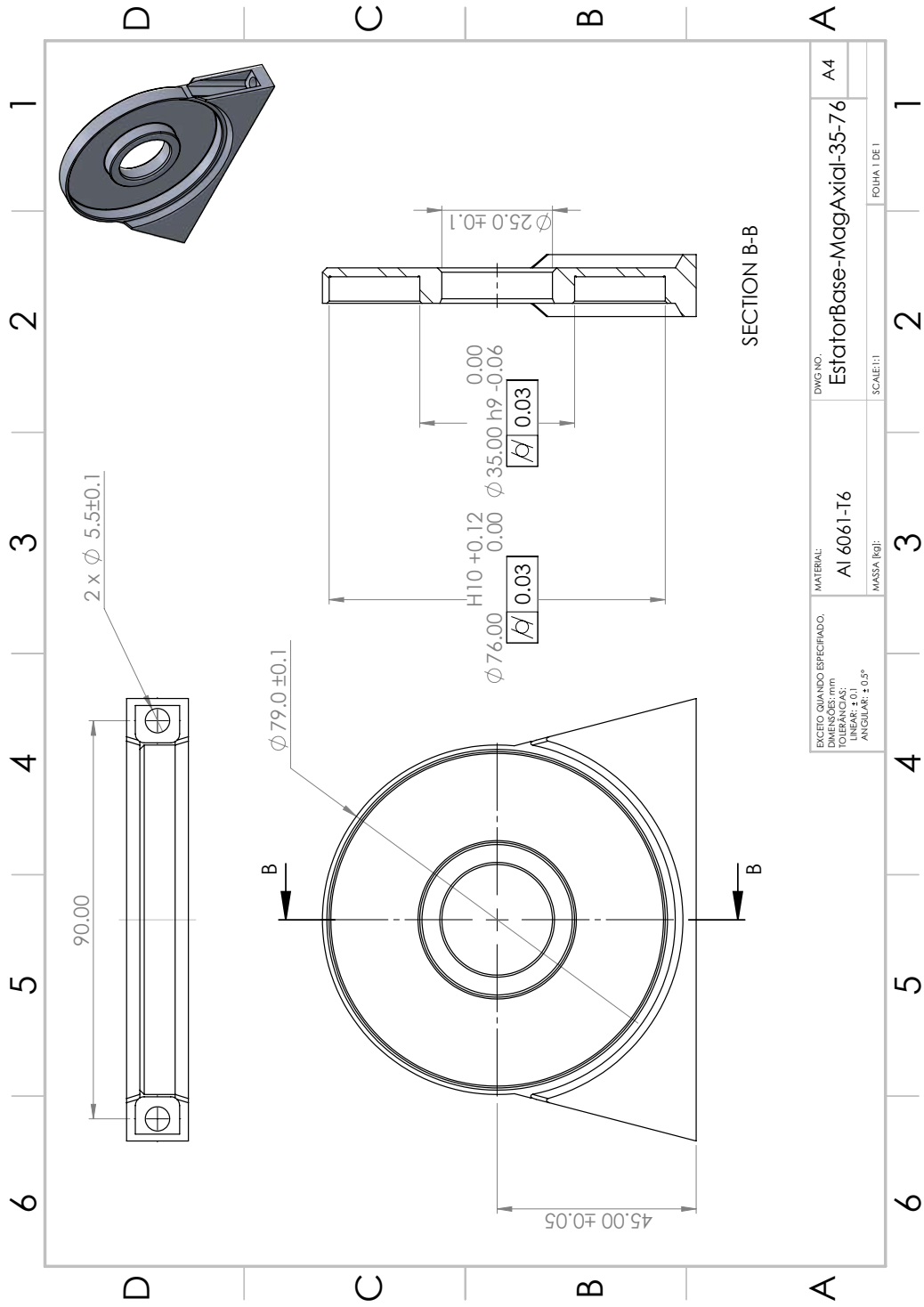


Figura B.4: Ilustração do Desenho Mecânico: Mancal magnetizado na direção Axial – Estator

