

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATEUS CIROLINI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM FUSO
MAGNÉTICO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL**

Porto Alegre
2019

MATEUS CIROLINI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM FUSO
MAGNÉTICO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia – Dispositivos Eletromagnéticos.

ORIENTADOR: Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2019

MATEUS CIROLINI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM FUSO
MAGNÉTICO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL**

Esta dissertação/tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela Cardiff University – Cardiff, País de Gales, GB

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Guilherme da Costa Neves, CENG – UFPEL

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Luís Alberto Pereira, PPGEE – UFRGS

Doutor pela Universität Kaiserslautern – Kaiserslautern, Alemanha

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert, PPGEE – UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil)

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre, Abril de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo empenho, suporte psicológicos e financeiro, tornando possível a realização deste mestrado. Dedico também este trabalho à minha namorada, Patrícia Machado, por ter sempre feito com que eu enxergasse o lado positivo de cada acontecimento e por estar ao meu lado em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos meus colegas do LMEAE pela amizade, auxílio nas disciplinas, trabalhos realizados e artigos publicados. Agradeço, em especial, minha colega e amiga Ana Paula Zanata, pela sugestão de local para realização do mestrado. Ao Igor Pasa Wiltuschnig, por todos os momentos de descontração e por todas as sugestões sobre meu projeto de mestrado. Agradeço ao meu colega de “aquário” Yi Chen Wu, por todos os presentes, por todos os momentos de lazer, por cada sugestão e ensinamento, por cada café, por estar sempre disposto a ajudar, de forma geral, obrigado por ser um fiel amigo e companheiro de trabalho.

Ao meu orientador, Ály Ferreira Flores Filho, pelo caráter, comprometimento e por saber, com excelência, orientar este projeto de mestrado.

Ao meu professor e colega de laboratório, Paulo Roberto Eckert, por sempre estar disposto a colaborar com os trabalhos, por auxiliar a direcionar minha pesquisa e por sempre me ajudar a manter o foco.

Ao técnico mecânico, Júlio Moreira, por todo o empenho na confecção das peças para o fuso magnético e por toda a paciência e carisma ao me ensinar a operar a eletroerosão e demais equipamentos do LMEAE.

A professora Gladis Bordin, por ter me aceito e orientado com excelência durante meu estágio docência.

Ao bolsista mais empenhado e eficiente que já conheci, meu amigo e colega de trabalho Lucas Dalla Corte Franchi, pelo auxílio com toda a instrumentação e aquisição de dados experimentais.

RESUMO

Esta dissertação aborda o desenvolvimento de um fuso magnético de relutância variável com topologia de caráter inovador. Este dispositivo magnético é composto de um translator, que se desloca linearmente ao longo de um eixo, e um rotor que gira em torno do mesmo eixo. Ele é capaz de converter, sem contato mecânico entre suas partes móveis, movimentos de alta densidade de força e baixa velocidade linear em baixa densidade de conjugado e alta velocidade angular, atrativo para inúmeras aplicações industriais. Por possuir ímãs permanentes somente na menor de suas partes móveis, a topologia proposta torna-se economicamente viável em aplicações de longos cursos.

O fuso magnético é projetado em *software* de elementos finitos e um estudo de sensibilidade paramétrica é realizado com o objetivo de maximizar a força produzida por unidade de volume dos ímãs permanentes. Após a definição dos parâmetros de projeto, um protótipo é construído e experimentalmente ensaiado. Os resultados obtidos das simulações são confrontados com os experimentalmente adquiridos apresentando boa concordância.

Palavras-chave: Ímãs permanentes axialmente magnetizados, estrutura discretizada, engrenagem magnética, fuso magnético, relutância variável.

ABSTRACT

This master thesis presents the design and realization of a novel reluctance-based magnetic lead screw (RBMLS) topology. This magnetic device is composed of two moving-parts: a translator moving linearly back and forth along the z-axis and a rotor rotating about the same axis. The device is capable of convert low-speed, high-force linear motion to high-speed, low-torque rotary motion, without mechanical contact between the two moving parts, which makes it attractive for many industrial applications. The RBMLS has permanent magnets (PMs) in only the shortest of its moving parts, making it economically suitable for long-stroke-applications. The proposed RBMLS is designed in a finite element analysis software, in which a parametric study is conducted in order to maximize the stall force produced per PM volumetric unit. Once the parameters were chosen, a prototype was fabricated and experimentally analyzed. The experimental results are then compared to those supplied by the FEA analysis, showing good agreement.

Key-words: Axially magnetized permanent magnets, discretized structure, magnetic lead screw, variable-reluctance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Fuso eletromagnético para bombeamento de petróleo..... | 20 |
| Figura 2 – Conversor magnético linear-rotativo. (a) corte longitudinal do protótipo e (b) visão planificada das ranhuras do estator e da armadura..... | 21 |
| Figura 3 – Conversor magnético linear-rotativo ou rotativo-linear. (a) corte longitudinal do protótipo e (b) visão planificada das ranhuras do estator e da armadura..... | 22 |
| Figura 4 – Partes constituintes de um fuso magnético genérico..... | 23 |
| Figura 5 – Exemplos de fusos eletromagnéticos..... | 25 |
| Figura 6 – Classificação dos fusos magnéticos quanto a direção de magnetização e disposição dos ímãs..... | 25 |
| Figura 7 – Diferentes topologias de fusos magnéticos. (a) radialmente magnetizado e ímãs dispostos face-a-face., (b) axialmente magnetizados e com concentração de fluxo, (c) arranjo de halbach e ímãs dispostos face-a-face..... | 26 |
| Figura 8 – Partes constituintes de um fuso magnético genérico..... | 27 |
| Figura 9 – Característica da força em função do deslocamento linear de um fuso magnético radialmente magnetizado..... | 29 |
| Figura 10 – Fuso magnético com diferentes níveis de discretização da estrutura helicoidal dos ímãs permanentes. Arcos com (a) 15 graus, (b) 30 graus, (c) 45 graus e (d) 60 graus. Obs. O translator foi ocultado para uma representação mais clara..... | 30 |
| Figura 11 – (a) Conjugado do rotor e (b) força do translator para fusos magnéticos com ímãs em diferentes graus de discretização..... | 30 |
| Figura 12 – (a) Conjugado do rotor e (b) força do translator para 2, 4 e 8 polos..... | 31 |
| Figura 13 – Protótipo construído com o emprego de ímãs compósitos apresentando 0,45 T de densidade de fluxo remanescente..... | 32 |
| Figura 14 – Resultado experimental e numéricos (MEF 3D)..... | 33 |
| Figura 15 – Imagens do protótipo construído. (a) Detalhes da discretização dos ímãs do translator, (b) encaixe do rotor dentro do translator, (c) desenho em CAD do fuso magnético e (d) fuso magnético instalado na bancada de testes..... | 34 |
| Figura 16 – Imagens do fuso protótipo v 1.0. (a) desenho em CAD do dispositivo, (b) processo de colagem dos ímãs do translator e (c) bancada de testes utilizada nos ensaios..... | 36 |
| Figura 17 – (a) modelo numérico 3D utilizado para estimar a força máxima do fuso magnético e (b) tabela com os parâmetros do protótipo..... | 36 |
| Figura 18 – Comparativo dos protótipos v1.0 e v1.5. (a) desenho em CAD da v1.5, (b) desenho em CAD da v1.0 e (c) comparativo dos esforços gerado na estrutura dos fusos magnéticos..... | 37 |
| Figura 19 – Resultados do estudo da influência da discretização das estruturas helicoidais (a) conjugado e (b) força axial..... | 38 |
| Figura 20 – Formado dos ímãs propostos. (a) desenho em CAD, (b) ímãs do rotor e (c) ímãs do translator..... | 38 |
| Figura 21 – Comparação dos resultados numéricos entre a ímãs idealmente helicoidais e discretização proposta..... | 39 |
| Figura 22 – Resultados numéricos de dois modelos 2D via EF. (a) Densidade e linhas de fluxo magnético para o modelo com ímãs radialmente magnetizados, (b) densidade e linhas de fluxo magnético para o modelo com ímãs arranjo de Halbach, (c) comparativo da força obtida e (d) comparativo da densidade de força alcançada..... | 40 |
| Figura 23 – (a) modelo de EF 2D, (b) modelo de EF 3D sem discretização, (c) modelo 3D com discretização, (d) rotor sem os ímãs colados e (e) rotor com os ímãs colados..... | 41 |
| Figura 24 – Representação das áreas desmagnetizadas..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 – Modelos 3D para diferentes magnetizações dos ímãs permanentes (a) arranjo de Halbach e (b) radialmente magnetizados..... | 43 |
| Figura 26 – Comparação entre os resultados numéricos obtidos para as duas topologias. (a) densidade de fluxo no entreferro e (b) força axial..... | 44 |
| Figura 27 – Modelos numéricos utilizados nas simulações de EF. (a) 2D axissimétrico RMT, (b) 2D axissimétrico HMT, (c) 3D RMT e (d) 3D HMT..... | 45 |
| Figura 28 – Comparação dos resultados obtidos das simulações para os diferentes modelos apresentados na Figura 27..... | 45 |
| Figura 29 – Modelos 3D para simulação numérica. (a) com ímãs radialmente magnetizados (RMT) e (b) com arranjo de Halbach (HMT)..... | 47 |
| Figura 30 – Modelo 2D axissimétrico considerando a desmagnetização. (a) operação em regime normal e (b) operação com sobrecarga..... | 47 |
| Figura 31 – Protótipo do fuso magnético com arranjo de Halbach. (a) Fuso magnético montado na bancada de testes e (b) detalhe do arranjo de Halbach colados no translator formado por ímãs flexíveis com 0,47 T de fluxo remanescente..... | 48 |
| Figura 32 – Protótipo do fuso magnético com arranjo de Halbach. (a) Fuso magnético montado na bancada de testes e (b) detalhe do arranjo de Halbach colados no translator formado por ímãs flexíveis com 0,47 T de fluxo remanescente..... | 48 |
| Figura 33 – Comparação de topologias de fusos magnéticos. (a) topologia proposta e (b) radialmente magnetizado..... | 50 |
| Figura 34 – Fuso magnético com estrutura apresentando diferentes níveis de discretização e sem adição da espiral. (a) 15°, (b) 30°, (c) 45° e (d) 60°..... | 50 |
| Figura 35 – Comparação de topologias de fusos magnéticos. (a) topologia proposta e (b) radialmente magnetizado..... | 51 |
| Figura 36 – Tradicional fuso mecânico..... | 54 |
| Figura 37 – Configurações de fusos com diferentes números de fios de rosca..... | 55 |
| Figura 38 – Fuso magnético radialmente magnetizado conceitual..... | 55 |
| Figura 39 – Fuso magnético de relutância variável conceitual..... | 56 |
| Figura 40 – Principais dimensões do fuso magnético de relutância variável conceitual..... | 57 |
| Figura 41 – Força e conjugado característicos de um fuso magnético de relutância variável conceitual..... | 61 |
| Figura 42 – Visão em corte da topologia proposta..... | 67 |
| Figura 43 – Modelos numéricos utilizados: (a) axissimétrico 2D e (b) 3D..... | 68 |
| Figura 44 – Comparação da força axial fornecida pelos modelos numéricos 2D e 3D..... | 70 |
| Figura 45 – Comparação da torque fornecida pelos modelos numéricos 2D e 3D..... | 70 |
| Figura 46 – Linhas de fluxo magnético para diferentes posições relativas entre o translator e o rotor. (a) completo alinhamento dos dentes (posição de equilíbrio magnético), (b) posição de máxima produção de força, (c) Simetria do campo magnético (posição de equilíbrio magnético) e (d) gráfico da força em função do deslocamento axial..... | 73 |
| Figura 47 – Influência do comprimento de entreferro na força axial máxima..... | 75 |
| Figura 48 – Influência do comprimento de entreferro na força axial máxima..... | 75 |
| Figura 49 – Variação força axial máxima em função do comprimento radial da linha do entreferro..... | 76 |
| Figura 50 – Variação força axial máxima em função do comprimento axial do translator..... | 76 |
| Figura 51 – Influência da espessura dos ímãs permanentes na máxima força produzida..... | 78 |
| Figura 52 – Influência da espessura dos ímãs permanentes na máxima força produzida por volume de ímã permanente..... | 79 |
| Figura 53 – Influência do encobrimento polar na máxima força produzida por volume de ímã permanente..... | 79 |

| | |
|---|-----|
| Figura 54 – Influência do encobrimento polar na máxima força produzida por volume de ímã permanente..... | 80 |
| Figura 55 – Influência da profundidade da ranhura na força axial máxima..... | 81 |
| Figura 56 – Diferentes graus de discretização das estruturas helicoidais do translator. Os PMs foram ocultados para uma visualização mais clara das estruturas..... | 82 |
| Figura 57 – Influência do número de segmentos na força axial..... | 83 |
| Figura 58 – Influência do número de segmentos no conjugado..... | 83 |
| Figura 59 – RBMLS com diferentes números de polos..... | 85 |
| Figura 60 – Influência do número de polos na força axial..... | 85 |
| Figura 61 – Influência do número de polos no conjugado..... | 86 |
| Figura 62 – Rotor (fuso ferromagnético de dupla entrada): (a) desenho em CAD e (b) foto do rotor usinado em aço SAE-AISI 1020..... | 89 |
| Figura 63 – Vista explodida do desenho em CAD do translator..... | 90 |
| Figura 64 – Partes estruturais do translator: (a) desenho em CAD e (b) foto do cilindro de alumínio e dos discos de acrílico..... | 91 |
| Figura 65 – Geometria dos segmentos de ímãs permanentes: (a) desenho em CAD, (b e c) fotos dos segmentos de ímãs pintados em azul e vermelho para indicar alternância no sentido de magnetização..... | 92 |
| Figura 66 – Série de cortes para os blocos de ímãs permanentes até a obtenção da geometria final desejada..... | 93 |
| Figura 67 – Estojo para os segmentos de ímã permanentes impresso em impressora 3D..... | 94 |
| Figura 68 – Verificação da densidade de fluxo magnético..... | 94 |
| Figura 69 – Instrumento de caracterização utilizado nos ímãs permanentes..... | 95 |
| Figura 70 – Geometria dos segmentos de material ferromagnético macio: (a) desenho em CAD e (b) fotos do segmento de aço SAE-AISI 1020..... | 97 |
| Figura 71 – Detalhe do encaixe dos segmentos no cilindro de alumínio: (a) detalhes do encaixe tipo rabo de andorinha e (b) foto dos encaixe de dois segmentos de PMs..... | 98 |
| Figura 72 – Detalhes das estruturas helicoidais discretizadas: (a) desenho em CAD e (b) foto do interior do translator contendo as estruturas discretizadas de PMs e aço..... | 99 |
| Figura 73 – Campo magnético resultante visualizado com auxílio de um filme magnético.... | 99 |
| Figura 74 – Desenho em CAD do projeto da bancada de testes para realização dos ensaios do fuso magnético de relutância variável (RBMLS)..... | 100 |
| Figura 75 – Peças de alumínio utilizadas na construção da bancada dedicada aos testes do fuso magnético de relutância variável..... | 101 |
| Figura 76 – Bancada de testes construída para a realização dos procedimentos experimentais no protótipo do fuso magnético de relutância variável (RBMLS)..... | 102 |
| Figura 77 – Esquemático da interação entre os principais componentes constituintes da bancada de testes..... | 104 |
| Figura 78 – Resultados experimentais de 3 ensaios girando o rotor no sentido anti-horário..... | 105 |
| Figura 79 – Resultados experimentais de 3 ensaios girando o rotor no sentido horário..... | 106 |
| Figura 80 – Comparativo entre os dados experimentais e os simulados..... | 107 |
| Figura 81 – Aparato para medição da componente radial do fluxo magnético resultante produzida pelos ímãs permanentes..... | 111 |
| Figura 82 – Ilustração do caminho axial de onde os dados da componente radial do fluxo magnético foram obtidas..... | 111 |
| Figura 83 – Componente radial do fluxo magnético na linha de entreferro sem a presença do rotor..... | 112 |
| Figura 84 – Componente radial do fluxo magnético na linha de entreferro na presença do rotor..... | 113 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Resultados para a máxima força axial obtida nos diferentes modelos. | 42 |
| Tabela 2 – Parâmetros do fuso magnético de relutância variável conceitual. | 62 |
| Tabela 3 – Parâmetros utilizados nas simulações numéricas. | 69 |
| Tabela 4 – Parâmetros iniciais de projeto. | 72 |
| Tabela 5 – Parâmetros a serem utilizados no protótipo. | 87 |
| Tabela 6 – Principais dimensões do fuso ferromagnético (Rotor). | 89 |
| Tabela 7 – Materiais utilizados no translator. | 90 |
| Tabela 8 – Dimensões dos ímãs permanentes de acordo com a Figura 65 (a). | 92 |
| Tabela 9 – Resumo da quantidade de ímãs utilizados no protótipo do RBMLS. | 93 |
| Tabela 10 – Dados de densidade de fluxo magnético na superfície dos ímãs permanentes | 96 |
| Tabela 11 – Dimensões dos segmentos ferromagnético Figura 70 (a). | 97 |
| Tabela 12 – Especificações dos componentes utilizados na bancada de testes. | 102 |
| Tabela 13 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais para as características de força e conjugado máximos e médios. | 107 |
| Tabela 14 – Comparação dos resultados da componente radial do fluxo magnético no entreferro. | 113 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|---|
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| AH | Arranjo de Halbach |
| AMLS | <i>Axially Magnetized Magnetic Lead Screw</i> |
| HMLS | <i>Halbach Magnetized Magnetic Lead Screw</i> |
| LMEAE | Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia |
| LPMM | <i>Linear Permanent Magnet Machine</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| PM | Ímã Permanente – <i>Permanent Magnet</i> |
| RBMLS | <i>Reluctance-Based Magnetic Lead Screw</i> |
| RMLS | <i>Radially Magnetized Magnetic Lead Screw</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| A_g | Área ativa de entreferro |
| $A_{vanço}$ | Avanço do fuso |
| B | Densidade de fluxo magnético |
| B_r | Densidade de fluxo magnético remanescente |
| f_{cmp} | Força produzida pelo campo magnético |
| F_m | Máxima força produzida |
| F_t | Força do translator |
| g | Comprimento do entreferro |
| G | Relação de transmissão |
| H | Intensidade de campo magnético |
| H_c | Coercividade magnética |
| h_m | Espessura dos ímãs permanentes |
| h_s | Profundidade da ranhura do rotor |
| h_t | Altura dos dentes |
| L | Comprimento axial do translator // Indutância |
| n | Rotações por unidade de tempo |
| N_{fios} | Número de fios de rosca |
| P | Número de polos. |
| p | Número de pares de polos |
| P_{asso} | Passo de rosca |
| P_r | Potência do rotor |
| P_t | Potência do translator |
| R_g | Distância radial da linha do entreferro |
| R_{in} | Raio interno do rotor |
| R_m | Raio médio (distancia radial efetiva dos ímãs permanentes) |
| R_r | Raio externo do rotor |
| R_t | Raio externo do translator |
| T_r | Torque do rotor |
| V | Volume |
| V_{PM} | Volume de ímãs permanentes |
| W_{cmp} | Energia armazenada no campo magnético |
| w_m | Largura dos ímãs permanentes |
| w_t | Largura dos dentes |
| α | Arco dos segmentos de ímãs permanentes e ferromagnéticos |
| α_p | Encobrimento polar |
| λ | Passo de rosca |
| λ_{cmp} | Fluxo magnético concatenado |
| μ | Permeabilidade magnética |
| v | Velocidade |
| σ_m | Força de cisalhamento magnético |
| τ_p | Passo polar. |
| ω | Velocidade angular |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 14 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS | 14 |
| 1.3 | VISÃO GERAL DO TRABALHO | 18 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 19 |
| 2.1 | HISTÓRICO DOS FUSOS MAGNÉTICOS | 19 |
| 2.2 | TOPOLOGIAS DE FUSOS MAGNÉTICOS E ELETROMAGNÉTICOS | 23 |
| 2.2.1 | Fuso magnético radialmente magnetizado – RMLS..... | 26 |
| 2.2.2 | Fuso magnético com arranjo de Halbach – HMLS | 39 |
| 2.2.3 | Fuso magnético axialmente magnetizado– AMLS..... | 49 |
| 2.3 | RESUMO DO CAPÍTULO | 51 |
| 3 | PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO FUSO MAGNÉTICO..... | 53 |
| 3.1 | ANALOGIA COM UM FUSO MECÂNICO | 53 |
| 3.2 | FUSO MAGNÉTICO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL..... | 56 |
| 3.2.1 | Produção de Força Devido a Variação da Relutância..... | 58 |
| 3.2.2 | Relação de Transmissão | 59 |
| 3.2.3 | Característica de Conjugado e Força | 61 |
| 4 | PROJETO MAGNÉTICO DO RBMLS..... | 63 |
| 4.1 | ESCOLHA E APRESENTAÇÃO DA TOPOLOGIA | 63 |
| 4.2 | MODELOS NUMÉRICOS | 67 |
| 4.3 | ANÁLISE NUMÉRICA – MODELOS 2D..... | 70 |
| 4.3.1 | Comprimento do entreferro - g | 74 |
| 4.3.1 | Dimensionando um RBMLS..... | 74 |
| 4.3.2 | Espessura dos ímãs permanentes – h_m..... | 77 |
| 4.3.3 | Encobrimento polar – α_p | 79 |
| 4.3.4 | Profundidade de ranhura – h_t..... | 80 |
| 4.4 | ANÁLISE NUMÉRICA – MODELO 3D | 81 |
| 4.4.1 | Efeito da utilização de estruturas não idealmente helicoidais | 81 |
| 4.4.2 | Número de polos | 84 |
| 4.5 | RESUMO DO CAPÍTULO | 86 |
| 5 | ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO PROTÓTIPO | 88 |
| 5.1 | RBMLS | 88 |
| 5.1.1 | Rotor | 88 |
| 5.1.2 | Translator | 89 |
| 5.1.3 | Montagem do Translator | 97 |
| 5.2 | BANCADA DE TESTES | 100 |
| 6 | ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 103 |
| 6.1 | SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS | 103 |
| 6.2 | ENSAIO DE FORÇA E CONJUGADO ESTÁTICOS..... | 103 |
| 6.3 | RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO - G | 108 |
| 6.4 | CARACTERÍSTICA DE DESLOCAMENTO | 109 |
| 6.5 | DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO PRODUZIDO PELOS ÍMÃS PERMANENTES | 110 |
| 6.6 | RESUMO DO CAPÍTULO | 114 |
| 7 | CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 115 |
| 7.1 | TRABALHOS FUTUROS | 117 |
| 7.2 | PRODUÇÃO CIENTÍFICA | 118 |
| | REFERÊNCIAS..... | 119 |

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados a contextualização do trabalho, a justificativa e os objetivos da pesquisa. Por último, uma visão global do trabalho através de uma descrição geral da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O presente trabalho tem foco no projeto e desenvolvimento de um fuso magnético. Os fusos magnéticos fazem parte da família das engrenagens magnéticas, as quais, de uma forma geral, são os correspondentes magnéticos das tradicionais engrenagens mecânicas. Dito isso, este trabalho apresenta o estudo, projeto e realização de um fuso magnético, o qual é o correspondente magnético dos habituais fusos mecânicos.

1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Atuadores lineares oferecem força axial e são úteis em uma gama de aplicações, desde automação industrial, indústria automobilística e aeroespacial. Diversas são as tecnologias possíveis de serem empregadas para tal finalidade, dependendo da força necessária, o comprimento do curso e dos requisitos de desempenho dinâmico, bem como o custo associado, confiabilidade e manutenção. Embora apresentem alta densidade de força e operem em altas frequências, os atuadores piezoelétricos sofrem em função de seu limitado curso de operação; e, na grande maioria das aplicações, os cursos necessários são relativamente longos. Por esse motivo, normalmente são empregadas uma das seguintes tecnologias para atuação linear:

- atuadores hidráulicos apresentam alta densidade de força e longos cursos de operação.

No entanto, sua elevada força é dependente de um sistema com fluido pressurizado (na ordem de 7 MPa a 35 MPa). Esse sistema adiciona volume, peso e custos elevados de manutenção. Além disso, a frequência de oscilação operacional é relativamente baixa (na casa dos 10 Hz).

- atuadores pneumáticos apresentam densidade de força bem menor do que os atuadores hidráulicos, em função da pressão de operação ser inferior (550 kPa a 700 kPa), e apresentam similar dependência de compartimentos para armazenamento de ar comprimido. O custo de manutenção é outro fator negativo.

- atuação eletromecânica é geralmente alcançada através da conversão de movimento rotativo-linear, por intermédio de fusos mecânico e rolamentos lineares, os quais atingem elevados valores de densidade de força. Por apresentarem desgastes mecânicos, falhas podem ocorrer através de intertravamento das partes móveis, tornando a tecnologia não ideal para aplicações onde a confiabilidade é um fator chave, como, por exemplo na aviação.

- atuadores eletromagnéticos lineares oferecem muitas vantagens, tais como, praticamente não necessitarem de manutenção e apresentam elevada eficiência. No entanto, apresentam densidade de força menor do que os atuadores eletromecânicos. (WANG; ATALLAH; WANG, 2011).

Baseado nesse contexto é buscada uma solução tão confiável quanto os atuadores eletromagnéticos e que, ao mesmo tempo, apresente densidade de força competitiva com as demais tecnologias de atuação linear. Há ainda uma tendência cada vez maior de que os dispositivos mecânicos, sobretudo as engrenagens mecânicas, sejam substituídos por alternativas mais confiáveis e que necessitem menos manutenção.

Apesar da adesão por parte da indústria ainda não estar consolidada, as engrenagens magnéticas têm se mostrado uma atrativa opção neste cenário (TLALI; WANG; GERBER, 2014), especialmente os fusos magnéticos. Ao longo das duas últimas décadas, diversas topologias de engrenagens magnéticas foram apresentadas na literatura com vantagens promissoras se comparadas com suas versões mecânicas. Para fins de exemplificação, algumas características sobre os fusos magnéticos são listadas a seguir:

- ausência de contato físico/mecânico em sua operação. Isso permite que os fusos magnéticos operem com suas partes móveis completamente separadas entre si. Essa característica torna-os uma excelente alternativa para aplicações na indústria alimentícia, salas limpas e indústria química.

- intrínseca proteção contra sobrecarga. A transmissão de força entre as partes móveis é totalmente transmitida por meio do acoplamento magnético entre as partes. Dessa forma, a transmissão do movimento é limitada pela força de interação magnética. Uma vez que a força aplicada exceda a força magnética, ocorrerá um efeito chamado de escorregamento de polos. Esse efeito evita que o dispositivo seja danificado.

- operação de forma dual. Diferentemente dos fusos mecânicos, os quais normalmente operam convertendo movimento rotativo em movimento linear, os fusos magnéticos operam também convertendo movimento linear em rotativo sem apresentar intertravamento entre as partes móveis, permitindo relações de transmissão mais elevadas.

- dispensa lubrificação. Como não há contato entre as partes móveis, a lubrificação não é necessária.

- produz pouco ou nenhum ruído audível.

Em termos de aplicação, um exemplo interessante é o da produção de energia através de aproveitamentos maremotriz. No atual cenário energético global, há uma concreta tendência de migração da matriz energética dos combustíveis fósseis para fontes de energias renováveis. Dessa forma, é justificável a pesquisa dos fusos magnéticos, uma vez que é verificado um crescimento no interesse pela aplicação da tecnologia na geração por meio de energia maremotriz proveniente do movimento das ondas, como apresentado nas referências (HOLM et al., 2013; PAKDELIAN; TOLYAT, 2012a).

Além de apresentarem potencial para serem utilizados na área de geração de energias limpas, há também uma tendência na utilização dos fusos magnéticos no setor automotivo.

Como exemplo, os fusos magnéticos, quando acoplados à uma máquina rotativa, podem ser utilizados como suspensão veicular regenerativa, como demonstrado em (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014a, 2014b).

De modo geral, todas as aplicações de fusos magnéticos acima citadas utilizam ímãs permanentes de elevado produto energético e são de alta complexidade. Sendo assim, dada a justificativa da importância do estudo dos fusos magnéticos e o impacto positivo da utilização destes no atual cenário industrial, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um fuso magnético com elevada relação força e conjugado por volume ativo e que ofereça uma solução simplificada. Em outras palavras, busca-se uma configuração de fuso magnético com o mesmo princípio de operação, porém, utilizando um menor volume de ímãs permanentes, além de apresentar simplificações do ponto de vista construtivo. Objetiva-se também apresentar uma validação experimental do dispositivo por meio da comparação dos resultados numéricos e dos resultados experimentais, proveniente de um protótipo montado em uma bancada de testes. A fim de atingir este objetivo geral, apresenta-se os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver um modelo numérico em software de elementos finitos onde todos os parâmetros dimensionais sejam parametrizados, possibilitando um estudo de sensibilidade paramétrica bem detalhado em função das dimensões do fuso magnético;
- estabelecer critérios que permitam identificar características desejáveis para a maximização da força produzida pelo fuso magnético;
- realizar a modelagem numérica eletromagnética do fuso magnético;
- propor e validar um modelo numérico 2D axissimétrico a fim de acelerar o estudo de sensibilidade paramétrica;
- construir um protótipo de um fuso magnético projetado com base nos resultados obtidos da análise numérica;

- construir uma bancada de testes dedicada à aquisição dos dados experimentais do fuso magnético construído.

- validar a metodologia proposta a partir da comparação dos resultados experimentais obtidos do protótipo com os resultados obtidos a partir dos modelos numéricos.

1.3 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo que os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte forma:

- no Capítulo 2 é apresentado o histórico e a revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho e o estado da arte no que diz respeito aos fusos magnéticos.

- no Capítulo 3 é descrito o princípio de funcionamento de um fuso magnético de relutância variável ideal é introduzido.

- no Capítulo 4 é realizada uma modelagem numérica do fuso magnético proposto, seguido de um estudo de sensibilidade paramétrica objetivando a maximização da força produzida por volume de ímã permanente.

- no Capítulo 5 é apresentado o detalhamento da construção das partes constituintes do protótipo, além da caracterização dos ímãs permanentes empregados. É também apresentada a bancada de testes desenvolvida para realização de procedimentos experimentais.

- no Capítulo 6 os resultados experimentais obtidos são expostos e discutidos.

- no Capítulo 7 são discutidas as principais conclusões obtidas a partir da realização deste trabalho e são apresentadas ideias para trabalhos futuros que podem ser realizados para dar continuidade a este projeto de pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são fornecidas informações essenciais para o entendimento desta dissertação. Um contexto histórico sobre os fusos magnéticos, desde o surgimento da tecnologia até o estado da arte, é apresentado aqui. Na sequência, diferentes topologias de fusos magnéticos são percorridas com foco em resultados de simulações e experimentais. As principais dificuldades encontradas na execução de protótipos também são abrangidas e discutidas. Posteriormente, é proposta uma classificação para os fusos magnéticos baseando-se no sentido de magnetização dos ímãs permanentes utilizados (axial, radial ou arranjo de Halbach).

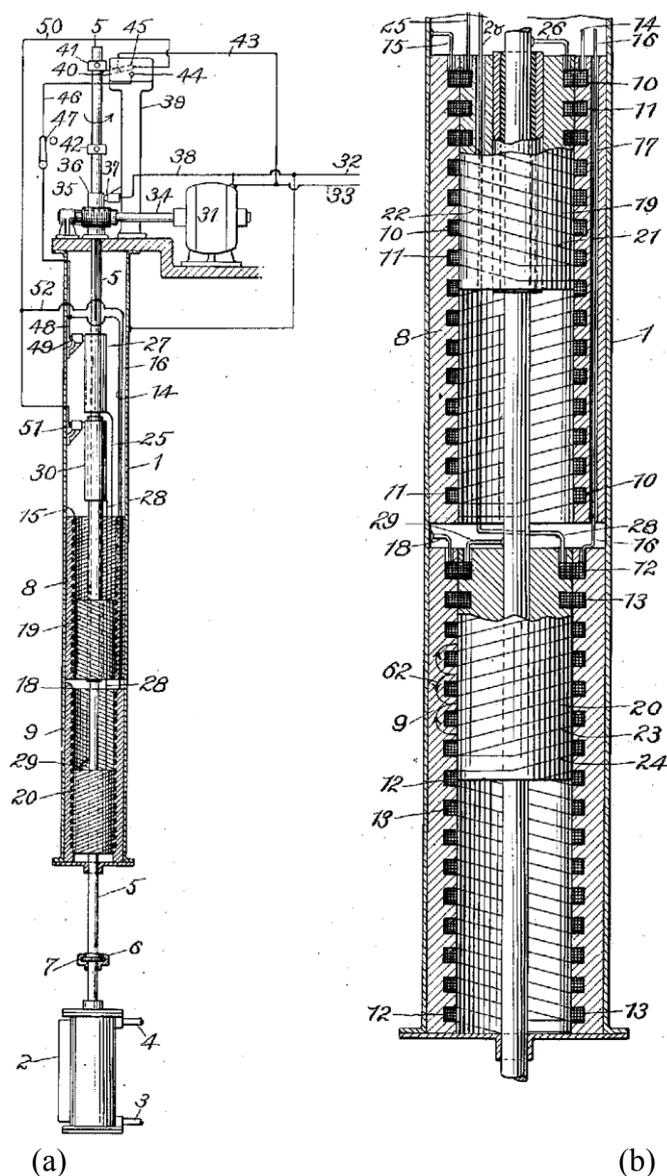
2.1 HISTÓRICO DOS FUSOS MAGNÉTICOS

Apesar das pesquisas relacionadas aos fusos magnéticos só terem despontado nas duas últimas décadas, esta tecnologia é bastante antiga, possuindo relatos com quase um século de existência. Em 1925, Benjamin Andrews patenteou o que, por conhecimento do autor, é considerado o primeiro registro de um fuso magnético. O principal objetivo na época era desenvolver um mecanismo que, quando uma de suas partes móveis fosse rotacionada, a outra parte fosse linearmente deslocada de forma lenta. Tal configuração permitiria a operação de martelos de impacto, furadeiras, aplicação de rebites, entre outras. No entanto, o foco do dispositivo era o acionamento de bombas para a extração de líquidos, em especial o petróleo, em situações em que o líquido estivesse a uma grande profundidade abaixo do nível do solo, necessitando que a bomba fosse localizada na cota do líquido a ser bombeado. A Figura 1(a) ilustra tal configuração.

A topologia proposta por Andrews (1925) não utiliza ímãs permanentes, dado ao baixo produto energético dos materiais ferromagnéticos duros na época de sua concepção. Portanto, o caráter magnético do dispositivo é dado por correntes elétricas que percorriam as bobinas

localizadas nas ranhuras da culatra externa (representadas pelos numerais 10, 11, 12 e 13 da Figura 1(b)) e também pelas ranhuras da culatra interna do atuador, (representadas pelos numerais 21, 22, 23 e 24), produzindo campos magnéticos de formato helicoidal. O fluxo produzido pelas bobinas era então concentrado em direção aos dentes de material ferromagnético macio, que por sua vez, fechavam o circuito magnético. Essa configuração permitia a transformação de movimentos rotacionais em movimentos lineares. O princípio de funcionamento dos fusos magnéticos atuais se assemelha a este dispositivo.

Figura 1 – Fuso eletromagnético para bombeamento de petróleo.

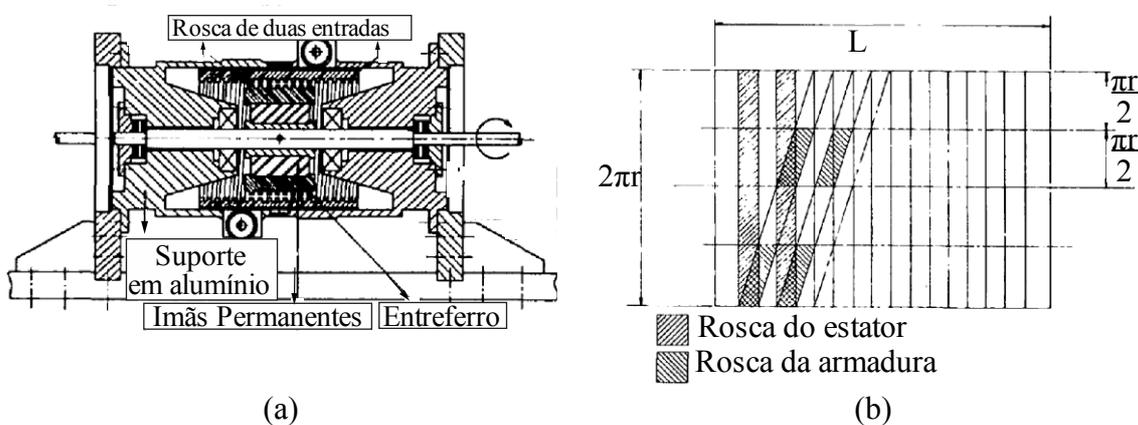


Fonte: Adaptado de Andrews (1925).

Descrito como motor linear de relutância, Gerrard e Paul (1971) apresentaram um dispositivos contendo ranhuras helicoidais parecidas com as descritas por Andrews (1925). Competente a operar com deslocamentos de mais de 1 m apresentando boa precisão e relativa baixa velocidade linear, a principal aplicação para a tecnologia era servir como atuador linear na usinagem de precisão. A proposição da tecnologia surgiu com base na incapacidade de os motores de indução operarem com precisão.

Anos mais tarde, o mesmo autor propõe um dispositivo muito semelhante com a utilização de ímãs permanentes ao invés de enrolamentos com correntes para produção do fluxo magnético, como ilustrado na Figura 2 (a) (PAUL, 1978). Com a mesma terminologia utilizada na referência, o protótipo é composto por uma armadura que é rotacionada por um dispositivo externo. O estator é de material ferromagnético macio e contém ranhuras ortogonais e retangulares. A armadura é composta de material ferromagnético macio acoplado a um eixo não magnético. Colados à armadura, encontram-se dois blocos retangulares de ímãs permanentes. As ranhuras da armadura possuem mesma largura e mesmo passo das do estator, no entanto estas são cortadas de forma a formar um fuso de duas entradas, conforme ilustrado na Figura 2 (b). Uma vez que os passos das ranhuras do estator e da armadura são idênticos, os

Figura 2 – Conversor magnético linear-rotativo. (a) corte longitudinal do protótipo e (b) visão planificada das ranhuras do estator e da armadura.

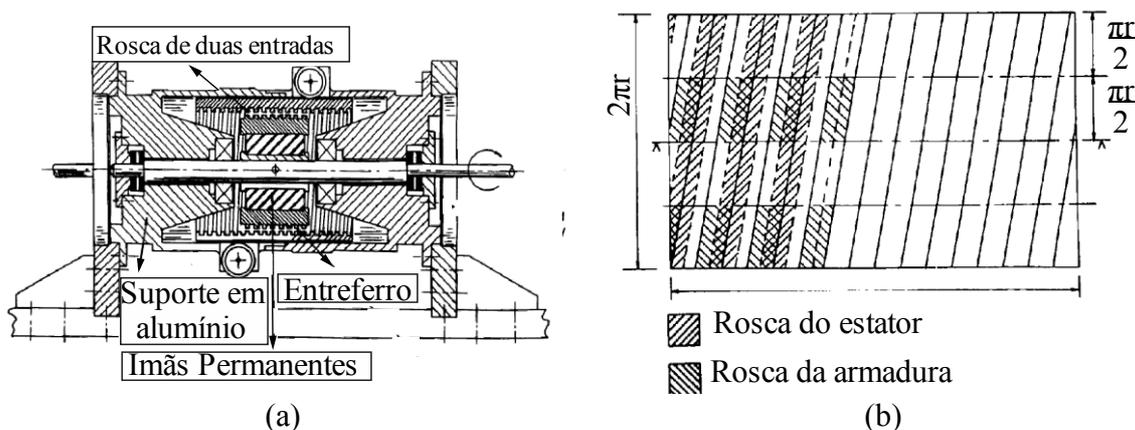


Fonte: Adaptado de Paul (1978).

dentados do estator e da armadura estarão sempre alinhados em dois pontos diametricamente opostos. Os polos magnéticos dos ímãs permanentes são dispostos de maneira a se alinharem com os dois pontos diametralmente opostos. Dessa forma, se o eixo magnético da armadura for rotacionado, um deslocamento linear será produzido no estator para que os dentes continuem em posição de equilíbrio. Garantindo que o estator não esteja bloqueado, não haverá escorregamento de polos, e o dispositivo se moverá em sincronismo. Contudo, um giro completo na armadura fará com que o estator se desloque o equivalente à distância entre dois dentes da mesma rosca.

Um ano mais tarde, Paul (1979) apresentou uma pequena modificação na topologia anteriormente discutida, mas que ocasionou um grande efeito na forma como o dispositivo operava. As ranhuras do estator, que anteriormente eram ortogonais, ganharam forma de rosca com duas entradas, exatamente como as empregadas na armadura, Figura 3 (b). Essa pequena modificação possibilitou que o dispositivo operasse em ambos os sentidos – linear para rotacional ou rotacional para linear –, aumentando assim, o número de possíveis aplicações para esta tecnologia.

Figura 3 – Conversor magnético linear-rotativo ou rotativo-linear. (a) corte longitudinal do protótipo e (b) visão planificada das ranhuras do estator e da armadura.



Fonte: Adaptado de Paul (1979).

Devido aos baixos valores de densidade de conjugado e força atingidos – parte pela topologia e parte pelos baixos valores do produto energético dos ímãs permanentes disponíveis na época – esta tecnologia não ganhou espaço na indústria.

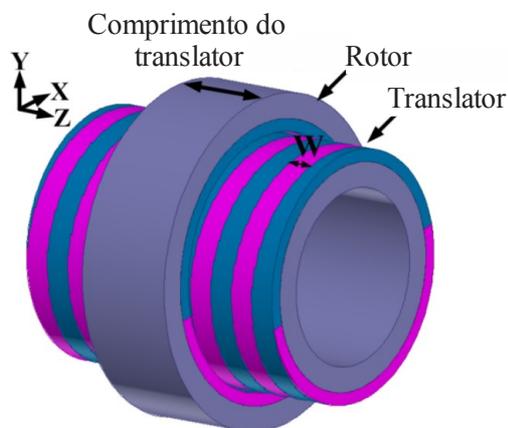
Por volta de três décadas mais tarde Wang, Atallah e Wang (2011) apresentaram uma nova topologia de fuso magnético com densidade de conjugado e força atrativos para aplicações industriais. A estrutura apresentada é considerada o estado da arte da tecnologia relativa aos fusos magnéticos. Pequenas variações na topologia e técnicas de construção estão sendo apresentadas com frequência na literatura em busca de otimização, viabilização comercial e aprimoramentos para aplicações específicas.

2.2 TOPOLOGIAS DE FUSOS MAGNÉTICOS E ELETROMAGNÉTICOS

Todas as topologias de fusos magnéticos apresentam uma característica em comum: serem compostos por um rotor e um translator acoplados magneticamente entre si e operando em sincronismo, ver Figura 4.

Enquanto o translator se move axialmente para frente e para trás, o rotor é rotacionado em torno do mesmo eixo. Ambas as partes podem ser denominadas rotor ou translator, e isso depende do movimento executado por estas. A maneira em que cada parte irá se movimentar

Figura 4 – Partes constituintes de um fuso magnético genérico.



Fonte: Adaptado de Pakdelian, Frank e Toliyat (2012).

está diretamente relacionada ao modo que estas partes são fixadas a uma estrutura externa e, por sua vez, sua denominação também dependerá dessa fixação.

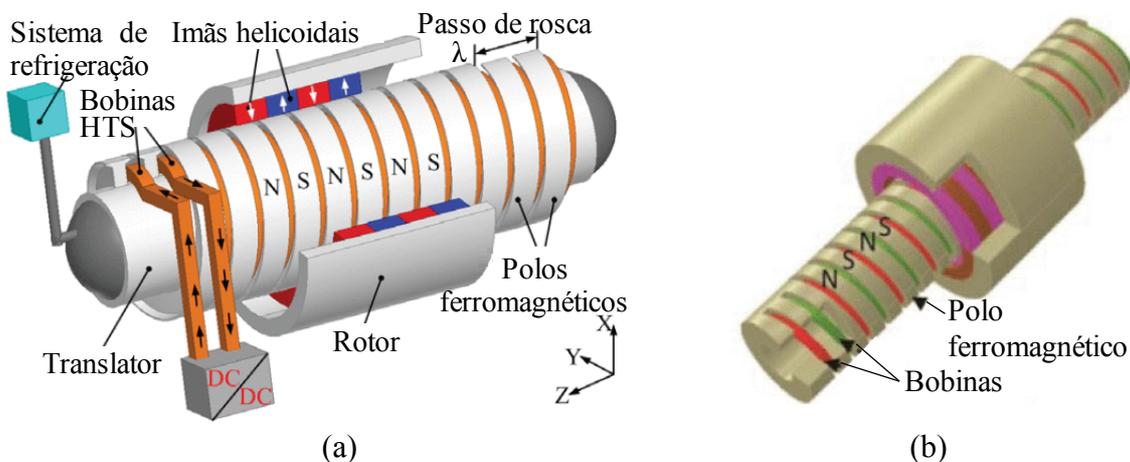
A nomenclatura relacionada às diferentes topologias de fusos magnéticos não é algo definido e está longe de haver um senso comum dentre os autores. Dito isso, neste trabalho uma tentativa de classificação para as diferentes topologias encontradas na literatura é feita baseada na origem do campo magnético, no sentido de magnetização dos ímãs permanentes e também na maneira em que estes são dispostos no dispositivo.

A grande maioria dos fusos magnéticos possuem sua fonte de magnetismo proveniente de ímãs permanentes. No entanto, existem alguns trabalhos relatando topologias de fusos eletromagnéticos onde o campo magnético necessário é gerado por bobinas percorridas por corrente elétrica. O foco deste trabalho está nos fusos magnéticos em que a origem do magnetismo é dada totalmente por intermédio da utilização de ímãs permanentes, portanto, apenas uma breve apresentação será feita sobre os fusos eletromagnéticos.

A estrutura base (rotor e translator), bem como o princípio de funcionamento dos fusos eletromagnéticos são semelhantes aos dos fusos magnéticos. A principal diferença é que nos fusos eletromagnéticos, os ímãs existentes no translator e/ou rotor são substituídos por bobinas percorridas de corrente, conforme ilustrado na Figura 5. Pensando na realização do dispositivo, a utilização de bobinas ao invés de PMs facilita o processo de obtenção de um fluxo magnético resultante de geometria helicoidal, no entanto, as densidades de força alcançadas são bastante reduzidas.

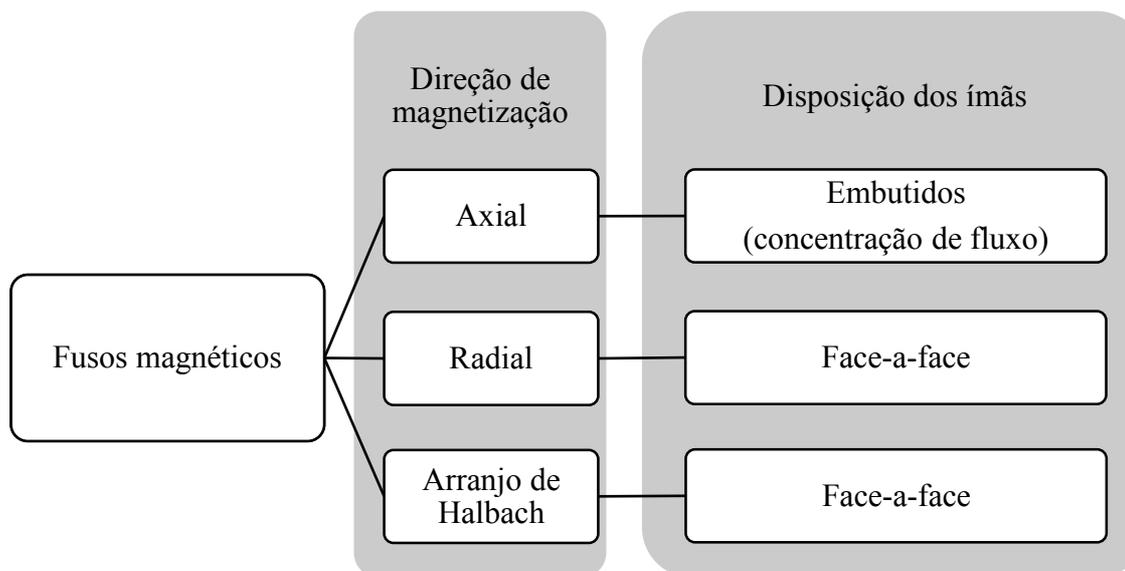
Devido ao grande número de possíveis topologias de fusos magnéticos e também com o intuito de facilitar a organização textual neste trabalho, os fusos magnéticos serão classificados em função do sentido de magnetização dos ímãs permanentes e também na maneira em que estes são dispostos no dispositivo, conforme hierarquizados na Figura 6.

Figura 5 – Exemplos de fusos eletromagnéticos.



Fonte: (a) adaptado de Ji, Ling e Zhao (2017) e (b) adaptado de Lu e Wu (2014)

Figura 6 – Classificação dos fusos magnéticos quanto a direção de magnetização e disposição dos ímãs.

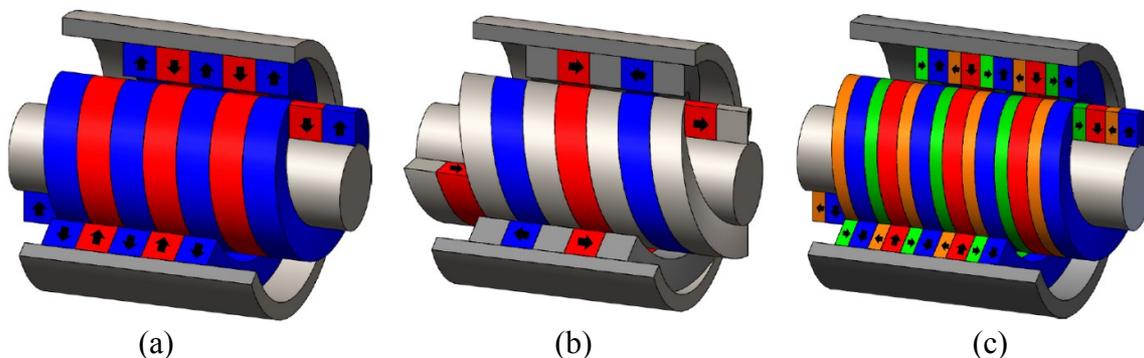


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor esclarecer, uma imagem com cada topologia mencionada na Figura 6 é ilustrada na Figura 7.

As topologias de fusos magnéticos acima ilustradas podem ainda sofrer variações, como, por exemplo, apresentar ímãs permanentes em somente em uma de suas partes móveis. É válido mencionar que o objeto de estudo desta dissertação é uma variação da topologia ilustrada na Figura 7 (b).

Figura 7 – Diferentes topologias de fusos magnéticos. (a) radialmente magnetizado e ímãs dispostos face-a-face., (b) axialmente magnetizados e com concentração de fluxo, (c) arranjo de halbach e ímãs dispostos face-a-face.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Agora que uma classificação foi adotada, essas topologias serão discutidas em maiores detalhes no decorrer deste trabalho.

Devido à literatura relacionada a fusos magnéticos ser quase que em sua totalidade difundida em língua inglesa e por preferência do autor, as siglas referentes a cada topologia serão mantidas de acordo com sua versão na língua inglesa.

2.2.1 Fuso magnético radialmente magnetizado – RMLS¹.

Dentre as topologias atuais, esta foi a primeira a ser explorada em detalhes e atualmente a mais difundida. De um modo geral, topologias de fusos magnéticos contendo ímãs radialmente magnetizados apresentam elevada densidade de força/conjugado mostrando-se promissoras a competir com seus equivalentes mecânicos. Uma dificuldade construtiva aparece constantemente nas tentativas de fabricação desses fusos magnéticos: a confecção e magnetização de ímãs permanentes com formato helicoidal, conforme apresentado no decorrer desta subseção.

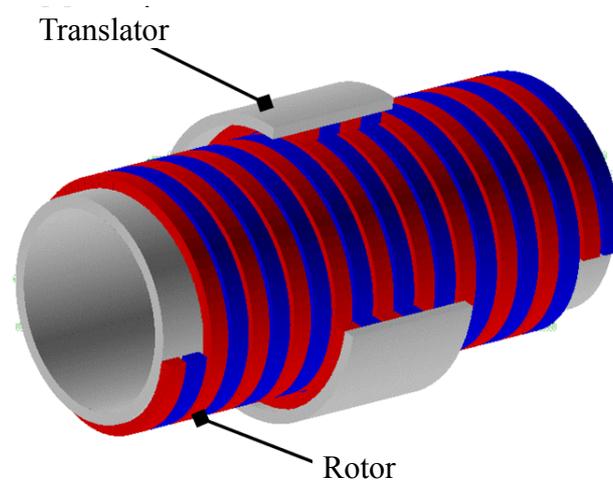
¹ RMLS – Sigla para “*Radially Magnetized Lead Screw*”

O dispositivo apresentado por Wang, Atallah e Wang (2011), inicialmente classificado como atuador linear eletromagnético baseado no conceito de fuso magnético, foi o precursor de uma tendência crescente nas pesquisas relacionadas aos fusos magnéticos.

O atuador linear de Wang, Atallah e Wang (2011) surgiu com interesse em encontrar uma solução tão confiável quanto os atuadores eletromagnéticos e que, ao mesmo tempo, apresentasse densidade de força competitiva com as demais tecnologias de atuação linear.

A Figura 8 ilustra o atuador linear-rotativo do tipo fuso magnético. Em (WANG; ATALLAH; WANG, 2011) foi demonstrado de maneira analítica e numérica que com parâmetros apropriados é possível alcançar densidade de força na ordem dos 10 MN/m^3 . Além disso, quando combinado com um motor de ímãs permanentes “*brushless*” naturalmente refrigerado apresentando densidade de conjugado de aproximadamente 15 kNm/m^3 , a densidade de força do sistema combinado é maior do que a de um atuador linear de ímãs permanentes refrigerado por líquido. Essas características de confiabilidade e alta densidade de forças fizeram com que as pesquisas relacionadas aos fusos magnéticos aumentassem significativamente.

Figura 8 – Partes constituintes de um fuso magnético genérico.



Fonte: Adaptado de Wang, Atallah e Wang (2011).

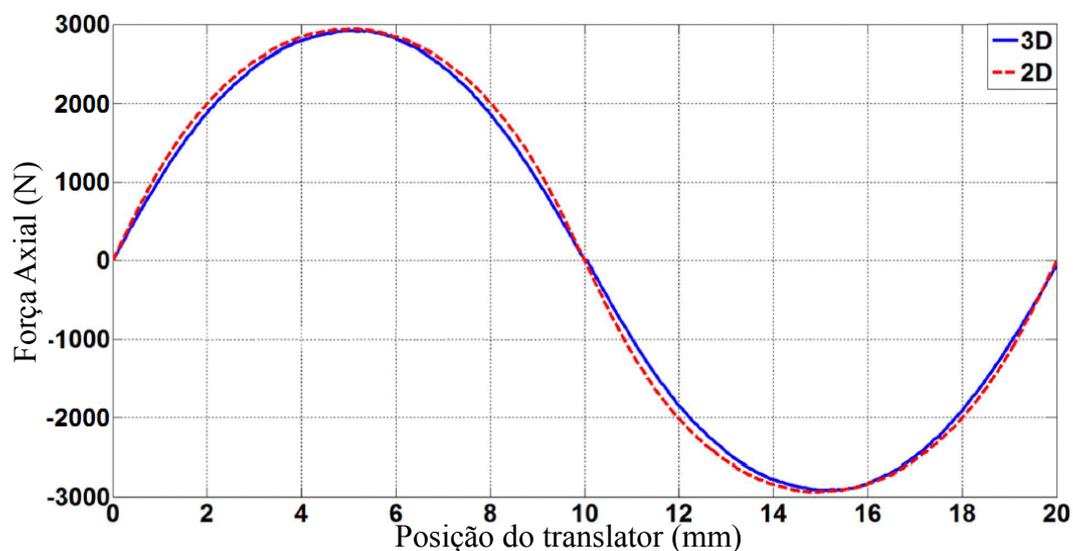
Pouco tempo mais tarde um grupo norte americano com bastante atuação na área de engrenagens magnéticas e dispositivos eletromagnéticos, publicou uma série de trabalhos relacionados a um fuso magnético de ímãs permanentes radialmente magnetizados. Como já mencionado, a nomenclatura para essa tecnologia não é bem definida, e nesses trabalhos o fuso magnético foi denominado TROMAG (“*Trans-Rotary Magnetic Gear*”) com a intenção de explicitar o caráter de engrenagem magnética apresentado pelo dispositivo.

Em um dos trabalhos deste grupo é proposto a utilização do fuso magnético na geração de energia através do movimento das ondas, tirando proveito da característica de operação deste dispositivo, o qual é capaz de, mesmo apresentando uma estrutura compacta, converter movimentos lineares de grande densidade de força e baixa velocidade (ondas) em movimentos rotacionais de grande velocidade angular (eixo do rotor) (PAKDELIAN; TOLIYAT, 2012a).

Em outro trabalho, Pakdelian e Toliyat (2012b) exploram, via *software* de elementos finitos, diversos parâmetros magnéticos de fusos magnéticos radialmente magnetizados. Como a análise 3D é um processo demorado, um modelo axissimétrico é proposto apresentando grande grau de precisão, Figura 9. Esse feito já havia sido realizado no trabalho de Wang, Atallah e Wang (2011) e mostra-se ser uma boa prática para acelerar o processo de análise numérica.

Através do modelo 2D axissimétrico, um estudo de sensibilidade paramétrica com uma grande variedade de parâmetros pode ser realizado: característica da força e conjugado em função do deslocamento linear (Figura 9), maximização da força por unidade de área ativa em função da espessura e largura dos ímãs permanentes, entre outros. No entanto, existem parâmetros que não podem ser analisados com o modelo equivalente axissimétrico 2D. O estudo do efeito da utilização de ímãs não idealmente helicoidais exige um modelo 3D.

Figura 9 – Característica da força em função do deslocamento linear de um fuso magnético radialmente magnetizado.

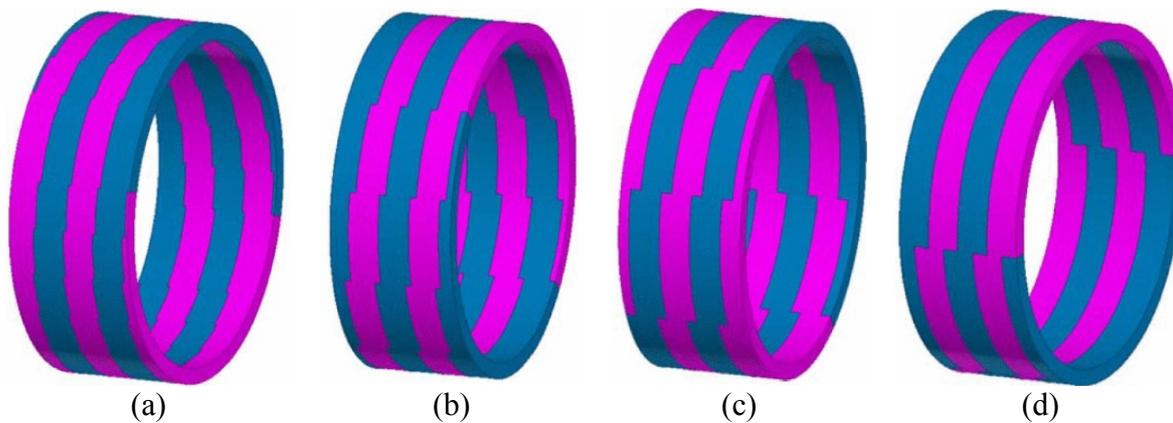


Fonte: Pakdelian e Toliyat (2012b).

A confecção de ímãs permanentes no formato de hélice é algo que tem se mostrado muito complexo e tal feito, por conhecimento do autor, ainda não foi alcançado de forma mais adequada. Pensando no processo de realização de um fuso magnético, uma alternativa para contornar a problemática relacionada ao formato helicoidal dos ímãs permanentes é a adoção de uma estrutura segmentada que se assemelhe a uma hélice. Obviamente que quanto mais segmentos, mais próximo será a estrutura de uma hélice ideal. A Figura 10 apresenta quatro estruturas com diferentes graus de segmentação. Um estudo paramétrico para a predição da força e conjugado produzidos é realizado através de um modelo 3D. Os resultados estão dispostos na Figura 11.

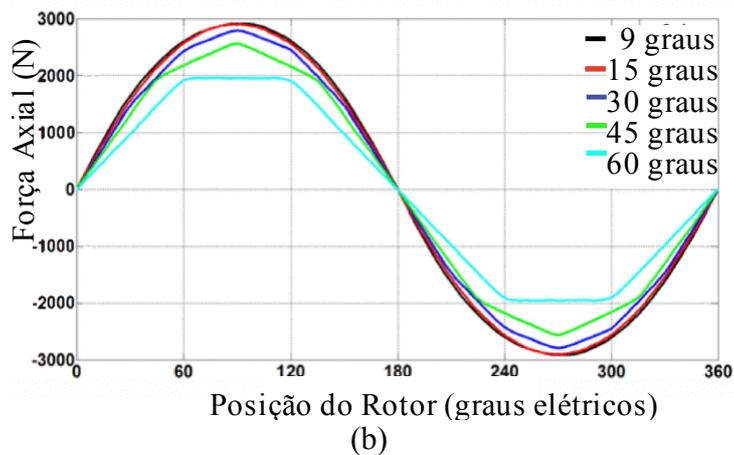
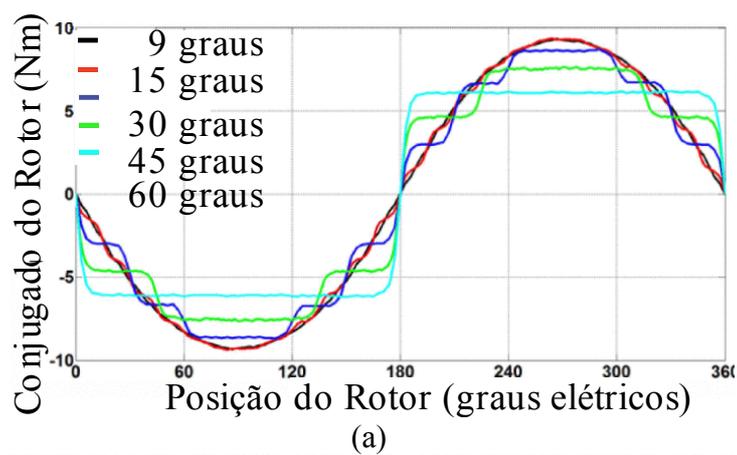
Através dos resultados numéricos é evidenciado que quanto mais distante a estrutura resultante for de uma hélice perfeita, menor será o conjugado máximo e a mais trapezoidal será a característica da força. Foi entendido pelo autor do trabalho que uma estrutura contemplando

Figura 10 – Fuso magnético com diferente níveis de discretização da estrutura helicoidal dos ímãs permanentes. Arcos com (a) 15 graus, (b) 30 graus, (c) 45 graus e (d) 60 graus. Obs. O tradutor foi ocultado para uma representação mais clara.



Fonte: Pakdelian e Toliyat (2012b).

Figura 11 – (a) Conjugado do rotor e (b) força do tradutor para fusos magnéticos com ímãs em diferentes graus de discretização.



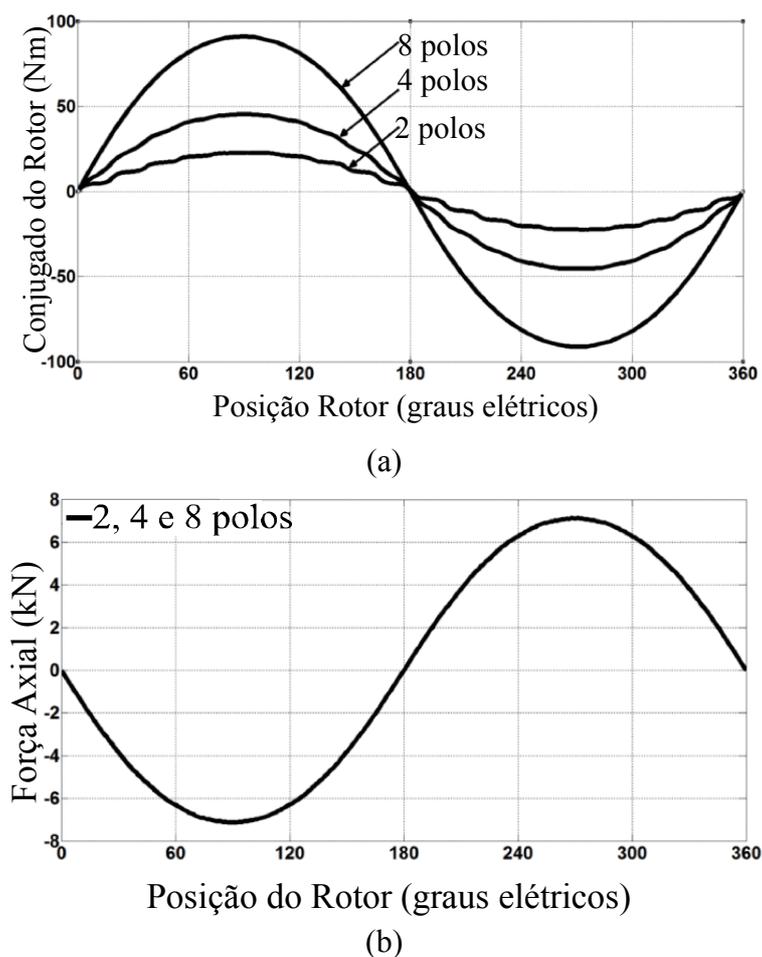
Fonte: Pakdelian e Toliyat (2012b).

arcos de 15° apresenta uma boa aproximação da hélice ideal. Isso significa que para cada volta de cada hélice 24 peças são necessárias.

Uma continuação do trabalho foi apresentada em (PAKDELIAN; FRANK; TOLIYAT, 2012). Neste trabalho o efeito do número de polos foi apresentado, assim como para o estudo da influência do grau de discretização dos ímãs permanentes, o modelo equivalente 2D não é suficiente. Portanto, novamente, o modelo 3D se faz necessário.

A Figura 12 apresenta os valores de conjugado obtidos através de simulações onde o translator é mantido estacionário e o rotor rotacionado um equivalente a 360° elétricos (dois passos polares). Ao passo que o número de polos aumenta, o valor de conjugado aumenta

Figura 12 – (a) Conjugado do rotor e (b) força do translator para 2, 4 e 8 polos.



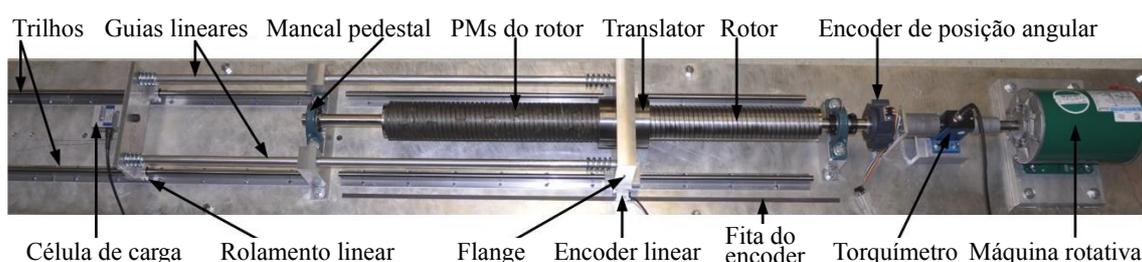
Fonte: (PAKDELIAN; FRANK; TOLIYAT, 2012).

proporcionalmente. No entanto, para cada dado número de polos, 360° elétricos corresponde a um diferente valor em deslocamento linear. Dessa forma, a taxa de transmissão de movimento linear em movimento rotacional decai inversamente proporcional com o número de polos. Sendo assim, para taxas de transmissão maiores, fusos magnéticos com menor número de polos são os mais indicados.

Apesar de inúmeras publicações da tecnologia em questão, dados experimentais só foram publicados anos depois em (PAKDELIAN; FRANK; TOLIYAT, 2015). Supreendentemente, o protótipo não apresentou nenhuma estrutura discretizada como avaliada no trabalho presente e também nos anteriores. Com a finalidade de facilitar a construção, ao invés de utilizarem ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro sinterizado, os quais apresentam alto magnetismo residual (de 1,0 a 1,45 T), alto produto energético máximo e são mecanicamente rígidos, o protótipo foi contemplado com ímãs compósitos (ímãs flexíveis pela adição de material aglutinante) apresentando magnetismo residual de 0,45 T (Figura 13), produto energético máximo mais baixo e mecanicamente menos rígidos.

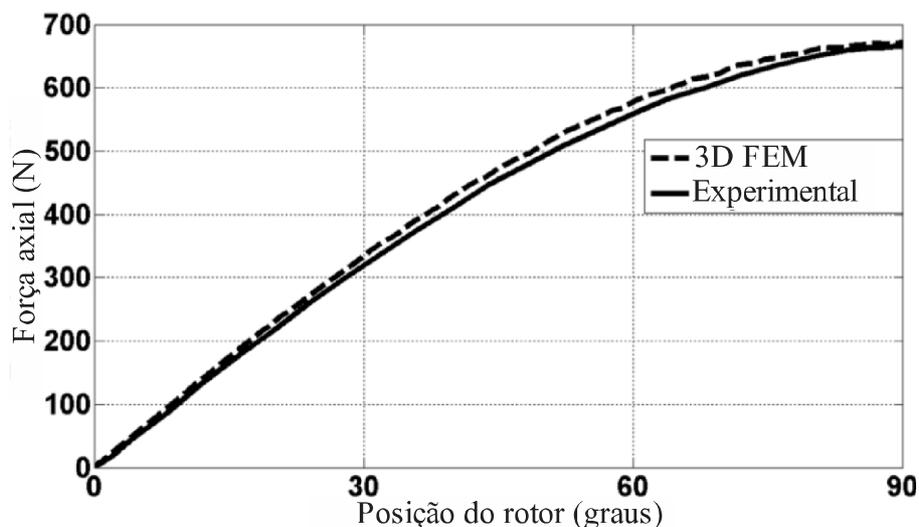
A força medida experimentalmente com pico de 670 N é apresentada na Figura 14. Com ímãs de 0,45 T de fluxo remanescente, a força máxima obtida via modelo de EF 3D utilizando o modelo discretizado foi de 675 N, 700 N no modelo axissimétrico 2D e 717 N no modelo analítico 2D.

Figura 13 – Protótipo construído com o emprego de ímãs compósitos apresentando 0,45 T de densidade de fluxo remanescente.



Fonte: (PAKDELIAN, 2014).

Figura 14 – Resultado experimental e numéricos (MEF 3D).



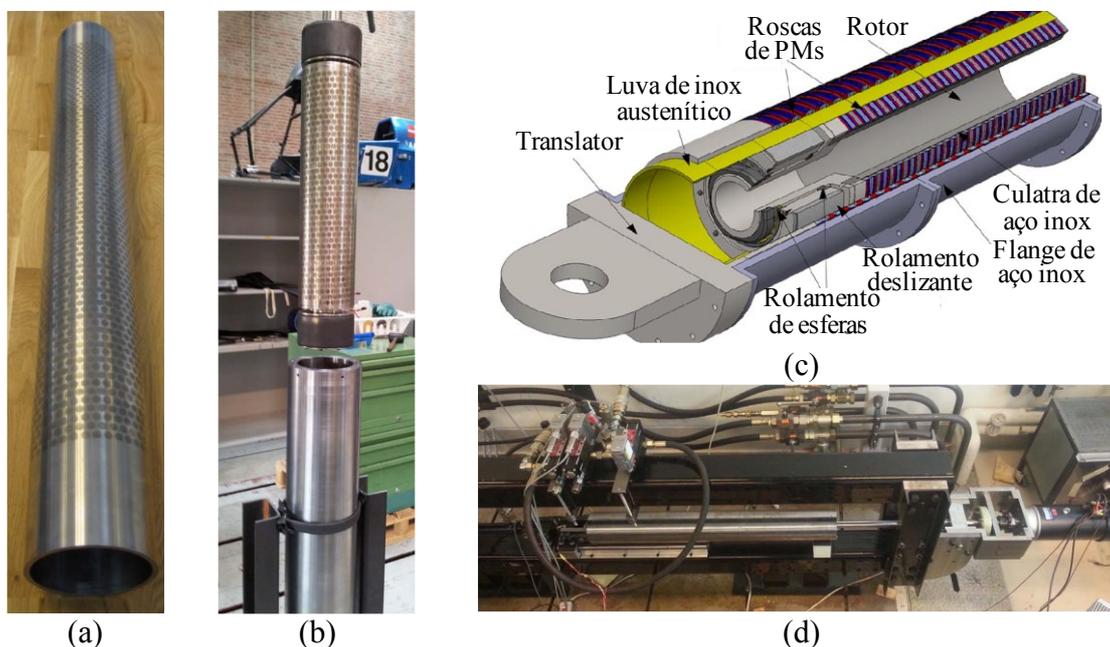
Fonte: (PAKDELIAN, 2014).

Outro grupo que contribuiu bastante com publicações acerca dos fusos magnéticos foi um grupo dinamarquês da Universidade de Aalborg. Pesquisas, sempre acompanhadas de protótipos e procedimentos experimentais, foram apresentadas nas áreas de suspensão veicular ativa e geração de energia através do movimento das ondas.

No trabalho de Holm et. al. (2013) um projeto de um fuso magnético com ímãs radialmente magnetizados para a geração de energia proveniente do movimento das ondas é apresentado. É proposto a utilização da força por unidade de área ativa como parâmetro de comparação e dimensionamento, ao invés da densidade de força. Essa metodologia é bastante utilizada em máquinas rotativas de ímãs permanentes. E, para o caso dos fusos magnéticos, essa abordagem não favorece topologias de longos comprimentos axiais e diâmetro reduzidos, tornando a comparação mais justa até mesmo quando confrontados com atuadores lineares tubulares. Diversos parâmetros construtivos são numericamente analisados para a construção de um fuso magnético de aproximadamente 500 kN de força.

Como prova de conceito e para confirmação experimental, um protótipo de 17 kN é construído. Novamente, não foram empregados ímãs perfeitamente helicoidais, e a solução

Figura 15 – Imagens do protótipo construído. (a) Detalhes da discretização dos ímãs do translator, (b) encaixe do rotor dentro do translator, (c) desenho em CAD do fuso magnético e (d) fuso magnético instalado na bancada de testes.



Fonte: (HOLM et al., 2013)

adotada foi o uso de ímãs permanentes disponíveis comercialmente em formato de discos dispostos de modo a formar uma estrutura próxima de uma hélice, Figura 15.

As perdas magnéticas e mecânicas do protótipo foram, posteriormente, investigadas numérica e experimentalmente em (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2015). A eficiência combinada esperada era de 95%, no entanto as perdas mecânicas e as perdas por corrente induzidas devido a forma como os ímãs foram discretizados – embutidos em material condutor – resultaram em uma eficiência abaixo do esperado. Essa eficiência pode ser melhorada com a utilização de ímãs helicoidais e rolamentos lineares de melhor performance, conforme discutido em (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2015)

De acordo com Berg, Holm e Rasmussen (2014b), a maioria dos veículos produzidos atualmente utilizam suspensão hidráulica ou pneumática, as quais são dispositivos passivos e que não são usados para regenerar energia. Portanto, inúmeras tecnologias alternativas com maior controlabilidade têm sido buscadas ao longo dos anos, onde os atuadores lineares de ímãs

permanentes (LPMM²) ficaram populares. Quando uma LPMM é empregada como amortecedor em um veículo, o corpo do veículo fica isolado das perturbações proveniente do perfil da estrada. No entanto, a baixa densidade de força oferecida por esses atuadores, quando comparados com as tecnologias corriqueiras, os tornam pouco competitivos. Outra desvantagem é devido aos elevados picos de corrente necessários quando o atuador é ativado em um momento de amortecimento. Conseqüentemente, um sistema extra é necessário para que ocorra o resfriamento das bobinas do atuador.

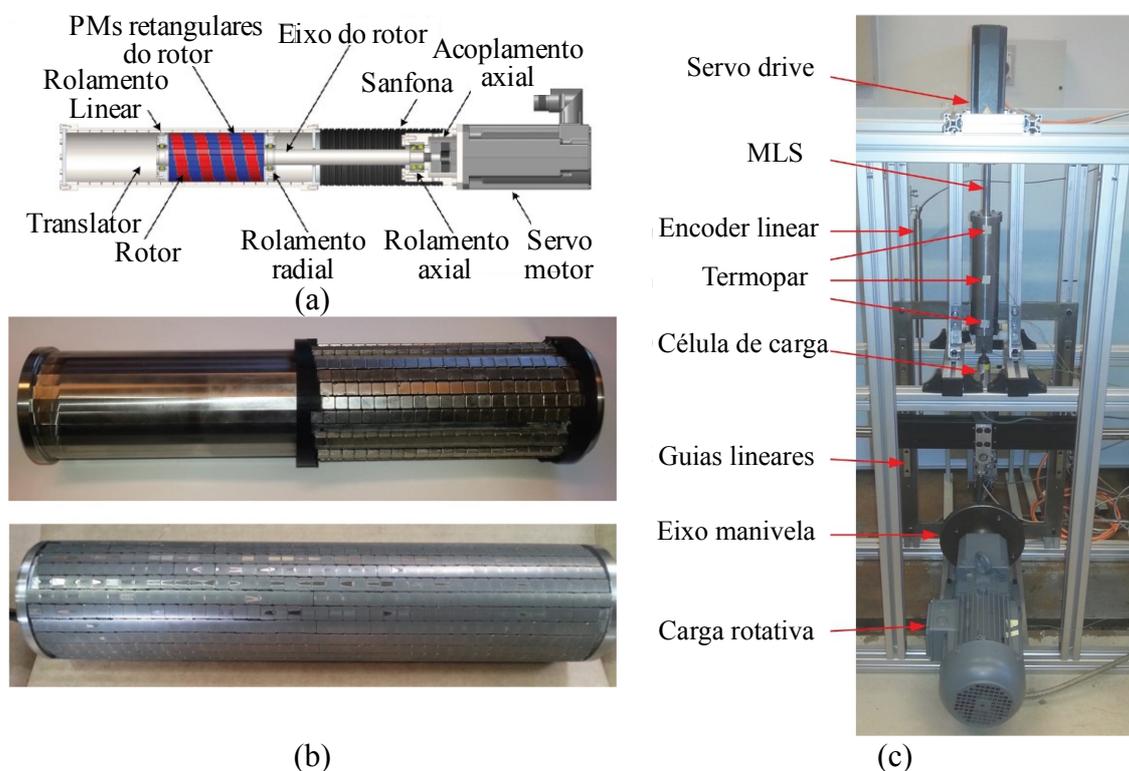
Visando apresentar um dispositivo capaz de unir a alta densidade de força apresentada por sistemas hidráulicos e manter a desejável capacidade de amortecer a vibração no corpo do carro de acordo com do perfil da via, um sistema combinado de um fuso magnético e um dispositivo rotativo controlável foi proposto.

O primeiro protótipo desenvolvido, denominado MLS v1.0, foi projetado para atender uma força axial máxima de 4 kN, Figura 16. Esse valor foi definido tendo como base dados experimentais em um carro. A Figura 17 (a) apresenta o modelo numérico 3D utilizado para projetar o protótipo. Além de um modelo 3D, um modelo axissimétrico 2D foi utilizado para estimar a força máxima produzida pelo fuso magnético. Como os ímãs utilizados na construção do protótipo são retangulares, Figura 16 (b), o modelo 2D não consegue representar tal característica. Sendo assim, é esperado uma diferença entre os valores de máxima força fornecidos por cada modelo. O modelo 3D fornece como resultado o valor de 3506 N (700 N a menos que o modelo 2D).

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios do protótipo v1.0 foram abaixo do previsto: apenas 2942 N, comparado com os 3506 N estimados pela análise numérica 3D. As possíveis causas acusadas para essa divergência entre os valores são: desmagnetização por

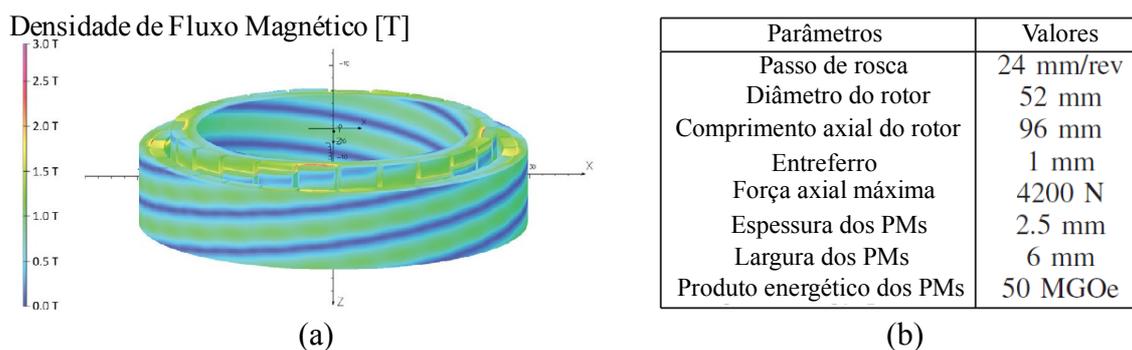
² LPMM – Sigla para “*Linear Permanent Magnet Machine*”

Figura 16 – Imagens do fuso protótipo v 1.0. (a) desenho em CAD do dispositivo, (b) processo de colagem dos ímãs do translator e (c) bancada de testes utilizada nos ensaios.



Fonte: (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014b)

Figura 17 – (a) modelo numérico 3D utilizado para estimar a força máxima do fuso magnético e (b) tabela com os parâmetros do protótipo.



Fonte: (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014b)

temperatura dos ímãs devido ao processo de usinagem realizado, Figura 16 (b). Outro problema apresentado foi o superaquecimento do protótipo quando operado em regime normal. Esse aquecimento foi investigado e um aquecimento devido ao processo de flambagem e torção do

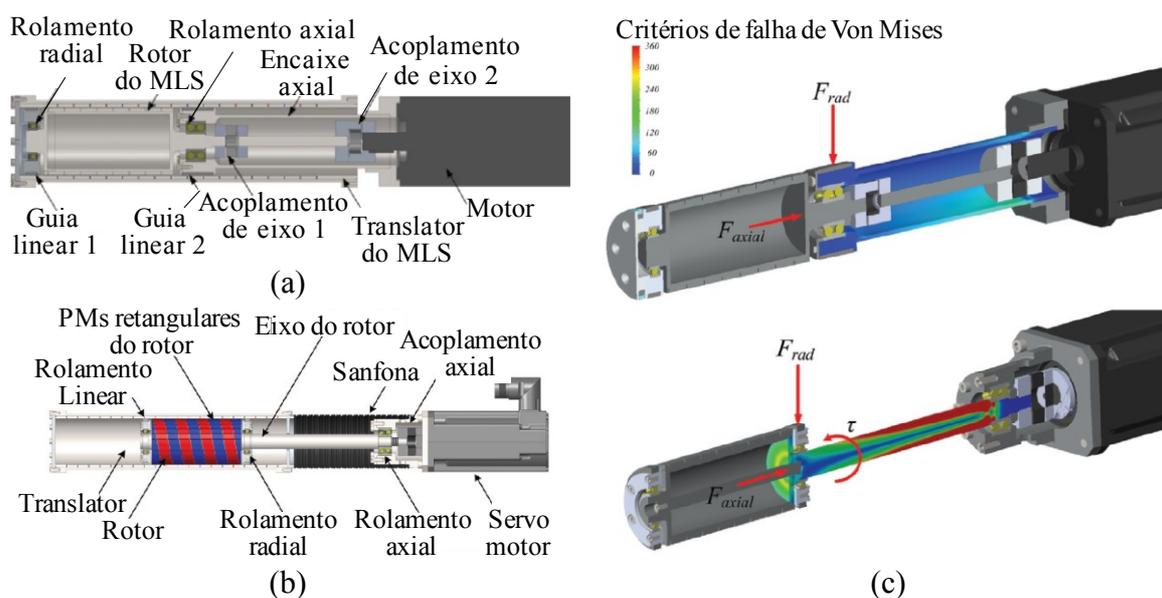
eixo do fuso magnético foi observado, gerando indesejáveis esforços normais nos rolamentos lineares.

Um novo protótipo foi desenvolvido em (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014a) com o objetivo de sanar as problemáticas anteriormente apresentadas. Duas principais mudanças foram efetuadas: modificação do eixo transmissão que conecta o motor ao rotor do fuso magnético; e aumento na robustez dos rolamentos lineares para suportar maiores esforços radiais. Uma clara redução nos esforços pode ser observada na Figura 18 (c) e as novas guias lineares apresentaram uma redução de 28% nas perdas por atrito.

A literatura carece de testes conclusivos da praticabilidade da utilização de fusos magnéticos em suspensões veiculares ativas, bem como de um algoritmo de controle visando melhorar a capacidade de regeneração de energia e conforto dos passageiros.

Outro trabalho que merece destaque foi publicado por Ling et. al. (2018). Neste trabalho um fuso magnético radialmente magnetizado empregando ímãs discretizados é numericamente avaliado e comparado com resultados analíticos e experimentais. Apesar de estudos similares

Figura 18 – Comparativo dos protótipos v1.0 e v1.5. (a) desenho em CAD da v1.5, (b) desenho em CAD da v1.0 e (c) comparativo dos esforços gerado na estrutura dos fusos magnéticos.

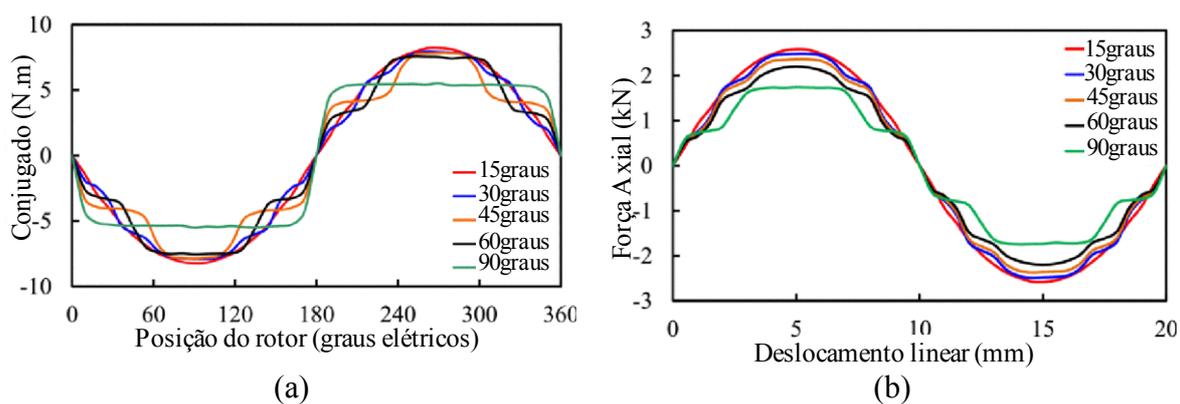


Fonte: (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014a)

já terem sido realizados no passado, este trabalho se destaca pela qualidade da discretização apresentada.

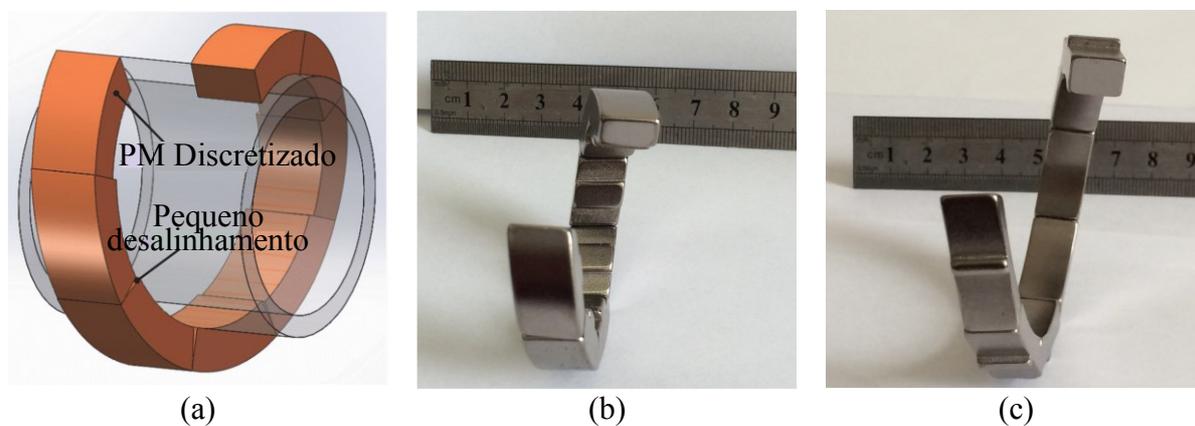
Similar estudo relacionado à influência que a discretização das estruturas helicoidais tem na força máxima produzida pelo dispositivo foi apresentado em (PAKDELIAN; TOLIYAT, 2012b). Os resultados obtidos através de simulações utilizando um modelo 3D foram também realizados por Ling et. al. (2018), e os resultados estão dispostos na Figura 19, confirmando que uma boa aproximação de uma hélice ideal é alcançada com uma estrutura discretizada em 24 partes.

Figura 19 – Resultados do estudo da influência da discretização das estruturas helicoidais (a) conjugado e (b) força axial.



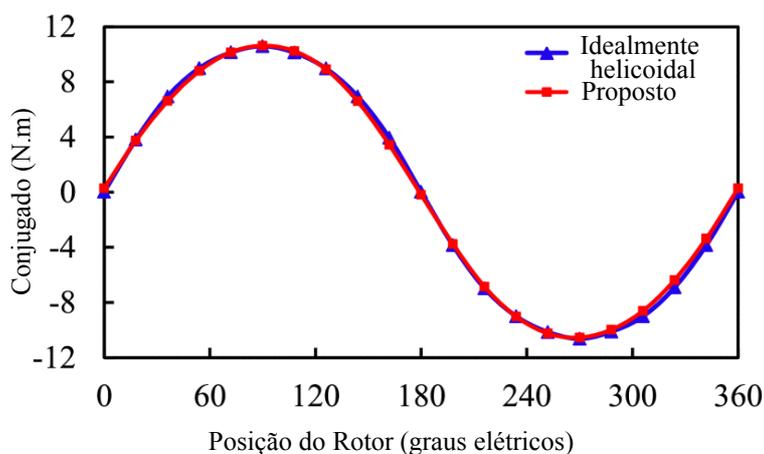
Fonte: (LING et al., 2018)

Figura 20 – Formado dos ímãs propostos. (a) desenho em CAD, (b) ímãs do rotor e (c) ímãs do translator.



Fonte: (LING et al., 2018)

Figura 21 – Comparação dos resultados numéricos entre a ímãs idealmente helicoidais e discretização proposta.



Fonte: (LING et al., 2018)

Um novo formato para os ímãs segmentados que consegue se aproximar melhor de uma estrutura helicoidal ideal foi proposto, Figura 20. A comparação entre os resultados obtidos via MEF de um modelo 3D contendo ímãs idealmente helicoidais e os resultados obtidos da simulação utilizando os ímãs propostos estão apresentados na Figura 21.

2.2.2 Fuso magnético com arranjo de Halbach – HMLS³

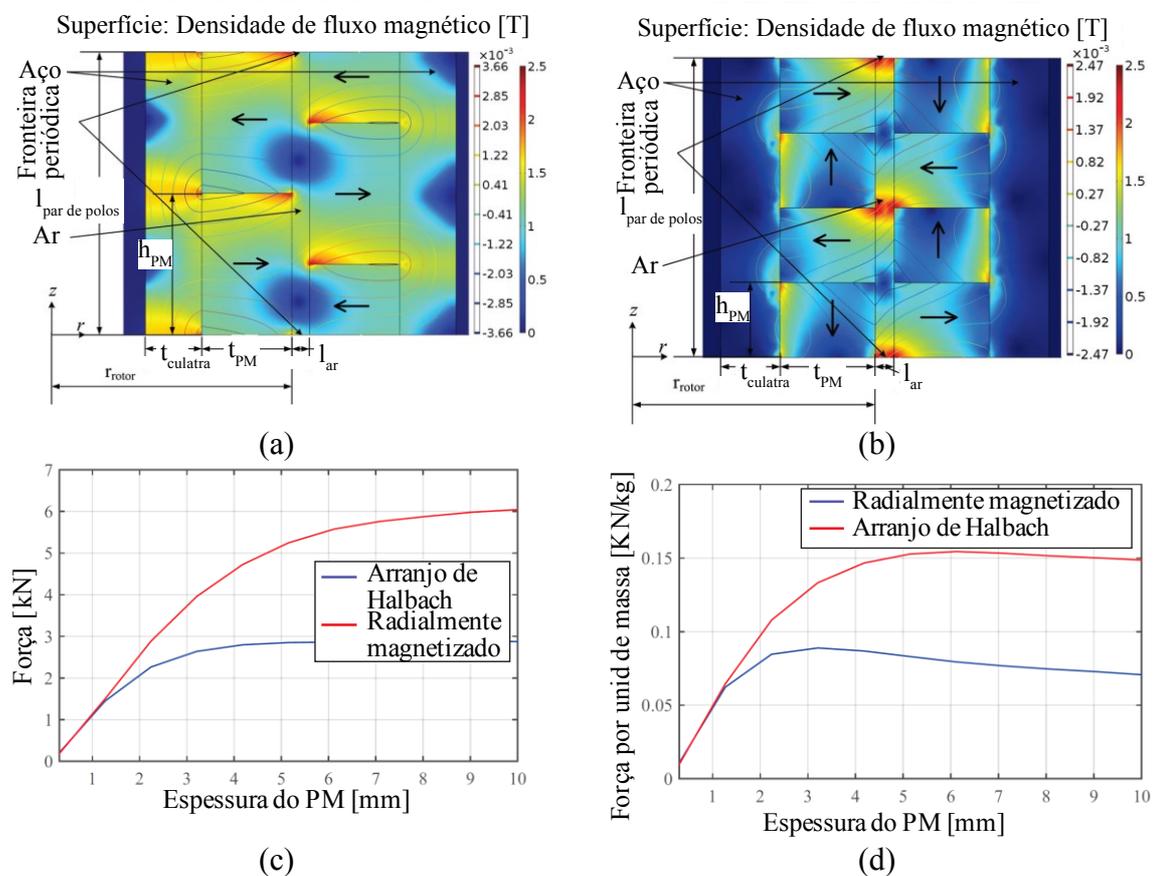
De um modo geral, a utilização de arranjo de Halbach (AH) é sempre investigada com a finalidade de aumentar a concentração de fluxo magnético em regiões de interesse, reduzir o volume das culatras de material ferromagnético macio ou mesmo eliminá-las e, dessa forma, com o mesmo volume de ímãs alcançar estruturas com maior densidade de força. Ou, por outro lado, alcançar resultados similares com estruturas mais compactas. Algumas tentativas de utilização de arranjo de Halbach em fusos magnéticos foram efetuadas. Uma das maiores dificuldades, do ponto de vista construtivo, é a necessidade da confecção de uma maior quantidade de peças de ímãs permanentes devido à característica do arranjo de Halbach. Do ponto de vista magnético, desmagnetização parece ser um fator recorrente nos dispositivos estudados, conforme apresentando no decorrer desta seção.

³ HMLS – Sigla para “Halbach Magnetized Magnetic Lead Screw”

No trabalho apresentado por Holm, Berg e Rasmussen (2015) um fuso magnético com arranjo de Halbach foi construído, e os resultados experimentais apresentaram força axial máxima 12% menor do que as obtidas via simulações de elementos finitos em um modelo 3D equivalente. O motivo da redução na força foi a desmagnetização dos ímãs permanentes devido às altas densidades de fluxo magnético fornecidas pelo arranjo de Halbach (AH) em diferentes pontos de operação.

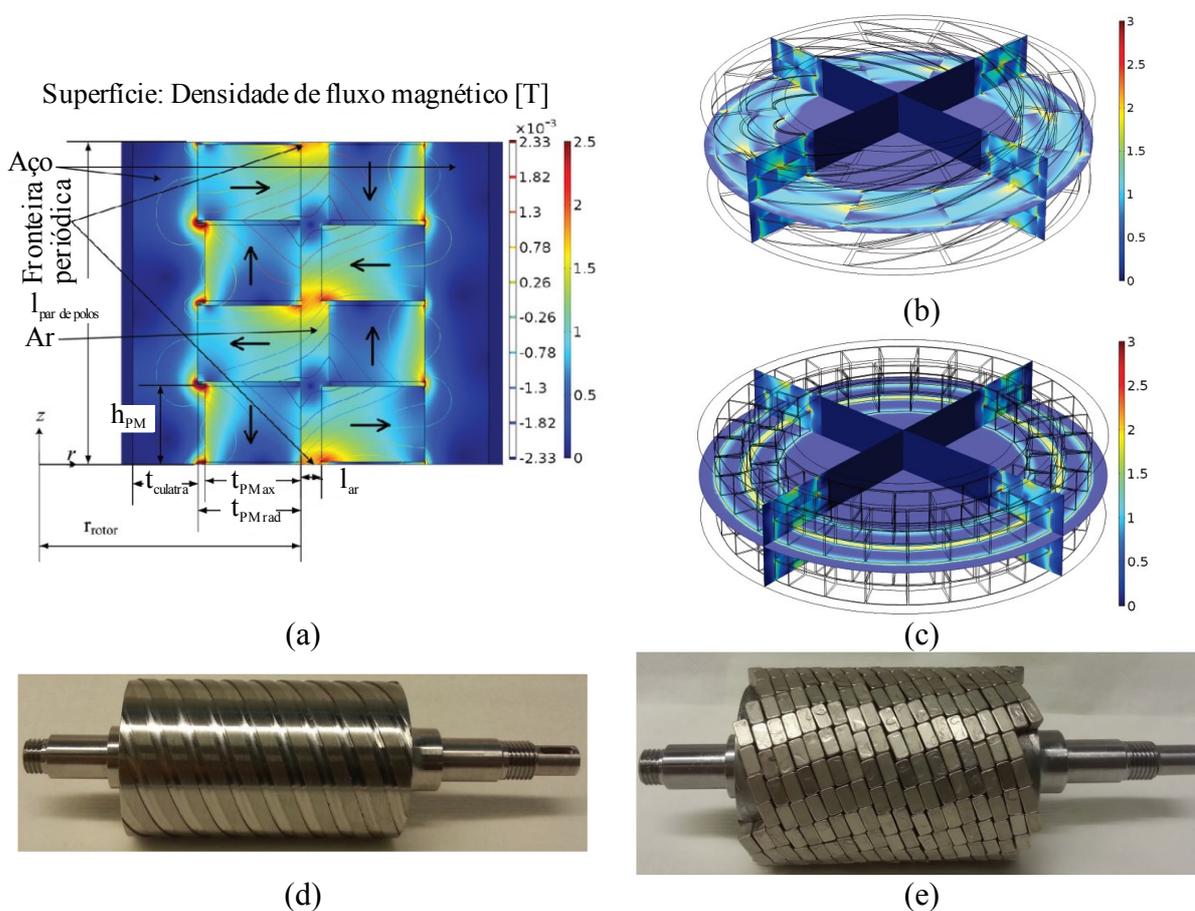
Um comparativo entre dois modelos de EF 2D é realizado, um contendo ímãs permanentes radialmente magnetizados, Figura 22 (a), e outro com o arranjo de Halbach proposto, Figura 22 (b). Fica evidente que a densidade de fluxo no entreferro é muito maior

Figura 22 – Resultados numéricos de dois modelos 2D via EF. (a) Densidade e linhas de fluxo magnético para o modelo com ímãs radialmente magnetizados, (b) densidade e linhas de fluxo magnético para o modelo com ímãs arranjo de Halbach, (c) comparativo da força obtida e (d) comparativo da densidade de força alcançada.



Fonte: (HOLM; BERG; RASMUSSEN, 2015).

Figura 23 – (a) modelo de EF 2D, (b) modelo de EF 3D sem discretização, (c) modelo 3D com discretização, (d) rotor sem os ímãs colados e (e) rotor com os ímãs colados.



Fonte: (HOLM; BERG; RASMUSSEN, 2015).

para a topologia empregando AH. Além disso, a densidade de fluxo na culatra do dispositivo com AH é muito menor, possibilitando uma redução em sua espessura e, conseqüentemente, uma redução na inércia do dispositivo. Resultados numéricos confirmando tal proposição estão dispostos na Figura 22 (c) e (d).

Os resultados numéricos, obtidos através de simulações de elementos finitos no modelo 2D, Figura 23 (a), e nos modelos 3D, Figura 23 (b) e (c), estão dispostos na segunda coluna da Tabela 1. Assumindo uma tolerância de 0,1 mm no processo de fabricação, o valor estimado de força para o protótipo construído foi de 3180 N, valor obtido desconsiderando o efeito da desmagnetização.

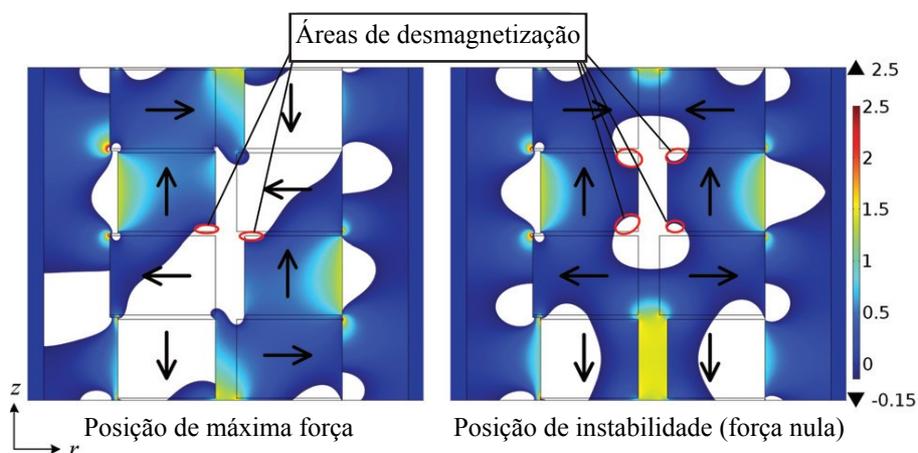
Tabela 1 – Resultados para a máxima força axial obtida nos diferentes modelos.

| Descrição dos modelos | Força máxima (sem desmagnetização) | Força máxima (com desmagnetização) |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Axissimétrico 2D | 3898 N | 3150 N |
| 3D sem discretização | 3637 N | - |
| 3D com discretização | 3426 N | - |
| Força estimada para o protótipo | 3180 N | 2570 N |
| Dados experimentais | - | 2800 N |

Fonte: Adaptada de Holm, Berg e Rasmussen (2015)

O estudo da desmagnetização foi realizado somente no modelo 2D. Estimou-se que aproximadamente 10% do volume dos ímãs axialmente magnetizados sofreria desmagnetização, conforme representado pelas regiões circuladas na Figura 24. Resultando em uma força axial de aproximadamente 19% menor. Atribuindo esta mesma proporção de desmagnetização para o modelo 3D resultaria em 2570 N. No entanto, a desmagnetização no modelo 2D costuma ser maior, o que pode explicar os resultados experimentais mensurados terem sido um pouco maiores (2800 N) do que os estimados pelo modelo 3D multiplicado pelo fator de desmagnetização obtido no modelo 2D.

Figura 24 – Representação das áreas desmagnetizadas.



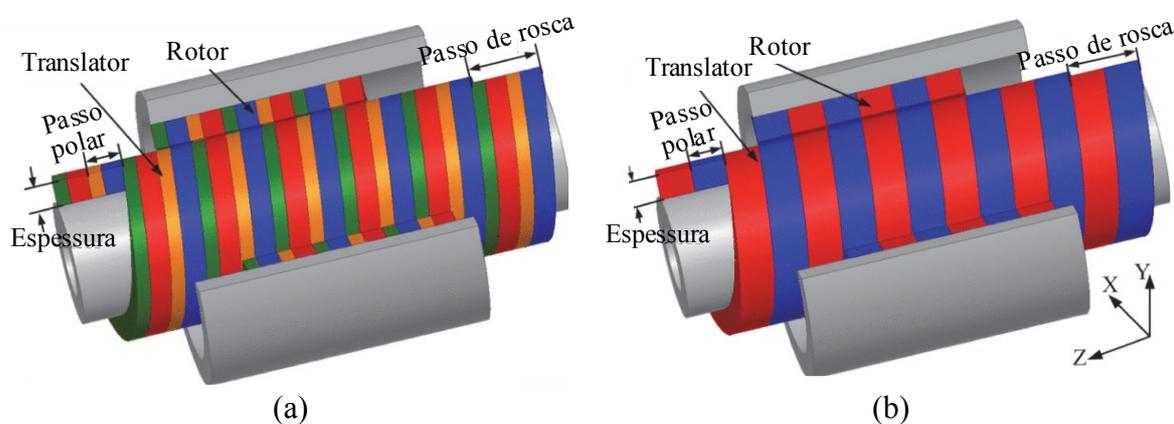
Fonte: (HOLM; BERG; RASMUSSEN, 2015).

Para melhor investigar a real existência de desmagnetização, um simples teste foi realizado com duas arranjos de Halbach idênticos colados a blocos de ferro. Os arranjos de Halbach foram alinhados e aproximados em etapas com as distâncias de 1,0 mm, 0,5 mm e 0 mm. Antes e depois de cada estágio de alinhamento a força entre os arranjos de Halbach e um bloco de ferro foi medida. Após o final do ensaio foi apreciada uma redução entre 5 e 20% da força de atração. Apesar dos testes não serem capazes de afirmar com precisão o percentual de redução, a desmagnetização é confirmada.

Outro fuso magnético utilizando arranjo Halbach é proposto em (JI et al., 2015). A ideia do trabalho é utilizar a característica de alta densidade de força em conjunto com AH para confecção de um dispositivo compacto capaz de operar como coração artificial. O estudo foi conduzido integralmente em *software* de elementos finitos e as topologias utilizadas estão dispostas na Figura 25.

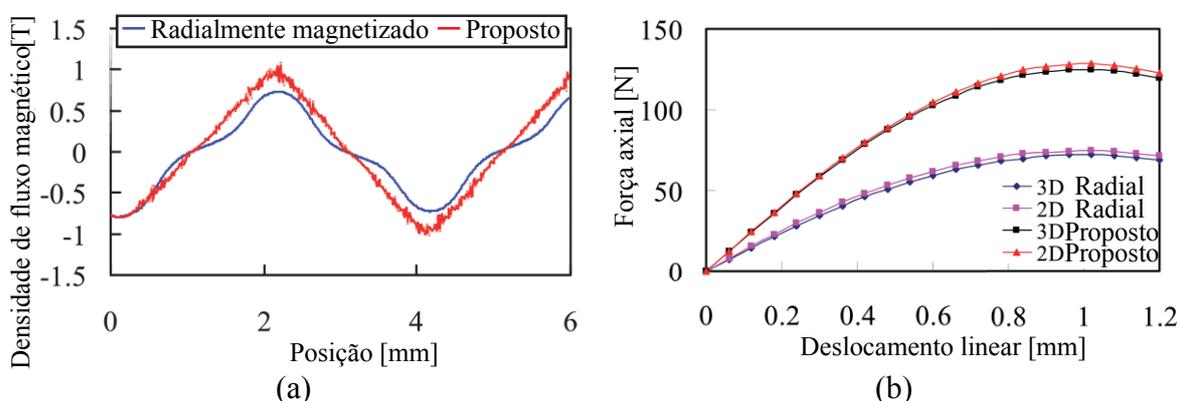
Além dos modelos 3D, modelos 2D axissimétricos também foram empregados para acelerar o processo de análise paramétrica. Os resultados tiveram bom grau de concordância, conforme mostrado na Figura 26 (b).

Figura 25 – Modelos 3D para diferentes magnetizações dos ímãs permanentes (a) arranjo de Halbach e (b) radialmente magnetizados.



Fonte: (JI et al., 2015)

Figura 26 – Comparação entre os resultados numéricos obtidos para as duas topologias. (a) densidade de fluxo no entreferro e (b) força axial.



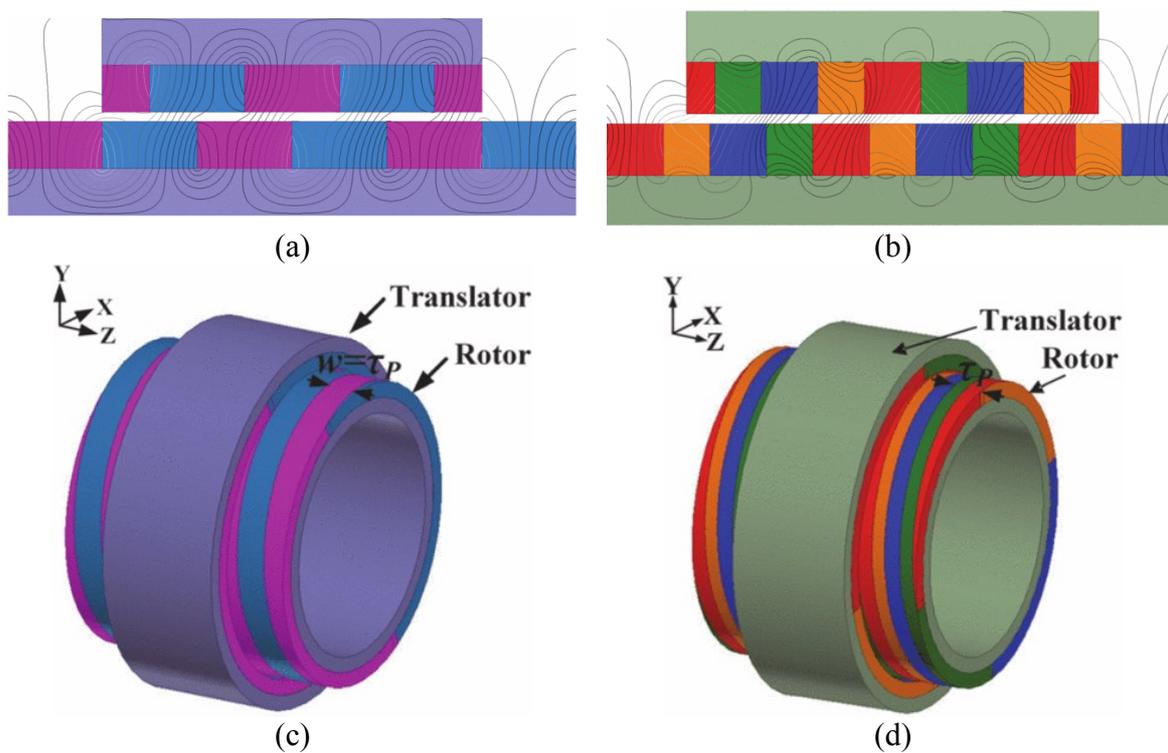
Fonte: (JI et al., 2015)

A força máxima obtida no modelo com arranjo de Halbach foi 72,2% mais alta e a densidade de fluxo no entreferro alcançou 0,73 T para a topologia com ímãs radialmente magnetizados e 1,08 T para aquela com AH. É importante notar que neste estudo a desmagnetização não foi avaliada.

O trabalho mais recente encontrado na literatura contemplando arranjo de Halbach foi publicado por Jenney e Pakdelian (2018). Além dos dados numéricos de simulações via MEF, um protótipo foi construído e ensaiado. Um ponto bastante interessante deste trabalho é que o grupo que o desenvolveu já havia construído outro protótipo de um fuso magnético com ímãs radialmente magnetizados (RMT), Figura 13. Visando o caráter comparativo da pesquisa, o novo protótipo do fuso magnético com arranjo de Halbach (HMT) desenvolvido segue os mesmos parâmetros dimensionais do protótipo anterior.

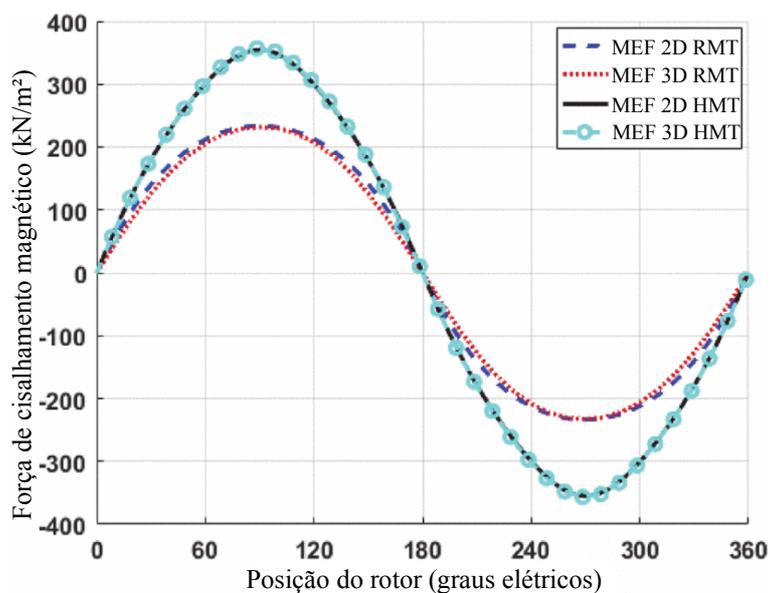
As simulações em *software* de análise por elementos finitos foram realizadas com os modelos 2D axissimétrico e 3D ilustrados na Figura 27. Os resultados das simulações 2D e 3D disponibilizaram valores muito próximos, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 27 – Modelos numéricos utilizados nas simulações de EF. (a) 2D axissimétrico RMT, (b) 2D axissimétrico HMT, (c) 3D RMT e (d) 3D HMT



Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

Figura 28 – Comparação dos resultados obtidos das simulações para os diferentes modelos apresentados na Figura 27.



Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

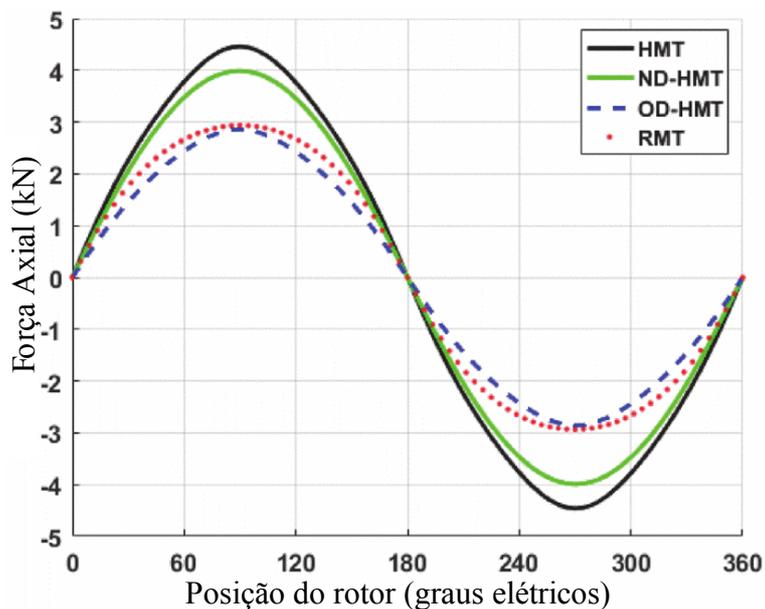
Além de assegurar a validação do modelo 2D axissimétrico, a Figura 28 também evidencia que a topologia contendo o arranjo de Halbach atinge valores de tensão de cisalhamento magnético⁴ e força axial máxima (234 kN/m² e 2,94 kN, respectivamente) cerca de 50% maiores do que a topologia com ímãs radialmente magnetizados (357 kN/m² e 4,5 kN). Esses valores são referentes a um fuso magnético com os mesmos parâmetros do protótipo anterior, no entanto, valores maiores ainda (389 kN/m²) podem ser alcançados, se os parâmetros forem otimizados. O melhor desempenho alcançado pela topologia HMT pode ser explicado comparando linhas de fluxo apresentadas nas Figura 27 (a) e (b). Além de apresentar menor fluxo disperso, menos linhas estão presentes na culatra do dispositivo, evitando saturação do material.

Devido aos altos valores de densidade de fluxo magnético alcançados com a utilização do arranjo de Halbach, um estudo acerca da desmagnetização dos ímãs é realizado. Para isso, três níveis de desmagnetização para o HMT foram simulados e comparados com o RMT: HMT saudável (HMT); HMT desmagnetizado em operação normal (ND-HMT) e HMT desmagnetizado operando sobrecarregado (OD-HMT). Os resultados estão na Figura 29.

Diversas conclusões podem ser feitas a partir dos resultados expostos na Figura 30 independente do fuso magnético com arranjo de Halbach ser submetido a operações em sobrecarga, um pequeno nível de desmagnetização é esperado; o HMT com desmagnetização normal (ND-HMT) apresentou força máxima de 4 kN (11% menor do que o HMT saudável); Quando submetido a situações repetitivas de sobrecarga, o HMT reduziu sua força axial máxima para 2,9 kN e cisalhamento magnético para 228 kN/m², o que é 3% menor do que a topologia com ímãs magnetizados axialmente.

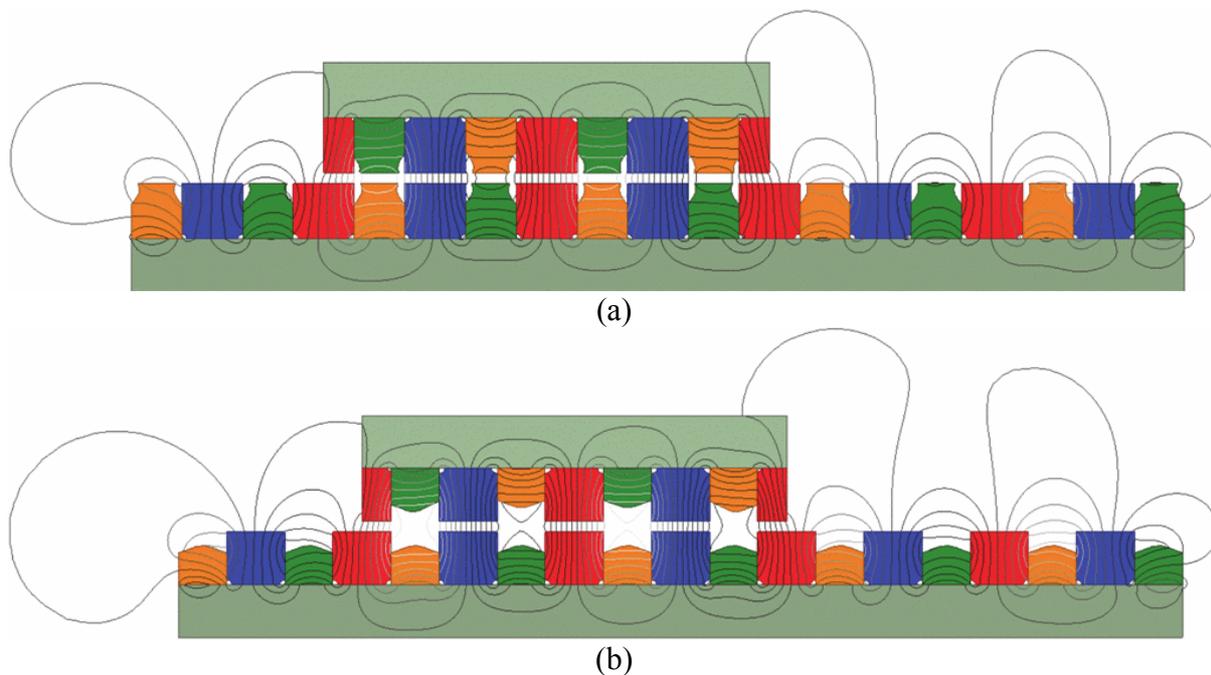
⁴ Termo traduzido do inglês “*shear stress force*”. É a relação da força máxima produzida por um dispositivo e a área ativa do entreferro.

Figura 29 – Modelos 3D para simulação numérica. (a) com ímãs radialmente magnetizados (RMT) e (b) com arranjo de Halbach (HMT).



Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

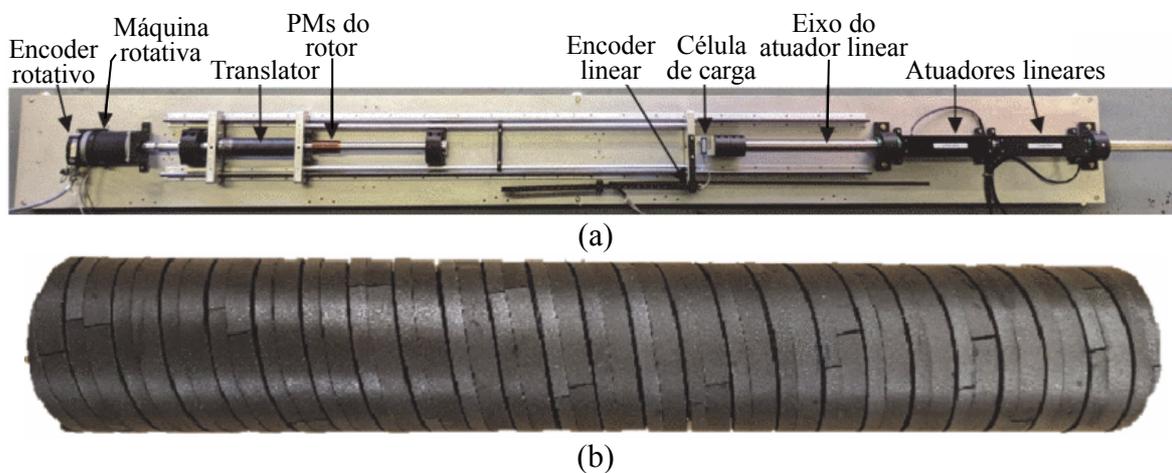
Figura 30 – Modelo 2D axissimétrico considerando a desmagnetização. (a) operação em regime normal e (b) operação com sobrecarga.



Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

Para confrontar os resultados numéricos, o protótipo da Figura 31 foi construído e ensaiado. Assim como no protótipo do RMT, foram utilizados ímãs flexíveis para facilitar o

Figura 31 – Protótipo do fuso magnético com arranjo de Halbach. (a) Fuso magnético montado na bancada de testes e (b) detalhe do arranjo de Halbach colados no translator formado por ímãs flexíveis com 0,47 T de fluxo remanescente.

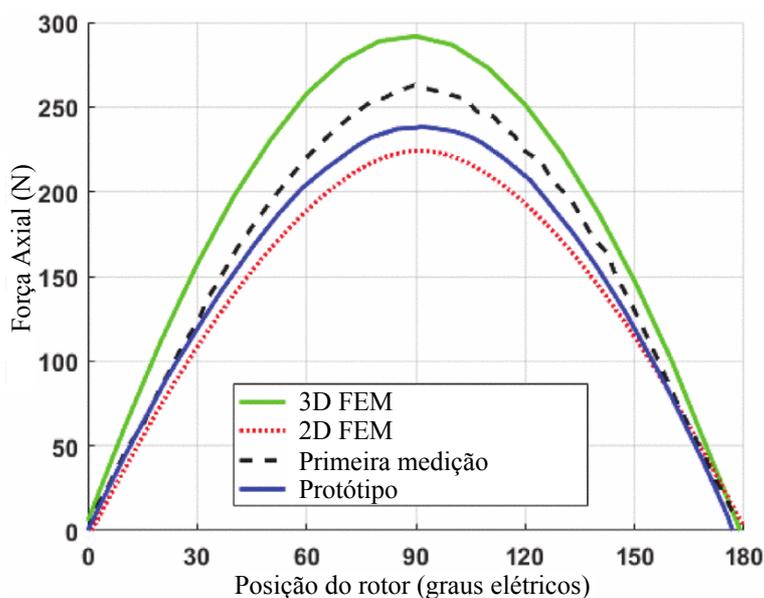


Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

processo de construção das estruturas helicoidais necessárias.

A primeira medição dos dados foi efetuada após o dispositivo já ter sido sobrecarregado algumas vezes – forçar o dispositivo até romper o acoplamento magnético entre rotor e translator, sujeitando-o a desmagnetização, conforme explicado por Jenny e Pakdelian (2018).

Figura 32 – Protótipo do fuso magnético com arranjo de Halbach. (a) Fuso magnético montado na bancada de testes e (b) detalhe do arranjo de Halbach colados no translator formado por ímãs flexíveis com 0,47 T de fluxo remanescente.



Fonte: Adaptada de Jenny e Pakdelian (2018)

Isso pode explicar a diferença de 7% entre a força medida de 269 N e o simulado via MEF 3D de 291 N. Após vários testes e ciclos de sobrecarga, o dispositivo apresentou força de 244 N (16% menor que o simulado via MEF 3D).

Jenny e Pakdelian (2018) demonstraram que a topologia com arranjo de Halbach tem potencial para atingir níveis de força 65% mais altos do que a topologia com ímãs radialmente magnetizados. No entanto, esta topologia sofre desmagnetização até mesmo quando operado em regime normal, reduzindo a força de cisalhamento magnético em aproximadamente 10%. E em casos de repetidas operações com sobrecarga, a desmagnetização pode resultar na diminuição da força de cisalhamento magnético por volta de 36%, o que representa 3% menos força de cisalhamento magnético do que a topologia com ímãs radialmente magnetizados.

2.2.3 Fuso magnético axialmente magnetizado– AMLS⁵

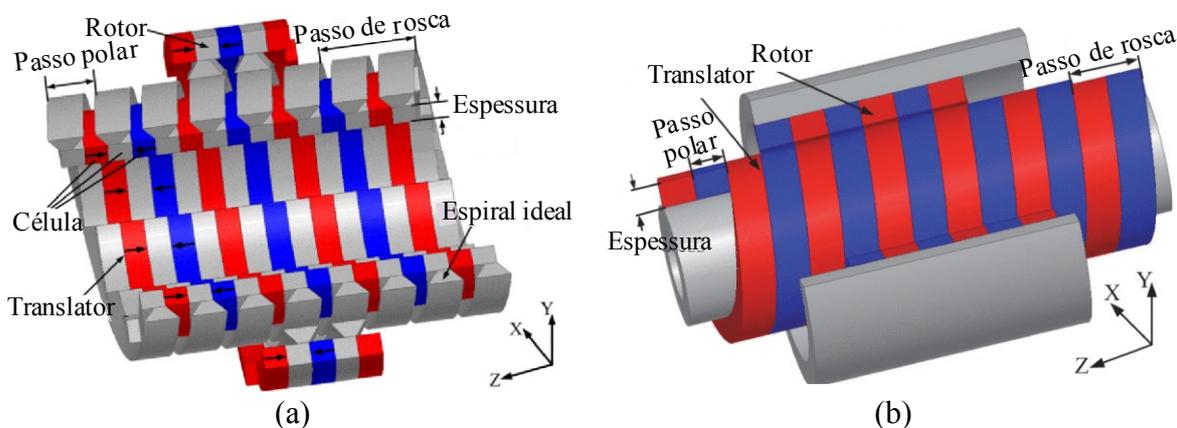
Possivelmente por apresentarem menor densidade de força, topologias de fusos magnéticos com ímãs axialmente magnetizados foram as menos exploradas até o presente, e poucos trabalhos estão disponíveis na literatura.

Com a proposta de simplificar o processo de confecção dos fusos magnéticos, o trabalho apresentado por Ling et. al. (2016) é um dos poucos que relatam essa topologia. Novamente, a dificuldade para produzir ímãs idealmente helicoidais foi substituída por uma alternativa de discretização dos ímãs. O diferencial do trabalho de Ling et. al. (2016) está na utilização de uma estrutura helicoidal sobrepondo a estrutura discretizada e ímãs axialmente magnetizados.

A Figura 33 (b) ilustra um fuso magnético radialmente magnetizado, enquanto que a Figura 33 (a) apresenta a topologia proposta por Ling et. al. (2016), com ímãs permanentes axialmente magnetizados. Além dos PMs axialmente magnetizados, estruturas para a concentração de fluxo são utilizadas. A proposta de Ling et. al. (2016) é a utilização de uma estrutura idealmente helicoidal encobrindo as estruturas discretizadas, aqui denominada espiral

⁵ AMLS – Sigla para “*Axially Magnetized Magnetic Lead Screw*”

Figura 33 – Comparação de topologias de fusos magnéticos. (a) topologia proposta e (b) radialmente magnetizado.

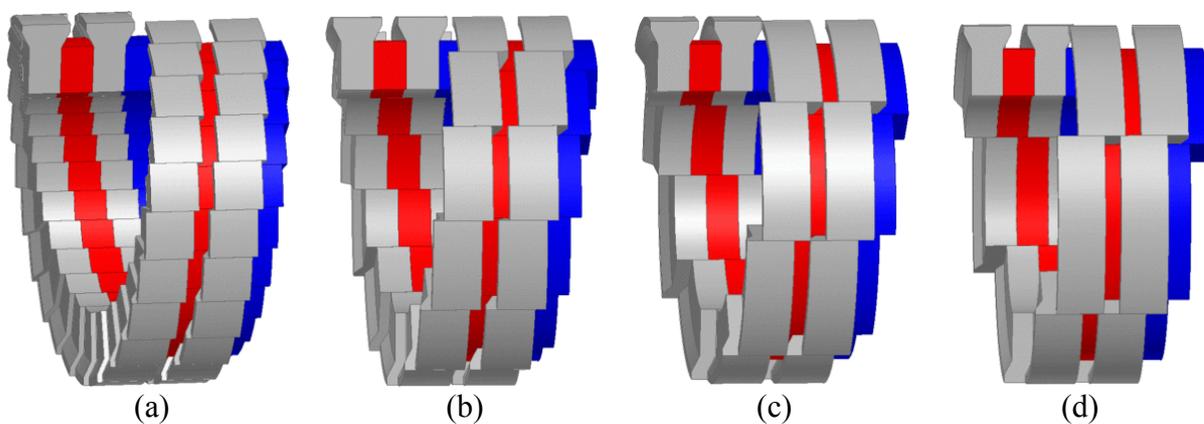


Fonte: (LING et al., 2016)

ideal. Essa proposição tem por finalidade a produção de um fluxo resultante de formato helicoidal.

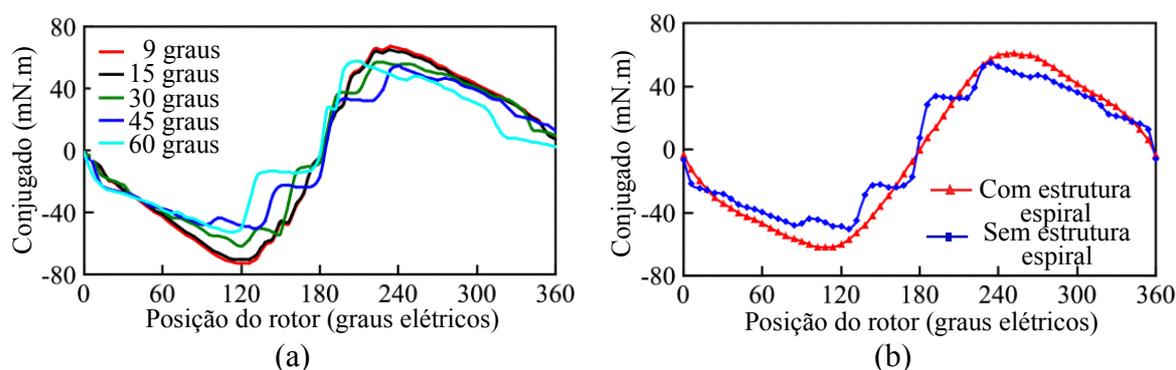
Para verificar a eficácia de adição das propostas estruturas espirais, foram simulados, via MEF, fusos magnéticos sem a adição da espiral e com diferentes graus de discretização, Figura 34. Os resultados estão dispostos na Figura 35 (a), onde fica claro o perfil não linear do conjugado resultante das estruturas não idealmente helicoidais. Além disso, é possível verificar que quanto maior for o grau de discretização, mais suave se torna o perfil do conjugado. A eficácia da adição da espiral é verificada através dos resultados dispostos na Figura 35 (b),

Figura 34 – Fuso magnético com estrutura apresentando diferentes níveis de discretização e sem adição da espiral. (a) 15°, (b) 30°, (c) 45° e (d) 60°.



Fonte: Adaptada de (LING et al., 2016).

Figura 35 – Comparação de topologias de fusos magnéticos. (a) topologia proposta e (b) radialmente magnetizado.



Fonte: (LING et al., 2016)

onde o conjugado resultante de duas estruturas discretizadas com segmentos de 45° , uma com a adição da espiral e outra sem a adição, são comparados. O conjugado resultante é consideravelmente suavizado quando a estrutura proposta é utilizada. É muito importante reduzir as ondulações e manter constante a transmissão de conjugado e força na maioria das possíveis aplicações para essa tecnologia.

2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

O capítulo 2 foi composto por um breve histórico sobre os fusos magnéticos desde o surgimento até o atual estado da arte. Posteriormente, foi proposta uma classificação para os fusos magnéticos baseando-se no sentido de magnetização dos ímãs permanentes utilizados (axial, radial ou arranjo de Halbach). As principais características para cada topologia de fuso magnético foram apresentadas.

Através da revisão bibliográfica, notou-se uma grande disparidade no número de trabalhos relatando cada uma das topologias. Os fusos magnéticos radialmente magnetizados, além de possuírem um sólido embasamento teórico (analítico e numérico) também apresentam uma série de protótipos construídos e experimentados. Considerável quantidade de material teórico e experimental é encontrado sobre fusos magnéticos contendo arranjo de Halbach. No

entanto, é notada uma carência de trabalhos relacionados aos fusos magnéticos com ímãs axialmente magnetizados e nenhum – por conhecimento do autor – protótipo construído. Desta carência fortaleceu-se a escolha do tema principal desta dissertação, o projeto e desenvolvimento de um protótipo para ser experimentalmente ensaiado.

Do ponto de vista construtivo, o principal desafio para a fabricação de fusos magnéticos, independente da topologia empregada, está relacionado a confecção de ímãs permanentes com geometria idealmente helicoidal. Dentre as soluções adotadas para contornar essa dificuldade, a mais popular é o emprego de estruturas discretizadas aproximando-se de uma hélice ideal.

3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO FUSO MAGNÉTICO

Este capítulo é reservado a apresentação da estrutura do fuso magnético de relutância variável e ao seu princípio de funcionamento. Os estudos referentes a escolha dos parâmetros construtivos serão apresentados em capítulos seguintes, dessa forma, este capítulo é fundamentado em uma apresentação de caráter mais qualitativo do que quantitativo.

Um modelo genérico de um fuso magnético de relutância variada é apresentado na Figura 39. É válido esclarecer que este fuso magnético não possui as dimensões nem mesmo a estrutura do protótipo construído nesta dissertação. A única finalidade dele é auxiliar com a explanação do princípio de funcionamento dos fusos magnéticos.

3.1 ANALOGIA COM UM FUSO MECÂNICO

Uma maneira mais simples de compreender a estrutura e o princípio de funcionamento dos fusos magnéticos é através de uma analogia com fusos mecânicos ou, até mesmo, com parafusos tradicionais, os quais costumam ser mais familiares e de mais fácil entendimento para a maioria do público leitor.

A Figura 36 ilustra um fuso mecânico composto por duas estruturas principais, uma castanha e um fuso. A castanha e o fuso dos fusos mecânicos são, respectivamente, análogos ao translator e ao rotor dos fusos magnéticos. Em um fuso mecânico, quando o fuso é rotacionado, o contato mecânico entre os fios de rosca das duas partes (castanha e fuso) resulta em um deslocamento linear na castanha. Similar efeito é observado em fusos magnéticos, em que girando o rotor, um deslocamento linear é gerado no translator, no entanto, ao invés da transmissão do movimento ser ocasionada por contato mecânico entre as partes, este é realizado integralmente por interação de campos magnéticos.

Figura 36 – Tradicional fuso mecânico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

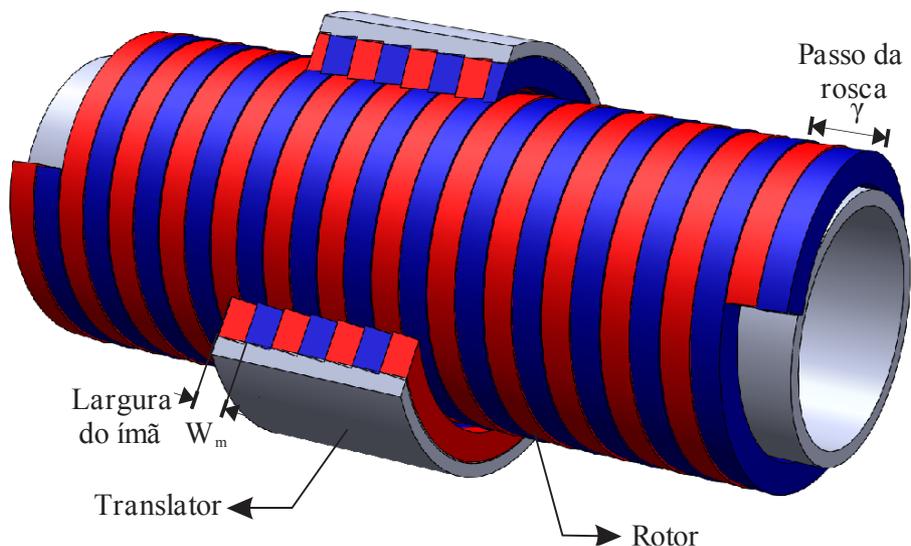
Um conceito aplicado em fusos mecânicos e que pode auxiliar o entendimento da relação de transmissão dos fusos magnéticos, está relacionado ao número de entradas/fios de rosca. A maioria dos fusos mecânicos possuem somente uma entrada/fio de rosca. No entanto, existem configurações que apresentam diferentes números de fios de rosca. Esse parâmetro está diretamente associado à taxa de conversão de movimento linear em rotativo e vice-versa. A Figura 37 ilustra três fusos contendo diferentes números de fios de rosca. A figura bem da esquerda, com um único fio de rosca, possui o avanço igual ao passo, ou seja, para uma volta completa do fuso, um deslocamento igual à distância entre dois fios de rosca é realizado. A medida que o número de fios aumenta, o avanço linear por volta do fuso também aumenta. Dessa forma, para um mesmo deslocamento angular do fuso, maior será o deslocamento linear da castanha com configurações contendo mais fios de rosca. Essa relação pode ser expressa por

$$A_{\text{avanço}} = P_{\text{asso}} N_{\text{fios}} \quad (1)$$

Evidentemente, quanto maior for o número de fios, mais rápido será o deslocamento linear.

A Figura 38 demonstra um fuso magnético conceitual de dois polos e ímãs permanentes radialmente magnetizados. Este fuso é composto por duas estruturas principais, um rotor e um

Figura 38 – Fuso magnético radialmente magnetizado conceitual.



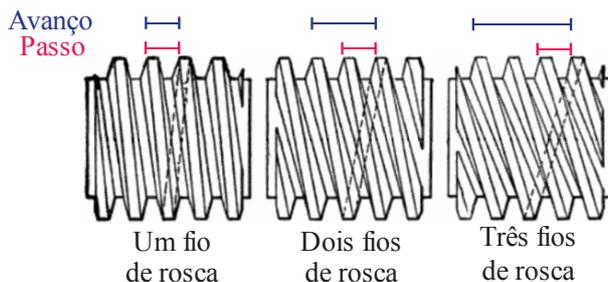
Fonte: Elaborado pelo autor.

translator. Tanto o rotor como o translator são formados por ímãs permanentes de formato helicoidal que podem ser comparados com os fios de roscas presentes nos fusos mecânicos.

Princípio equivalente ao apresentado para os fusos mecânicos pode ser empregado para um fuso magnético como o apresentado na Figura 38, com apenas algumas considerações. Cada fio de rosca do fuso mecânico é equivalente a uma hélice de ímã permanente. Assim, o que nos fusos mecânicos era denominado número de fios, para fusos magnéticos se torna o número de polos.

O avanço, agora, é determinado em função do número de polos e do passo polar do dispositivo. Para a topologia da Figura 38, o passo polar τ_p é equivalente à largura w_m dos ímãs

Figura 37 – Configurações de fusos com diferentes números de fios de rosca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

permanentes e o avanço λ é determinado pelo número de polos $P = 2$ multiplicado pelo passo polar. Matematicamente expresso por,

$$\lambda = P\tau_p \quad (2)$$

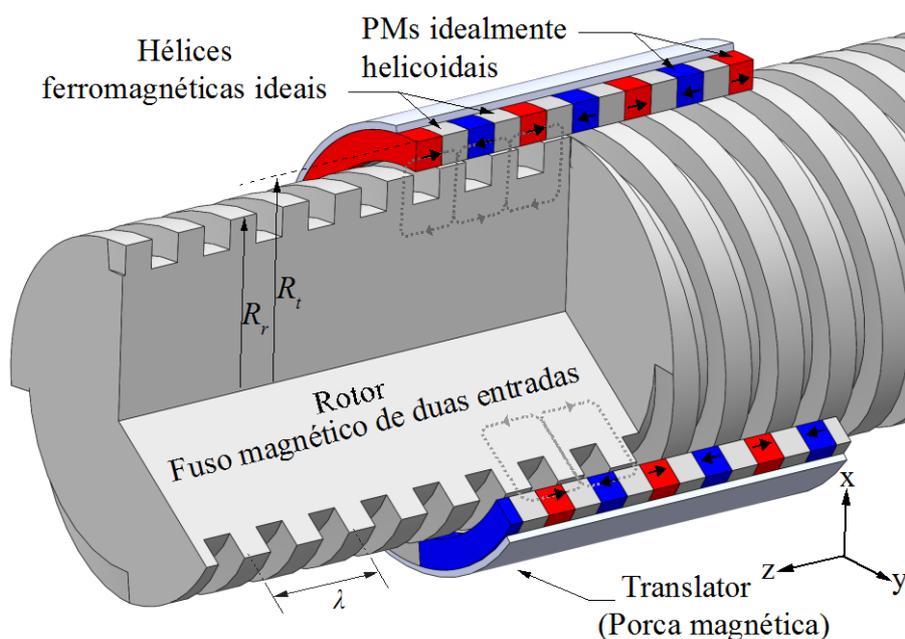
A equação (2) infere que quanto mais polos, maior será o avanço por volta realizada no rotor, comportamento similar ao dos fusos mecânicos, expresso pela equação (1).

É válido mencionar que fusos magnéticos com número ímpar de polos não são possíveis de ser concebidos, assim, haverá somente fusos magnéticos apresentando número par de polos.

3.2 FUSO MAGNÉTICO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Até então, a analogia foi estabelecida entre um fuso mecânico e um fuso magnético com ímãs permanentes radialmente magnetizados (Figura 38), no entanto, nesta dissertação, a topologia analisada é a de ímãs permanentes axialmente magnetizados e com o rotor sem ímãs permanentes, Figura 39. O princípio de funcionamento para ambas as topologias é equivalente,

Figura 39 – Fuso magnético de relutância variável conceitual.

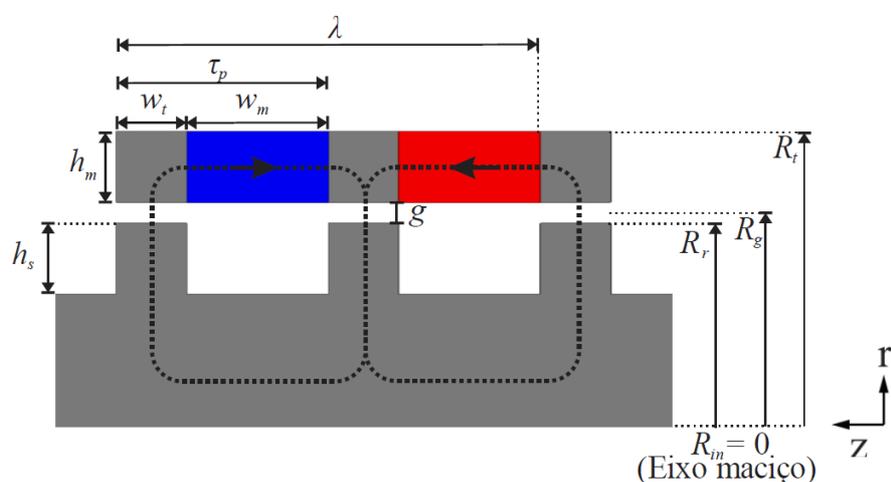


Fonte: Elaborado pelo autor.

dessa forma, as considerações até então assumidas seguem inalteradas. As diferenças se limitam a alterações na topologia.

Enquanto que o passo polar para o fuso magnético de ímãs permanentes radialmente magnetizados era delimitado pela dimensão w_m dos ímãs permanentes, o fuso magnético de relutância variável apresenta uma estrutura ferromagnética de dimensão w_t , relativa à largura dos dentes, que contribui para o passo polar. Assim, o passo polar passa a ser a soma das duas dimensões ($\tau_p = w_m + w_t$), como ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Principais dimensões do fuso magnético de relutância variável conceitual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O translator, que antes era formado somente por ímãs permanentes helicoidais, agora é formado por estruturas helicoidais concêntricamente empilhadas. Duas dessas estruturas são formadas de material ferromagnético e duas destas de ímãs permanentes magnetizados axialmente e em direções opostas. As quatro estruturas helicoidais do translator são arranjadas de modo a haver sempre uma hélice de ímã permanente alojada entre duas hélices de material ferromagnético. Esse arranjo garante que o fluxo magnético proveniente dos ímãs permanentes seja direcionado para as estruturas ferromagnéticas, as quais redirecionam o fluxo para as roscas do rotor (dentes) através do entreferro (linhas pontilhadas da Figura 40). O rotor é formado por um fuso de material ferromagnético e sem a presença de ímãs permanentes. Para garantir o alinhamento

entre as duas estruturas (rotor e translator) a largura dos dentes w_t precisam ser iguais, bem como o passo polar τ_p .

3.2.1 Produção de Força e Conjugado Devido à Energia no Campo Magnético

Estimar analiticamente a força e conjugado produzidos por fusos magnéticos de relutância variável não é trivial. Diversos são os fatores que contribuem para o elevado grau de dificuldade: a complexidade da geometria do dispositivo, a variação da relutância em função de parâmetros dimensionais, a elevada quantidade de fluxo disperso existente na translator e, ainda, a não linearidade e a saturação dos materiais ferromagnéticos que constituem o dispositivo.

Uma forma bastante simplificada, mas que consegue caracterizar a produção de força em dispositivos magnéticos desse tipo é dada através dos princípios de conservação de energia.

Em uns dispositivos eletromecânicos, a energia armazenada W_{cmp} está associada ao campo magnético e depende inteiramente das características magnéticas e dimensionais do sistema, podendo ser expressa por

$$W_{cmp}(\lambda, x) = \frac{1}{2} \frac{\lambda_{cmp}^2}{L(x)} \quad (3)$$

onde λ_{cmp} é o fluxo concatenado e $L(x)$ é a indutância em função da posição x da parte móvel.

Os fusos magnéticos são dispositivos passivos, portanto não são acionados por correntes elétricas. A energia magnética armazenada pode ainda ser expressa em termos da densidade de energia do campo magnético integrada no seu volume V , conforme

$$W_{cmp} = \int_V \left(\int_0^B H \cdot dB' \right) dV \quad (4)$$

Para materiais de permeabilidade constante ($B = \mu H$), isso reduz-se a

$$W_{cmp} = \int_V \left(\frac{B^2}{2\mu} \right) dV \quad (5)$$

Tanto a força f_{cmp} devido ao campo magnético quanto o conjugado T_{cmp} são obtidos pela taxa de variação da energia armazenada no campo, a qual depende do quadrado da densidade de fluxo magnético no entreferro. Como segue

$$f_{cmp} = - \left. \frac{\partial W_{cmp}(B, x)}{\partial x} \right|_{B=cte} \quad (6)$$

e

$$T_{cmp} = - \left. \frac{\partial W_{cmp}(B, \theta)}{\partial \theta} \right|_{B=cte} \quad (7)$$

Através da análise aqui apresentada fica evidenciada a importância de conhecermos a densidade de fluxo magnético no entreferro B_g . Conhecendo a distribuição da densidade de fluxo no entreferro, bem como os parâmetros dimensionais de um dispositivo, é possível estimar a força e o conjugado de um dispositivo magnético.

3.2.2 Relação de Transmissão

Enquanto o translator é movido linearmente ao longo do eixo z , o rotor é girado em torno do mesmo eixo. O rotor e o translator operam em sincronismo, convertendo força axial e velocidade linear em conjugado e velocidade angular e vice-versa. Enquanto o rotor é girado o equivalente a um passo polar τ_p , o translator é deslocado linearmente o equivalente a um passo polar também. O passo polar do translator é expresso em unidade de comprimento, enquanto que o passo polar do rotor é expresso em unidades de ângulo. É desta diferença de magnitude entre os passos polares do rotor e do translator que surge o efeito de relação de transmissão.

Para garantir o sincronismo entre o translator e rotor, o rotor precisa conter rosca com número de entradas (número de fios de rosca) igual ao número de polos do translator P e passo de rosca λ equivalente ao número de polos vezes o comprimento do passo polar ($\lambda = \tau_p P$).

O passo polar do translator é igual à largura dos ímãs permanentes mais a largura dos dentes ($\tau_p = w_m + w_t$). Assim, para cada volta completa, isto é, 2π rad do rotor, o translator será deslocado de $\tau_p P$. Se o tempo também for considerado, a relação de transmissão pode ser expressa como a relação entre a velocidade angular ω e a velocidade linear v . Assumindo uma velocidade $v = \tau_p P$ m/s, o rotor irá girar a 2π rad/s, ou seja, $n = 1$ rps. Assim, a relação de transmissão pode ser expressa por

$$G = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi n}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\tau_p P} = \frac{2\pi}{(w_m + w_t)P} \quad (8)$$

A partir de (8) é possível inferir que superiores taxas de transmissão são alcançadas com passos de rosca mais estreitos e/ou com menos número de polos. Se considerarmos um fuso magnético ideal e aplicarmos a lei da conservação da energia, toda a potência rotor P_r pode ser convertida em potência do translator P_t . Dessa forma, a relação entre o conjugado T_r e a força F_t pode ser simplesmente expressa por

$$P_r = P_t \rightarrow \omega T_r = v F_t \rightarrow \frac{F_t}{T_r} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{(w_m + w_t)P} = G \quad (9)$$

A equação (9) manifesta que a relação de transmissão é inerentemente dependente de parâmetros dimensionais.

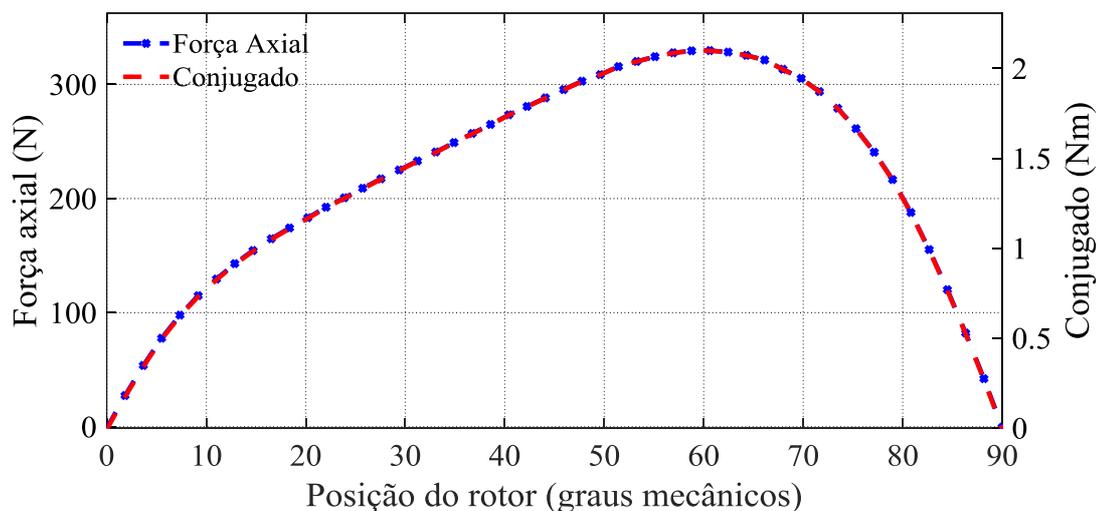
3.2.3 Característica de Conjugado e Força

A característica de força e conjugado para fusos magnéticos pode ser traçada mantendo-se uma das partes móveis fixa e deslocando a outra o equivalente a um passo polar. Mantendo-se o translator fixo e rotacionando-se o rotor um equivalente a 360° elétricos, equivalente a 180° mecânicos para um fuso magnético de dois polos, a característica de força e conjugado pode ser obtida. As curvas disponíveis na Figura 41 correspondem ao conjugado e força de um fuso magnético de relutância variável genérico obtidas através de simulações de um modelo 2D em software de elementos finitos com os parâmetros dispostos na Tabela 2. O torque é estimado a partir da força dividida pela taxa de transmissão G , calculada por meio dos parâmetros dimensionais do fuso magnético.

Algumas conclusões valem ser extraídas das características apresentadas nesta subseção:

- a característica de força e conjugado apresentada pelo fuso magnético de relutância variável assemelham-se àquelas apresentadas por máquinas rotativas e lineares de relutância variável. A força e o conjugado máximos alcançados pelo dispositivo são nomeados como

Figura 41 – Força e conjugado característicos de um fuso magnético de relutância variável conceitual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Parâmetros do fuso magnético de relutância variável conceitual.

| Símbolo | Parâmetro | Valor | Unidade |
|----------------|---------------------------------|--------------|----------------|
| w_m | Largura dos ímãs | 10 | mm |
| w_t | Largura dos dentes | 10 | mm |
| h_t | Profundidade da ranhura | 10 | mm |
| h_m | Espessura dos ímãs | 10 | mm |
| R_t | Raio externo do translator | 40 | mm |
| R_r | Raio externo do rotor | 29 | mm |
| g | Comprimento do entreferro | 1 | mm |
| λ | Passo de rosca | 40 | mm |
| L | Comprimento ativo do translator | 50 | mm |
| B_r | Densidade de fluxo remanescente | 1,23 | T |
| H_c | Coercitividade magnética | -890 | kA/m |
| α_p | Encobrimento polar | 1/2 | - |
| τ_p | Passo polar | 20 | mm |
| P | Número de polos | 2 | - |

Fonte: Elaborada pelo autor

força de desacoplamento magnético e conjugado de desacoplamento magnético, respectivamente. Para o RBMLS simulado, esse ponto de desacoplamento ocorre quando o translator e o rotor estão desalinhados um equivalente a 66% de um passo polar.

- o ponto de operação onde a força e o conjugado atingem o menor valor é chamado de ponto de equilíbrio magnético. Neste ponto os dentes do rotor e do estator estão 100% alinhados. O número de pontos de equilíbrio em um fuso magnético é equivalente ao número de polos.

4 PROJETO MAGNÉTICO DO RBMLS

Este capítulo é destinado ao estudo dos aspectos magnéticos do fuso de relutância variável (RBMLS). Simulações via elementos finitos em modelos 2D e 3D são conduzidas para investigar a influência de diversos parâmetros na performance do RBMLS. O modelo axissimétrico 2D é proposto para acelerar o estudo de sensibilidade em alguns parâmetros construtivos. No entanto, para parâmetros de caráter 3D, como, por exemplo, o número de polos e nível de discretização das estruturas helicoidais, o modelo axissimétrico 2D é insuficiente. Sendo assim, o modelo 3D, mesmo demandando elevado processamento computacional, se faz necessário para avaliar esses parâmetros. Contudo, uma menor resolução paramétrica é adotada para os parâmetros avaliados via modelo 3D. Os estudos de sensibilidade são conduzidos objetivando a maximização da força e do conjugado em função do volume de ímãs permanentes.

Ainda, para possibilitar a comparação de performance entre diferentes tecnologias (atuadores lineares tubulares, máquinas de vernier, fusos magnéticos, entre outros) uma discussão acerca do melhor parâmetro comparativo é levantada, onde o máximo valor de força por volume de ímãs permanentes é eleito como o melhor parâmetro comparativo.

4.1 ESCOLHA E APRESENTAÇÃO DA TOPOLOGIA

O primeiro passo do projeto foi a definição da topologia. Como já argumentado anteriormente, a revisão bibliográfica indica uma carência em estudos relacionados às topologias contendo ímãs permanentes magnetizados axialmente. Portanto, dentre as três possibilidades de magnetização (axial, radial ou arranjo Halbach) foi definido e será justificado que o projeto incorporaria ímãs axialmente magnetizados. Como topologias com ímãs axialmente magnetizados necessitam de estruturas ferromagnéticas para estabelecer a distribuição de densidade de fluxo magnético nas regiões de interesse, isto é, o entreferro, por exemplo, a próxima etapa deve ser a definição da geometria dos ímãs e também dessas

estruturas ferromagnéticas. Conforme discutido no capítulo 2 deste trabalho, a maior dificuldade no processo construtivo da tecnologia dos fusos magnéticos, independente da magnetização escolhida, está na fabricação de ímãs permanente em formatos helicoidais. Dessa forma, uma alternativa teve de ser escolhida para contornar esse problema, onde as possíveis soluções cogitadas foram:

- utilização de ímãs compósitos e flexíveis (ímãs produzidos com a adição de material aglutinante flexível). Estes ímãs apresentam densidade de fluxo remanescente B_r , muito inferior ao dos ímãs sinterizados de terras raras. Como referência, o trabalho de Pakdelian, Frank e Toliyat (2015) utilizou esta solução de ímãs flexíveis com $B_r = 0,45$ T, alcançando força máxima aproximadamente 4 vezes menor do que se tivesse utilizado NdFeB, por exemplo.

- utilização de ímãs retangulares comercialmente disponíveis dispostos de modo a formar uma hélice aproximada. Essa abordagem resulta em ímãs mal alinhados e superfície não uniforme. Para uniformizar a superfície, os ímãs necessitam passar por um processo de usinagem que pode resultar em desmagnetização parcial devido ao aquecimento (BERG; HOLM; RASMUSSEN, 2014b, 2014a).

- confecção de ímãs quase helicoidais de 180° (LU et al., 2015). Essa solução introduziria uma série de pequenos entreferos ao longo da direção axial no contato entre duas peças, elevando a relutância do circuito magnético. Além disso, a magnetização de ímãs com essa geometria seria algo pouco praticável (LING et al., 2018).

- confecção de ímãs em formato de arco. Pensando no processo de fixação dos ímãs, essa solução é bastante interessante para topologias que apresentam culatra de material ferromagnético, pois a atração entre os ímãs e a culatra auxiliam o procedimento de colagem dos arcos à estrutura. No entanto, em topologias sem culatra ferromagnética, como no caso da

utilizada neste trabalho, a interação das forças entre as peças de PMs adiciona um grau extra de dificuldade neste processo.

Dentre as soluções apresentadas, foi julgada como a melhor opção a solução de confeccionar ímãs em formado de arco, porém, adicionando um encaixe do tipo rabo de andorinha para auxiliar no processo de fixação dos ímãs. A adição desse encaixe garante um alinhamento mais preciso, melhor acabamento superficial, dispensa a utilização de qualquer substância aderente (colas ou similares), facilita o procedimento de montagem e adiciona robustez ao dispositivo. Esses ímãs são, então, dispostos de modo a formarem uma estrutura discretizada que se assemelha a uma hélice. Quanto mais discretizada for a estrutura, isto é, quanto mais segmentos utilizados, melhor será o resultado. É esperado que o grau de discretização dessas estruturas tenha efeito na característica de conjugado e força do dispositivo, sendo assim, a decisão do grau de discretização da estrutura é avaliada na continuação deste capítulo.

Outra decisão relativa à topologia é a utilização de ímãs permanentes em ambas as estruturas móveis (rotor e translator) ou somente em uma delas. Uma longa abordagem poderia ser apresentada aqui destacando os pontos positivos e negativos de cada uma das opções. De maneira simplificada e objetiva, pode-se dizer que a adoção de ímãs em somente em uma das estruturas resulta em uma menor densidade de força. No entanto, alguns aspectos positivos são alcançados:

- mantendo-se os ímãs permanentes em somente uma das partes do fuso magnético, a complexidade de produzir estruturas helicoidais de material ferromagnético duro é substancialmente reduzida. Supondo que os ímãs permanentes sejam alocados somente no translator do fuso magnético, desta forma, o rotor pode ser fabricado puramente de materiais ferromagnético macio, os quais podem ser submetidos a procedimentos de usinagem convencionais, tornando mais simples a manufatura de estruturas perfeitamente helicoidais.

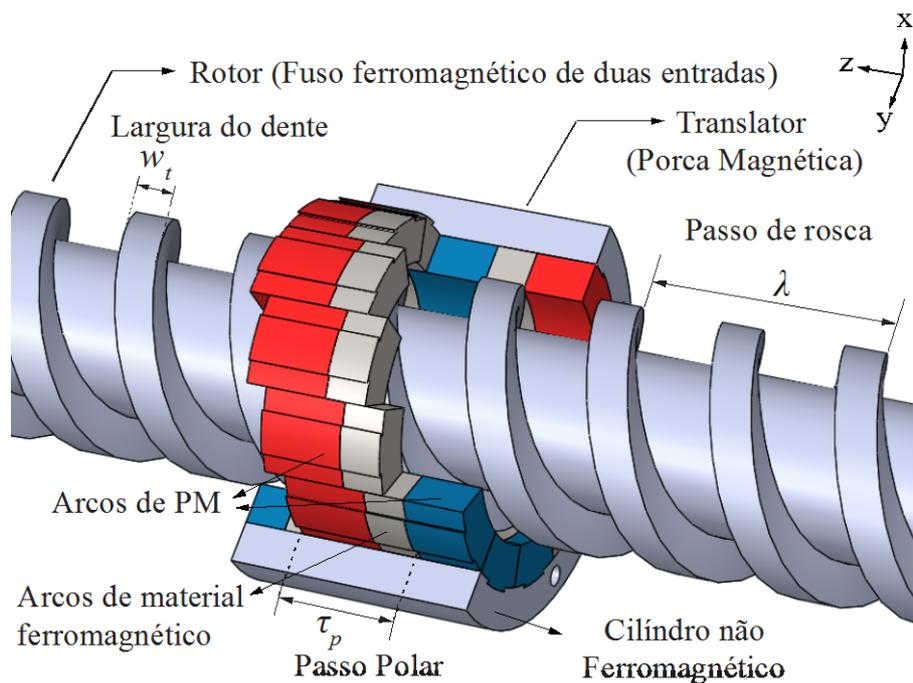
- como consequência do item anterior, possuindo pelo menos uma das estruturas (rotor ou translator) com formato perfeitamente helicoidal, a forma de onda característica para o conjugado e para a força tende a ser mais suave. Em outras palavras, a forma de onda do conjugado e da força não assumem formato trapezoidal em função da discretização das estruturas. O caráter trapezoidal em função do grau de discretização das estruturas helicoidais foi apresentado na subseção 2.2.3, Figura 35.

- a possibilidade de desmagnetização devido às altas densidades de fluxo proveniente das estruturas concentradoras de fluxo é muito menor quando só existem ímãs permanentes em uma das partes móveis.

Neste ponto do projeto já foram definidos: a direção de magnetização dos ímãs permanentes (axial); a solução para a geração do desejado fluxo magnético helicoidal (estrutura discretizada formada por arcos e com encaixe do tipo rabo de andorinha); e quais partes do fuso magnético receberão ímãs permanentes (somente o translator). Essa topologia pode ser apreciada na Figura 43.

A topologia resultante é constituída por um rotor de material ferromagnético similar a um fuso de rosca de dupla entrada e um translator, formado por vários arcos de material ferromagnético macio e ímãs permanentes, dispostos de maneira a compor quatro estruturas helicoidais discretizadas (duas de material ferromagnético macio e duas formada por ímãs permanentes). O fluxo magnético produzido pelos ímãs axialmente magnetizados na direção z (arcos em vermelho e azul, onde as cores identificam alternância de polaridade) é concentrado em direção aos arcos de material ferromagnético macio (dentes do translator), que direcionam o fluxo para os dentes do rotor através do entreferro. Os dentes do translator e os do rotor, quando não há presença de perturbações externas, tendem a se alinhar. A posição em que os dentes estão alinhados configura o caminho de menor relutância para o fluxo magnético e é chamada de posição de equilíbrio.

Figura 42 – Visão em corte da topologia proposta.



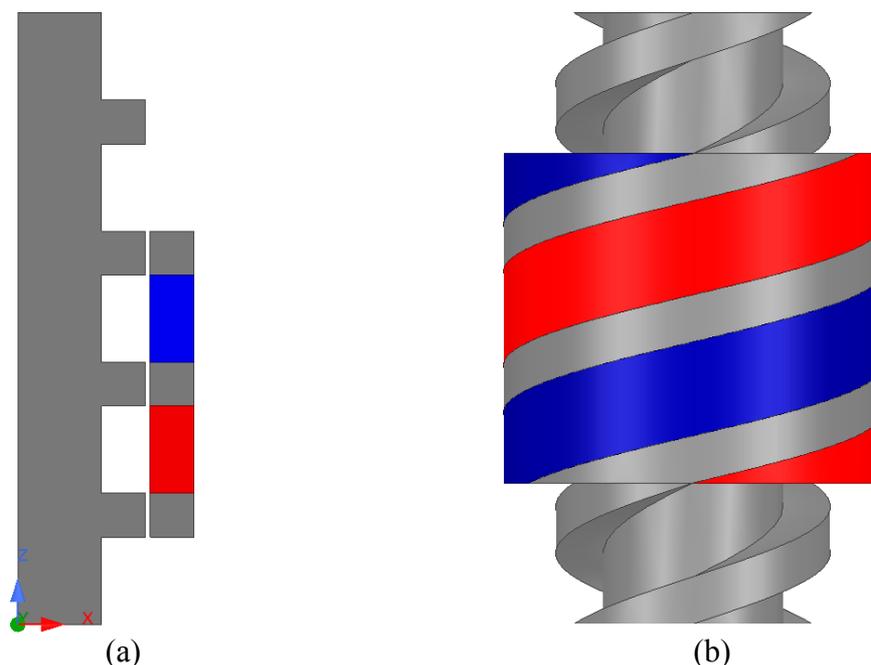
Fonte: Elaborada pelo autor.

O princípio de funcionamento do fuso magnético apresentando aqui é o mesmo do apresentado no capítulo 3, ao passo que os dentes são desalinhados por perturbações externas as partes móveis deixam o estado de equilíbrio magnético e as linhas de fluxo magnético passam a experimentar um caminho de maior relutância, portanto, uma força contrária à imposta no dispositivo é surgida. Esse fenômeno será tratado de maneira mais aprofundada no decorrer deste capítulo.

4.2 MODELOS NUMÉRICOS

Com a topologia definida, a próxima etapa é a definição dos parâmetros dimensionais de projeto. Os parâmetros foram escolhidos através de análise de dois modelos em *software* de elementos finitos (um modelo axissimétrico 2D e outro modelo 3D), Figura 43, ambos objetivando a maximização da força produzida por volume de ímã.

Figura 43 – Modelos numéricos utilizados: (a) axissimétrico 2D e (b) 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido à geometria do fuso magnético, a distribuição do campo magnético no entreferro apresenta componentes nas três direções. No entanto, o fluxo magnético pode ser modelado através de um modelo axissimétrico 2D. Isso porque o comprimento do entreferro é muito menor do que o passo polar; assim, a maior porção do fluxo magnético possui direção radial.

Para fins de validação, os resultados de força axial e conjugado obtidos de ambos os modelos adotando os parâmetros ilustrados na Figura 40 e listados na Tabela 3 são confrontados na Figura 44 e na Figura 45.

O modelo 2D não é capaz de fornecer valores de conjugado diretamente, somente força axial. Para tanto, o conjugado do modelo 2D foi calculado por intermédio da relação de transmissão apresentada na seção 3.2.2, equação (8).

O número de simulações paramétricas seria limitado pelo elevado tempo de processamento computacional demandado pelas simulações utilizando o modelo 3D. No entanto, é possível notar uma boa concordância entre os resultados fornecidos pelos modelos

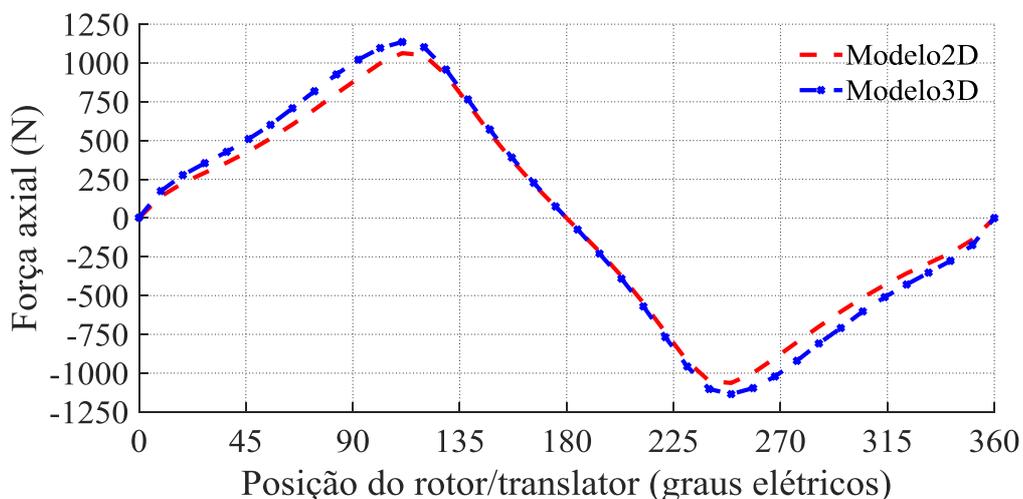
Tabela 3 – Parâmetros utilizados nas simulações numéricas.

| Símbolo | Parâmetro | Valor | Unidade |
|----------------|---------------------------------|--------------|----------------|
| w_m | Largura dos ímãs | 20 | mm |
| w_t | Largura dos dentes | 10 | mm |
| h_t | Profundidade da ranhura | 10 | mm |
| h_m | Espessura dos ímãs | 10 | mm |
| R_{in} | Raio interno do rotor | 0 | mm |
| R_t | Raio externo do translator | 40 | mm |
| R_r | Raio externo do rotor | 29 | mm |
| R_g | Raio da linha do entreferro | 29,5 | mm |
| g | Comprimento do entreferro | 1 | mm |
| λ | Passo de rosca | 60 | mm |
| L | Comprimento ativo do translator | 70 | mm |
| B_r | Densidade de fluxo remanescente | 1,40 | T |
| H_c | Coercitividade magnética | 950 | kA/m |
| α_p | Encobrimento magnético | 2/3 | - |
| τ_p | Passo polar | 30 | mm |

Fonte: Elaborada pelo autor

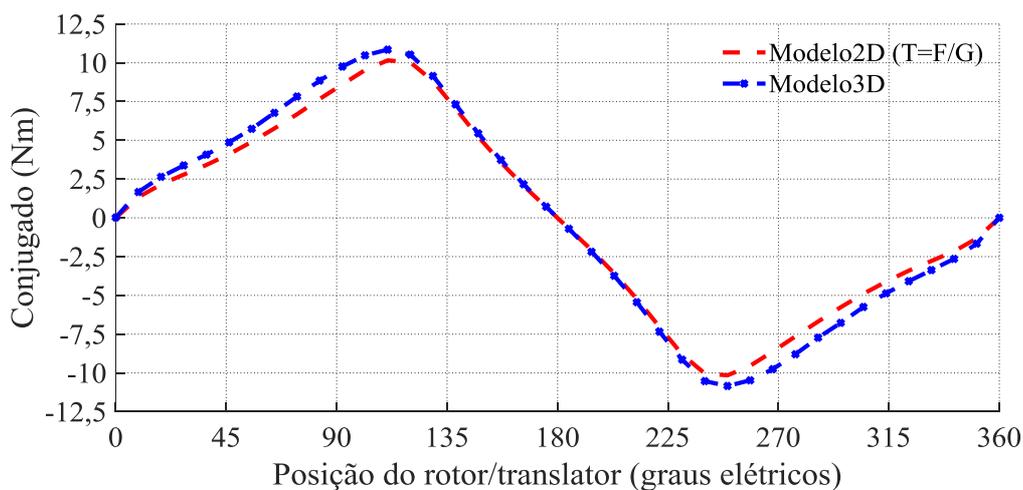
2D e 3D (máxima diferença de 6,63 %). Sendo assim, a obtenção de um modelo 2D axissimétrico capaz de estimar valores de força com apreciável grau de exatidão, torna possível a execução um maior número de simulações. Como consequência, o número de parâmetros e também a resolução com que estes parâmetros são variados podem ser aumentados consideravelmente, justificando a utilização do modelo axissimétrico 2D.

Figura 44 – Comparação da força axial fornecida pelos modelos numéricos 2D e 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 – Comparação da torque fornecida pelos modelos numéricos 2D e 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA – MODELOS 2D

Como já informado anteriormente, dois modelos serão utilizados para a análise numérica do fuso magnético de relutância variável. Há parâmetros que o modelo 2D é competente na estimativa dos resultados e outros que somente o modelo 3D é capaz de analisar, como, por exemplo, a influência do número de polos e o grau de discretização das estruturas helicoidais.

Dito isso, a análise numérica foi dividida em duas: uma análise utilizando o modelo axissimétrico 2D; e outra com o modelo 3D.

Nesta subseção do trabalho, o fuso magnético de relutância variável será submetido a um estudo de sensibilidade paramétrica, objetivando se obter a máxima produção de força por unidade de volume de ímã permanente.

Diversos são os parâmetros que podem influenciar a performance do fuso magnético: largura e espessura dos ímãs, comprimento ativo, diâmetros do rotor e do estator, largura dos dentes do rotor e translator, comprimento do entreferro, produto energético dos ímãs permanentes, saturação do material ferromagnético, entre outros.

Como ponto de partida, alguns parâmetros foram previamente definidos enquanto que os outros foram variados em busca da melhor relação de força por volume de ímãs. Os parâmetros fixados inicialmente foram:

- ímãs permanentes. Essa característica foi fixada em função das características magnéticas do material, curve B-H, por exemplo.

- largura dos dentes do rotor e do translator. A largura dos dentes do translator foi definida em função da pré-disponibilidade de peças de aço SAE-AISI 1020 com 10 mm de espessura. Para garantir o correto alinhamento entre o translator e o rotor, as larguras dos dentes precisam ser idênticas. Portanto, ambas definidas como 10 mm.

- diâmetro do rotor. Esse parâmetro foi escolhido com base em outros protótipos de fusos magnéticos. Esses protótipos possuem topologia diferente e foram apresentados na revisão bibliográfica. A utilização de uma dimensão similar facilita a comparação entre dispositivos e topologias.

- comprimento ativo. O comprimento ativo do fuso magnético é tão longo quanto a sua menor parte móvel, neste caso, o translator. A força máxima produzida é linearmente proporcional ao comprimento ativo, como será apresentado no decorrer desta seção. Tendo isso

em mente, o comprimento ativo foi definido com base na simplificação da construção e formulação dos modelos numéricos, de modo com que cada uma das estruturas helicoidais existentes no translator completasse uma volta completa (dois passos polares mais uma largura de dente)⁶.

- comprimento do entreferro. De maneira semelhante a outros dispositivos magnéticos, um menor entreferro representa uma menor relutância, conseqüentemente melhores performances podem ser alcançadas. Dessa forma, o comprimento do entreferro é escolhido como o menor possível, onde a limitação encontra-se no processo fabril e numa montagem que garante um entreferro constante. Foi julgado que 1 mm seria uma dimensão realista de ser alcançada.

A Tabela 4 apresenta, em resumo, as dimensões iniciais de projeto.

O estudo de sensibilidade paramétrica consiste na fixação de certos parâmetros, enquanto que outros são variados dentro de intervalos de interesse. O objetivo do estudo está na maximização da força produzida. Conforme apresentado na seção 3.2.3, Figura 41, a máxima força produzida depende da posição relativa entre o rotor e o translator. Dessa forma, para analisar a máxima força para cada parâmetro variado, o rotor e o translator são

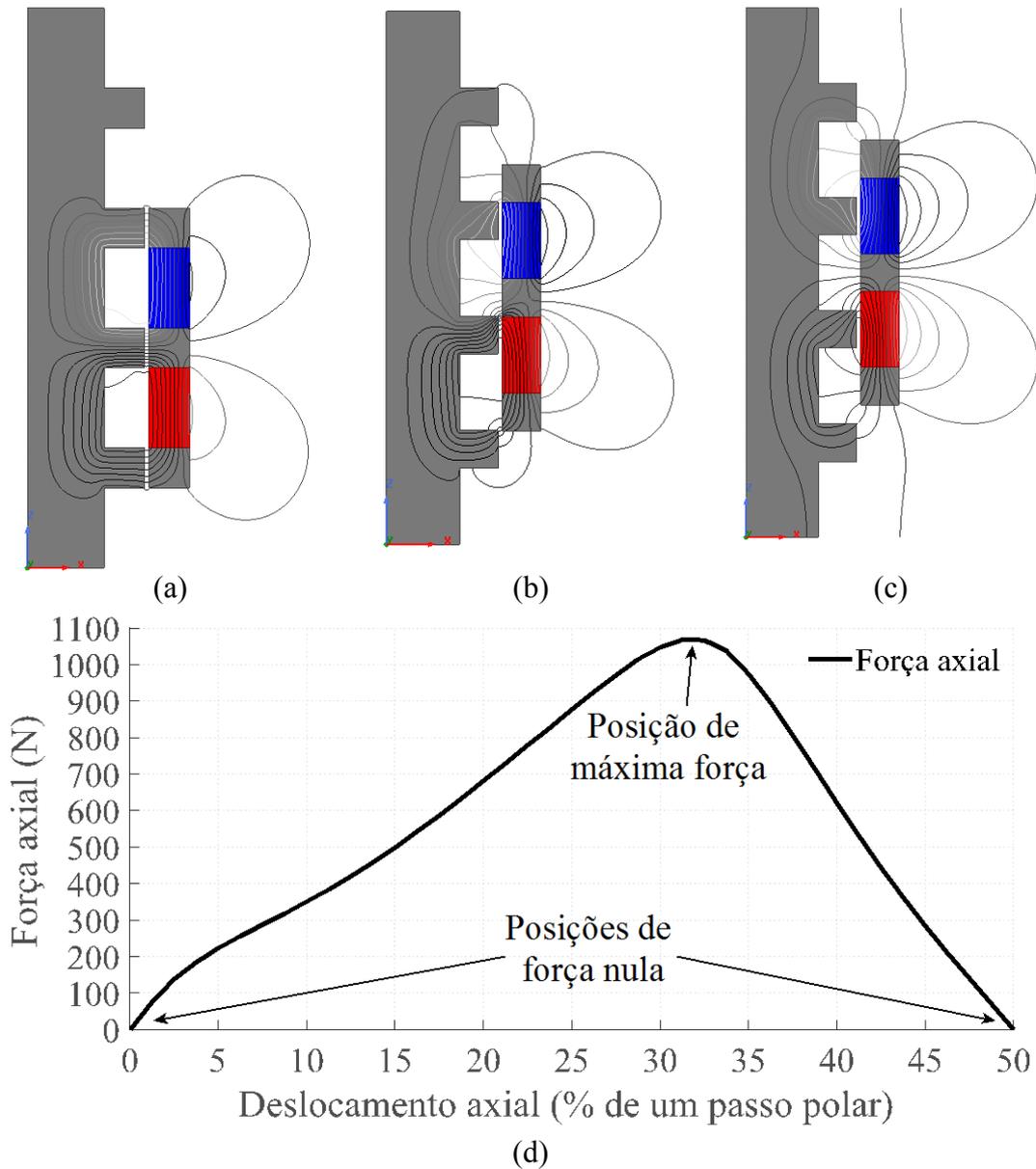
Tabela 4 – Parâmetros iniciais de projeto.

| Símbolo | Parâmetro | Valor | Unidade |
|----------------|---------------------------------|--------------|----------------|
| w_i | Largura dos dentes | 10 | mm |
| R_r | Raio externo do rotor | 29 | mm |
| L | Comprimento ativo ⁶ | - | mm |
| g | Comprimento do entreferro | 1 | mm |
| B_r | Densidade de fluxo remanescente | 1,40 | T |
| H_c | Coercitividade magnética | 950 | kA/m |

Fonte: Elaborada pelo autor

⁶ O comprimento ativo é definido como dois passos polares mais uma largura de dente, portanto, o comprimento final só pode ser estimado após a escolha do passo polar.

Figura 46 – Linhas de fluxo magnético para diferentes posições relativas entre o translator e o rotor. (a) completo alinhamento dos dentes (posição de equilíbrio magnético), (b) posição de máxima produção de força, (c) Simetria do campo magnético (posição de equilíbrio magnético) e (d) gráfico da força em função do deslocamento axial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

desalinhados linearmente de 0 % a 50 % de um passo polar, de modo a englobar as posições de equilíbrio magnético (força nula) e a posição de desacoplamento magnético (máxima força produzida). As posições de equilíbrio magnético serão sempre equivalentes a 0 % de deslocamento de um passo polar e 50 % de um passo polar (extremos da curva apresentada na Figura 46 (d)), independentemente do parâmetro varado. No entanto, a posição de máxima

produção de força pode variar, daí a necessidade de, para cada parâmetro variado, avaliar a posição de máxima força.

A Figura 46 demonstra as linhas de fluxo magnético para três diferentes deslocamentos entre o translator e o rotor. As Figura 46 (a) e (c), caracterizam as posições de menor produção de força, enquanto que a Figura 46 (b) configura a posição de máxima produção de força axial.

4.3.1 Comprimento do entreferro - g

Por mais que o entreferro tenha sido escolhido baseado na capacidade de fabricação julgada praticável pelo autor, é interessante verificar a influência do comprimento do entreferro sobre a máxima força produzida. Para esta análise, todos os parâmetros do modelo 2D são fixados de acordo com o apresentado na Tabela 3, exceto o comprimento do entreferro, o qual é variado de 0,5 mm até 5 mm em incrementos constantes de 0,5.

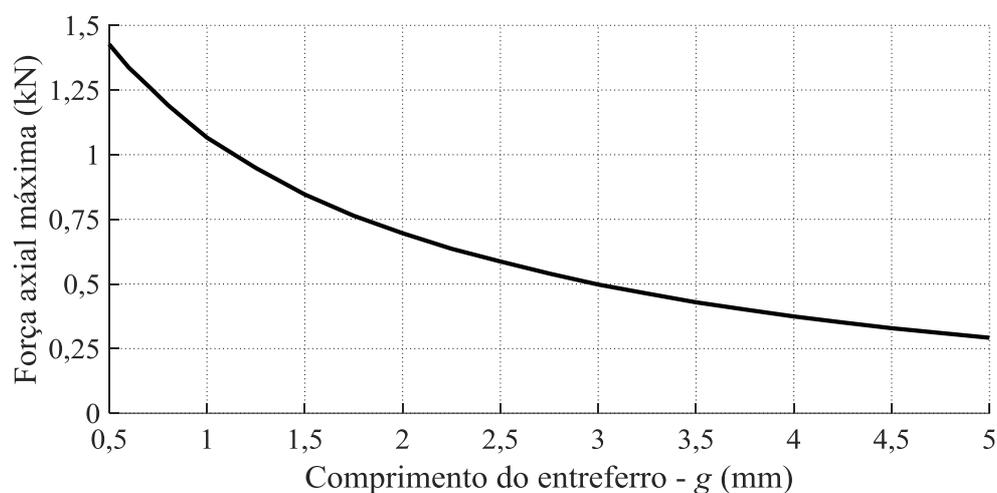
Para cada comprimento de entreferro avaliado, o translator é deslocado axialmente na direção z de 1 em 1 %, até alcançar 50 % de um passo polar, desde a posição de máximo alinhamento entre os dentes do rotor e do translator (0 %), passando pela posição de máxima força, até retornar para a segunda posição de equilíbrio (50 %), conforme mostrado na Figura 46.

Conforme previsto, quanto menor for o comprimento do entreferro, menor será a relutância, conseqüentemente, maior será a densidade de fluxo alcançada no entreferro. A través do gráfico da Figura 47 é possível compreender a grande influência que o comprimento do entreferro exerce sobre a máxima produção de força. Se o comprimento do entreferro fosse reduzido de 1 mm para 0,5 mm, a força sofreria um aumento de aproximadamente 34% (de 1066 N para 1427 N).

4.3.1 Dimensionando um RBMLS

Intuitivamente, a máxima força axial, F_m , e o máximo conjugado, T_m , de um fuso magnético são linearmente proporcionais à área efetiva de entreferro, A_g , (área compartilhada

Figura 47 – Influência do comprimento de entreferro na força axial máxima.

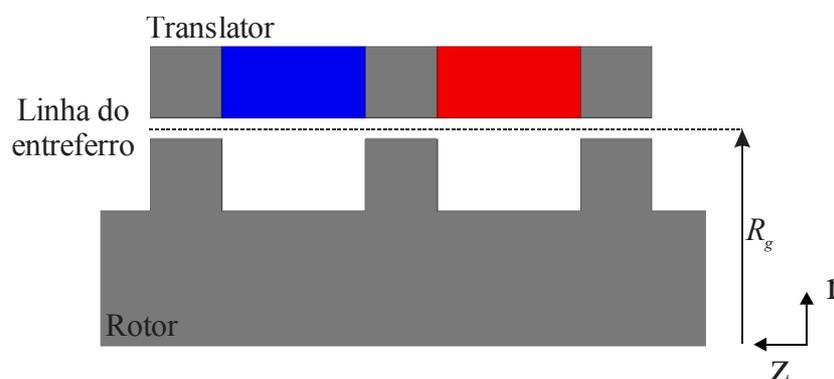


Fonte: Elaborada pelo autor.

entre o rotor e o translator). Um modelo 2D axissimétrico foi empregado a fim de avaliar a proporcionalidade da força em função do comprimento axial e do raio da linha do entreferro.

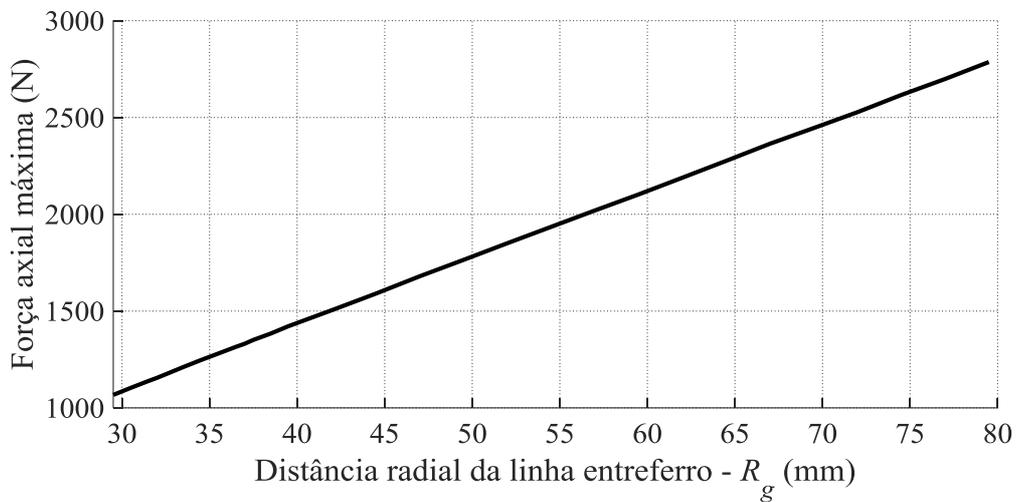
O raio da linha do entreferro R_g , representado pela linha pontilhada da Figura 48, é aumentado de 29,5 mm até 79,5 mm, enquanto o comprimento ativo do é mantido fixo em 70 mm, os demais parâmetros são mantidos conforme os presentes na Tabela 3. O mesmo procedimento foi realizado para uma simulação com raio da linha do entreferro mantido em 29,5 mm e variando o comprimento ativo de 70 mm até 150 mm. Os resultados são apresentados na Figura 49 e Figura 50, respectivamente. Verifica-se que um RBMLS pode ser simplesmente dimensionado em função do comprimento axial e do raio de entreferro.

Figura 48 – Influência do comprimento de entreferro na força axial máxima.



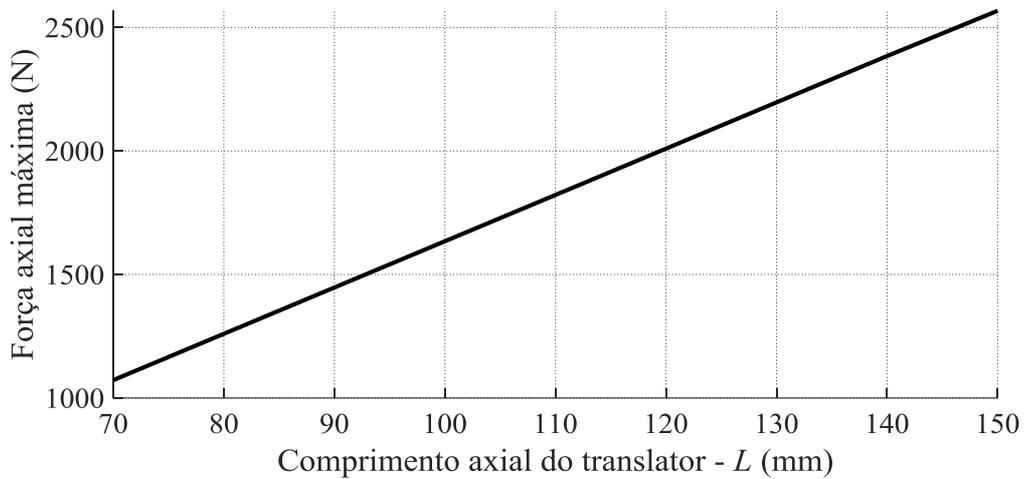
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 – Variação força axial máxima em função do comprimento radial da linha do entreferro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Variação força axial máxima em função do comprimento axial do translator.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se concluir, ainda, que há uma relação constante entre a força máxima F_m produzida e a área de seção magnética do entreferro A_g . Essa proporcionalidade é chamada de força de cisalhamento magnético ou pressão magnética.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_g} \quad (10)$$

Uma vez que essa constante é definida, a força produzida por área de seção magnética de entreferro é facilmente estimada para RBMLS com outras dimensões. Para o caso estudado, a força de cisalhamento magnético é de aproximadamente 83 kN/m².

Portanto, a força máxima produzida pelo RBMLS pode ser expressa por

$$F_m = \sigma_m A_g = \sigma_m (2\pi R_g L) \quad (11)$$

Apesar do cisalhamento magnético ser um bom parâmetro para escalar a força em função da área de entreferro ativa, esta abordagem não é eficiente quando parâmetros como a espessura dos ímãs permanentes é variada. Um aumento na espessura dos ímãs elevará a força produzida, no entanto, a área de entreferro ativa será mantida inalterada, o que alteraria a força de cisalhamento magnético do dispositivo. Apontada essa limitação, fica evidente a necessidade de outro parâmetro mais competente para o estudo de sensibilidade paramétrica.

4.3.2 Espessura dos ímãs permanentes – h_m

Como os ímãs permanentes de terras raras são, geralmente, os componentes mais caros em dispositivos magnéticos, é sensato buscar a maximização da utilização destes componentes. Para tanto, é esperado que o parâmetro comparativo incorpore o volume total de ímãs permanentes utilizados no dispositivo. Dessa forma, durante todo o estudo de sensibilidade paramétrica apresentado nesse capítulo, o parâmetro otimizado é a máxima produção de força axial em função do volume de ímãs permanentes utilizado (F_m/V_{PM}). Para o fuso magnético de relutância variável, o volume de ímãs utilizado é calculado por

$$V_{PM} = 2\pi R_m \alpha_p h_m L \quad (12)$$

onde R_m é o raio médio para os ímãs permanentes ($R_m = R_r - h_m/2$), α_p o encobrimento polar, L o comprimento do translator e h_m a espessura dos ímãs permanentes.

Dois são os parâmetros que definem a geometria, conseqüentemente, o volume dos ímãs permanentes no modelo axissimétrico 2D: a espessura do ímã h_m , que é a dimensão

compreendida entre o raio interno e o raio externo do translator; e a largura w_m , também interpretada como o comprimento axial dos ímãs.

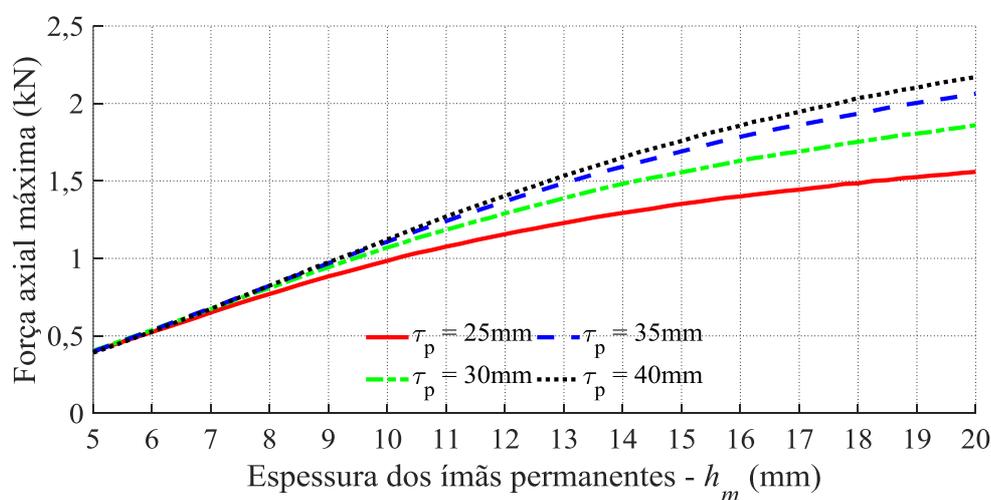
Para avaliar a influência da espessura dos PMs, espessura h_m dos ímãs foi variada num intervalo de 5 a 20 mm em passos constantes de 0,05 mm para quatro diferentes valores de passo polar. Os demais parâmetros foram mantidos fixos, de acordo com a Tabela 3.

A Figura 51 e a Figura 52 demonstram, respectivamente, a variação da máxima força produzida e da densidade de força em função da espessura dos ímãs permanentes h_m para os quatro valores de passo polar τ_p .

De forma esperada, um aumento na espessura dos ímãs permanentes resulta em uma maior produção de força axial, visto que isto eleva o ponto de operação dos ímãs permanentes e assim produzindo maior densidade de fluxo magnético. Esse aumento na força axial máxima aumenta até ponto em que o material ferromagnético satura magneticamente.

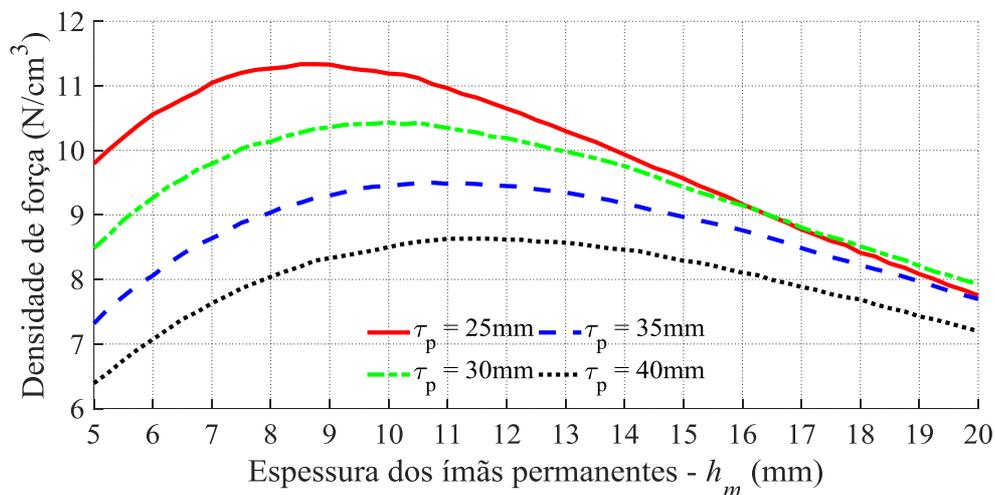
A característica da variação da densidade de força em função da espessura dos ímãs indica que há um valor para h_m que maximiza a força produzida em função do volume de ímãs utilizado. Para o escolhido valor de passo polar $\tau_p = 30$ mm, ímãs permanentes com espessura $h_m = 10$ mm produzem a maior força por volume de PMs.

Figura 51 – Influência da espessura dos ímãs permanentes na máxima força produzida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Influência da espessura dos ímãs permanentes na máxima força produzida por volume de ímã permanente.

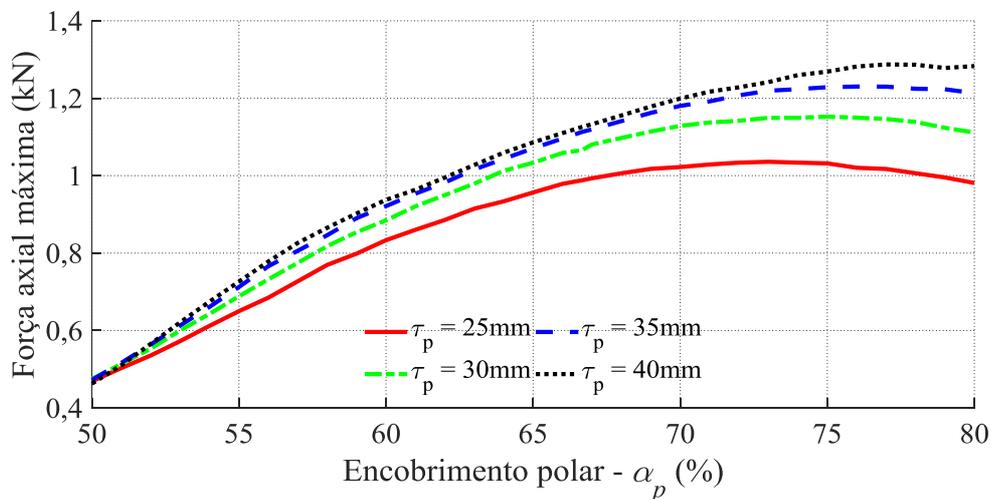


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3 Encobrimento polar – α_p

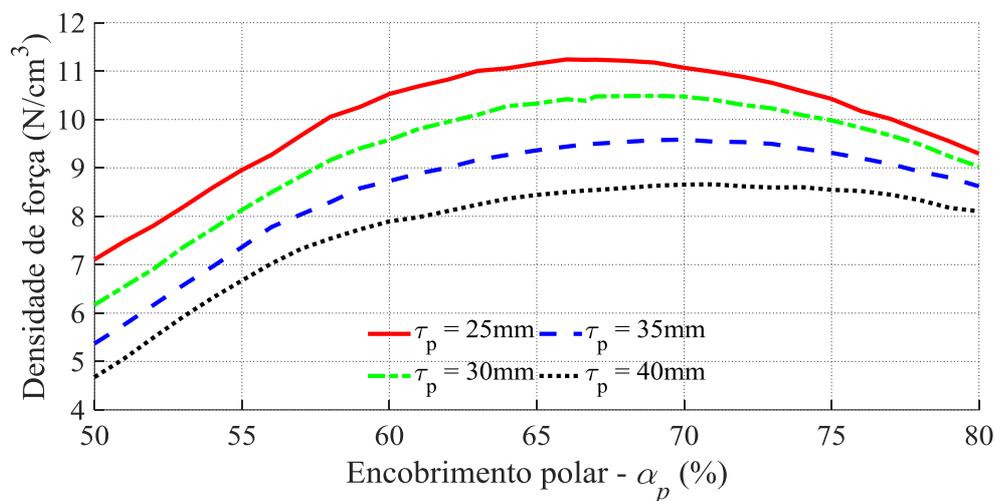
O encobrimento polar representa, em um passo polar, o percentual encoberto por ímãs permanentes, ou seja, a razão entre o comprimento axial de ímãs permanentes e o passo polar $\alpha_p = (w_m / \tau_p)$. A influência do encobrimento polar na força máxima produzida está ilustrada pela Figura 53. Notadamente, aumentando-se o encobrimento polar, maior será o volume de ímãs permanentes e, conseqüentemente, a força produzida. Porém, diferentemente do que

Figura 53 – Influência do encobrimento polar na máxima força produzida por volume de ímã permanente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – Influência do encobrimento polar na máxima força produzida por volume de ímã permanente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

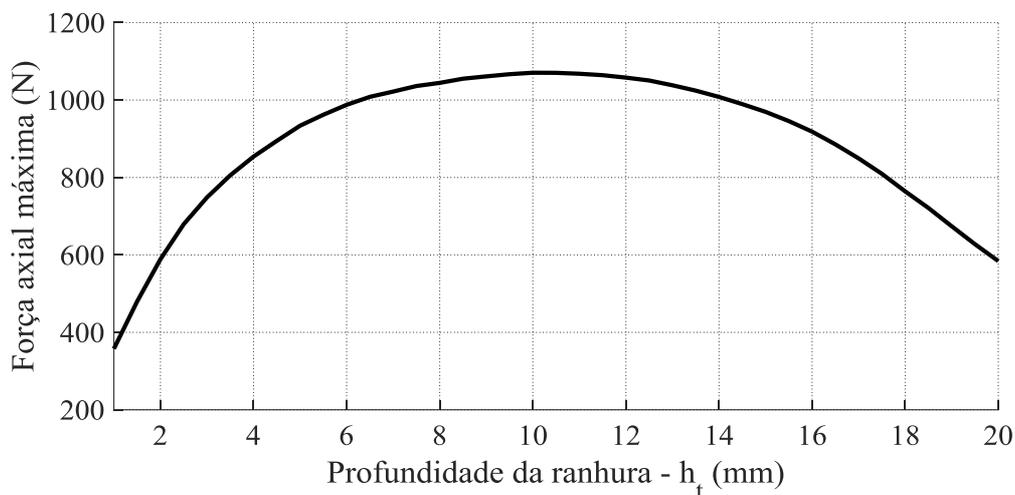
observado com o aumento da espessura dos ímãs permanentes, a partir de um certo valor de encobrimento polar a força máxima produzida decai, mesmo havendo um aumento no volume total de ímãs. Isso ocorre devido ao fato que a topologia de fusos magnético com ímãs axialmente magnetizados necessita das estruturas ferromagnéticas macias para estabelecer as linhas de fluxo magnético para o entreferro. Com o aumento do encobrimento polar, chega um certo momento que há tão pouco material ferromagnético guiando as linhas de fluxo em direção ao entreferro, que, mesmo com o aumento do volume de PMs, a força tenderá a reduzir.

Assim como para a espessura dos PMs, existe um valor de encobrimento polar que maximiza a utilização dos ímãs permanentes para a produção de força. Para o escolhido valor de passo polar $\tau_p = 30$ mm, a força é maximizada quando o encobrimento polar atinge 68%, o que é, de forma aproximada, equivalente a $2/3$.

4.3.4 Profundidade de ranhura – h_r

Outro parâmetro dimensional sob investigação é a profundidade das ranhuras do rotor h_s . Mantendo fixo o raio externo do rotor R_r e aumentando a profundidade da ranhura de 1 mm até 20 mm, a máxima força obtida para cada caso é ilustrada na Figura 55. Um valor de

Figura 55 – Influência da profundidade da ranhura na força axial máxima.



Fonte: Elaborada pelo autor.

profundidade de aproximadamente 10 mm maximiza a força produzida. De fato, quanto mais saliente estiverem os dentes do rotor, mais concentrado será o fluxo magnético nestes. Todavia, incrementando a profundidade dos dentes, ocasiona uma redução no diâmetro do núcleo do rotor. Consequentemente, redução na área de seção transversal levando à saturação magnética do material do núcleo do rotor.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA – MODELO 3D

Há parâmetros que o modelo axissimétrico 2D, utilizado na subseção anterior, não é capaz de avaliar, como, por exemplo, a influência do número de polos e a discretização das estruturas helicoidais. Ambos os parâmetros necessitam de um modelo 3D para corretamente estimar os resultados de força e conjugado.

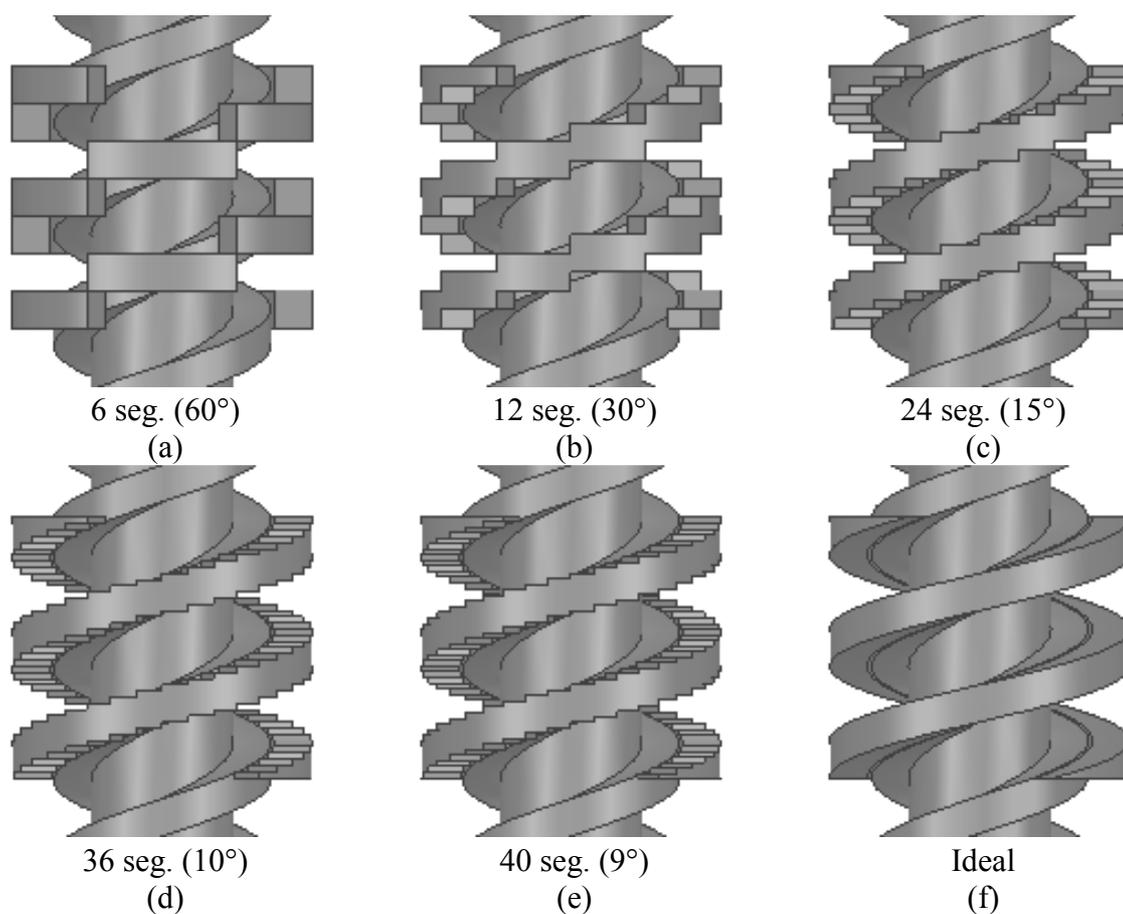
4.4.1 Efeito da utilização de estruturas não idealmente helicoidais

Embora um RBMLS poderia empregar ímãs permanentes de formato e magnetização idealmente helicoidais, na prática, isso não é possível. Portanto, do ponto de vista construtivo, uma solução alternativa precisa ser empregada a fim de produzir o desejado fluxo magnético de formato helicoidal. As possíveis soluções foram apresentadas anteriormente na seção 4.1

deste capítulo. Sendo a prática mais comum entre os protótipos construídos, e também a solução adotada neste trabalho, uma segmentação ou discretização das estruturas helicoidais é feita a fim de formar aproximado formato de hélice. Essa hélice é tão próxima de uma ideal quanto maior for o grau de discretização utilizado – mais segmentos de ímã por volta. As imagens da Figura 56 ilustram os diferentes níveis de discretização das referidas estruturas helicoidais.

Para uma melhor compreensão visual, os ímãs permanentes foram ocultados das imagens, restando apenas o rotor com hélices ferromagnéticas idealmente helicoidais e as estruturas ferromagnéticas discretizadas do translator. Ao passo que o número de segmentos

Figura 56 – Diferentes graus de discretização das estruturas helicoidais do translator. Os PMs foram ocultados para uma visualização mais clara das estruturas.

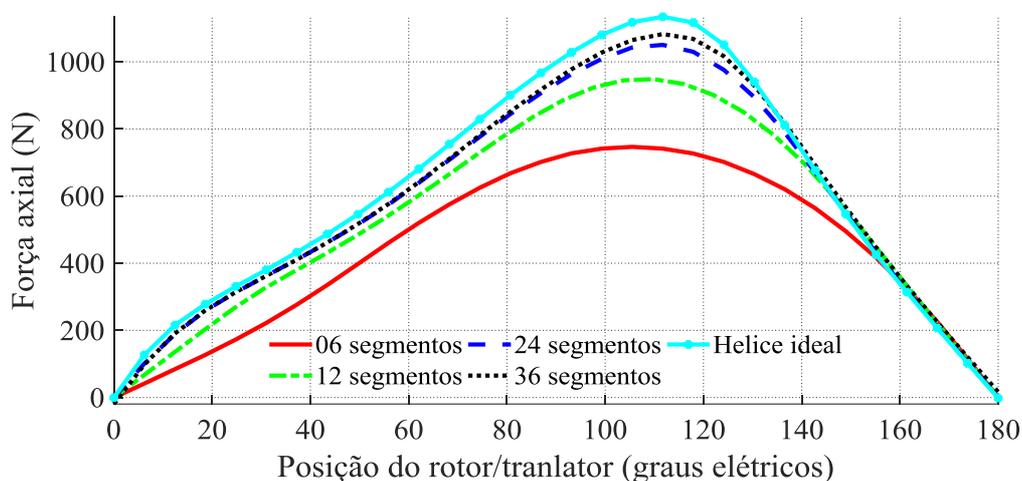


Fonte: Elaborada pelo autor.

por hélice e por volta aumenta, melhor se torna a aproximação de uma hélice ideal. O mesmo rotor é mantido para todos os RBMLS apresentados na Figura 56. Cada segmento de arco é deslocado em relação ao seu vizinho o equivalente a um passo de rosca, λ , dividido pelo número de segmentos por volta na direção axial e radialmente o equivalente a 360° dividido pelo número de segmentos por volta.

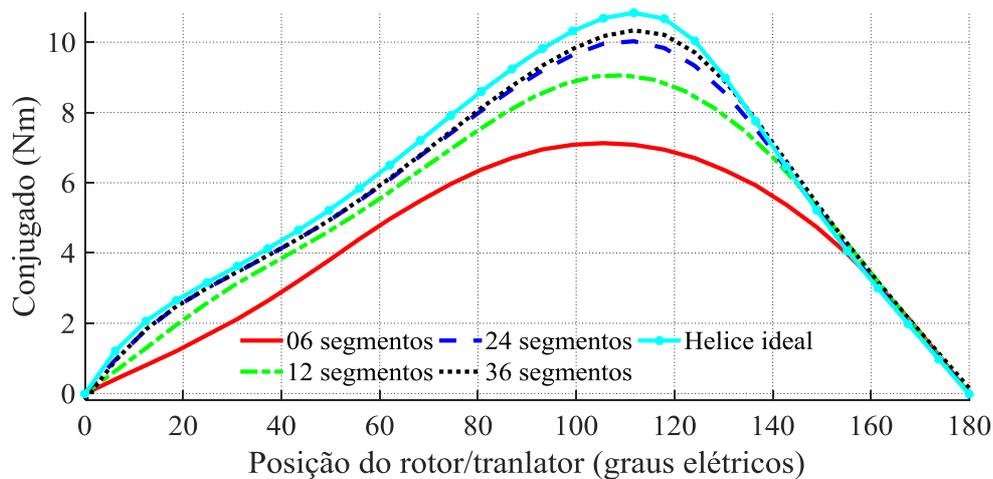
A influência da discretização das estruturas na força e no conjugado produzido pode ser observada na Figura 57 e na Figura 58, respectivamente. É evidenciado que quanto maior o

Figura 57 – Influência do número de segmentos na força axial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Influência do número de segmentos no conjugado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

número de segmentos, conseqüentemente uma melhor aproximação de uma estrutura idealmente helicoidal, maior será o conjugado e a força produzida pelo RBMLS.

Algumas conclusões podem ser extraídas com base nos resultados obtidos para a força e conjugado com os diferentes graus de segmentação das estruturas helicoidais.

De maneira similar ao efeito da discretização apresentado nos trabalhos de Pakdelian e Toliyat (2012b), Ling (2016) e (2018), a força tende a cair quanto mais distante de uma hélice perfeita se tornam as estruturas. No entanto, nos citados trabalhos, a discretização das estruturas tem consequência no perfil de força e conjugado resultante, não somente em suas magnitudes. Menos segmentos resultam em um formato trapezoidal para os perfis de força e conjugado.

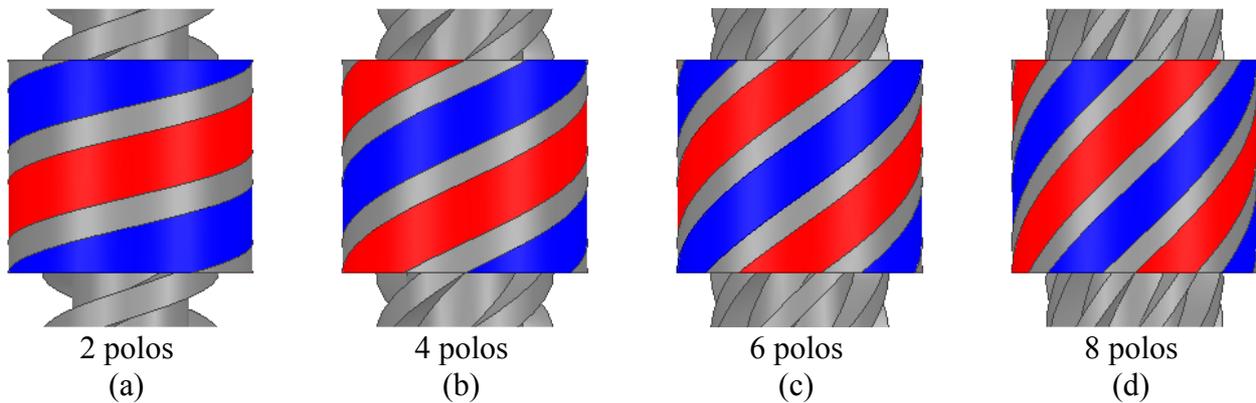
A topologia proposta neste trabalho de uma hélice em formato perfeitamente helicoidal em uma das partes móveis (rotor) faz com que o mencionado caráter trapezoidal não ocorra, sendo observado apenas a redução na magnitude da força. Essa característica é um ponto favorável desta topologia, pois o perfil de força e conjugado são suaves e independentes do grau de discretização das estruturas helicoidais.

Elevar a discretização para além de 24 segmentos por volta (arcos com 15°) não resulta em grande diferença na força axial produzida. Portanto, 24 segmentos por volta é observado como um bom valor para discretização. Por motivos de simplificação no processo de fabricação do protótipo, uma quantidade de 12 segmentos por volta por estrutura helicoidal é escolhida. Com 12 segmentos por volta, a força axial máxima produzida é de 950 N e o conjugado igual a 9,05 Nm. Comparando com o caso ideal, a força apresenta uma redução de cerca de 16,4 %. A mesma redução é experimentada pelo conjugado máximo.

4.4.2 Número de polos

De maneira similar, o efeito que o número de polos revela sobre o perfil da força e do conjugado para fusos magnéticos de relutância variável é estudado via MEF 3D. A avaliação foi realizada mantendo-se os mesmos parâmetros para quatro RBMLS com diferentes números

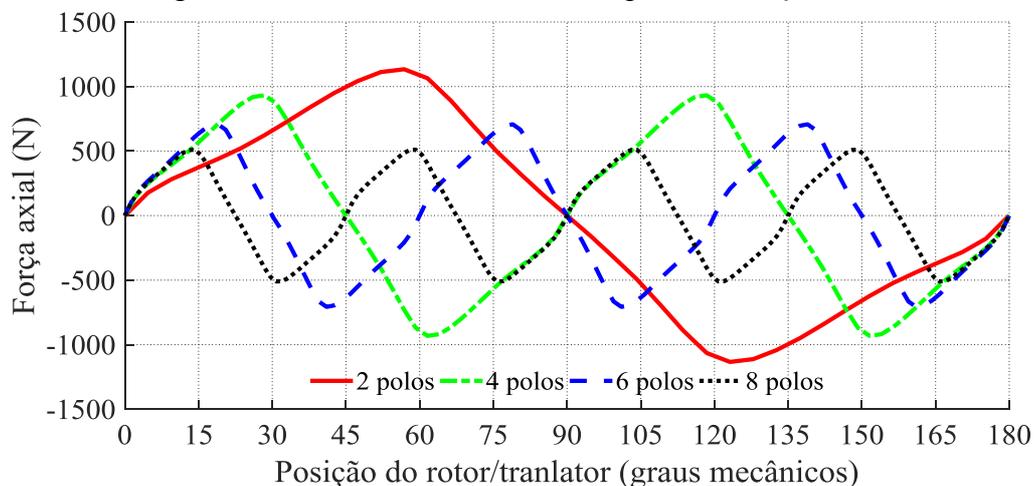
Figura 59 – RBMLS com diferentes números de polos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

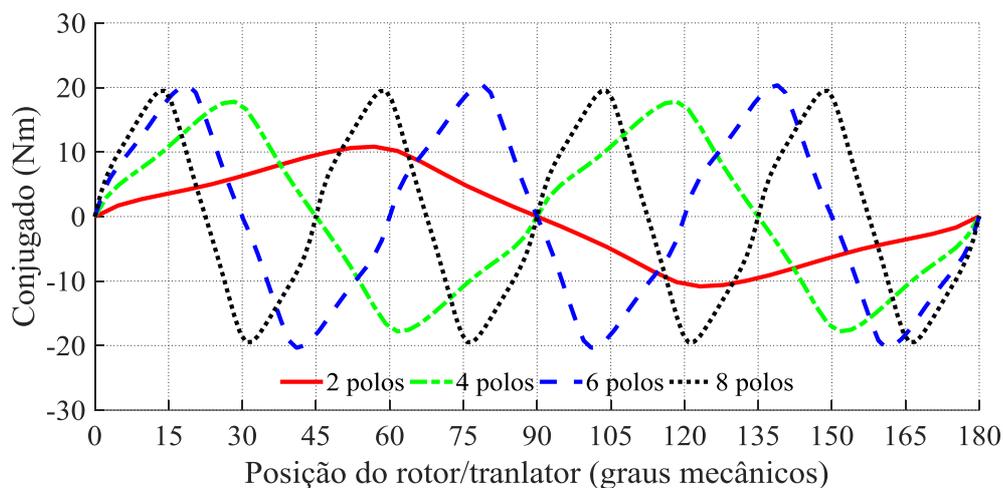
de polos, conforme ilustrado na Figura 59. Enquanto o translator é mantido fixo, o rotor é girado o equivalente a 180° mecânicos. O perfil da força axial e do conjugado produzido pelos RBMLSs com diferentes números de polos estão apresentados na Figura 60 e na Figura 61, respectivamente. Por possuírem diferentes números de polos, quando rotacionado em 180° mecânicos, o resultado em graus elétrico é bem distinto dentre os modelos. Isso tem impacto direto na relação de transmissão do dispositivo. Por exemplo, quando o rotor é girado o equivalente uma volta completa (360° mecânicos), o translator é deslocado linearmente um equivalente ao número de polos vezes o passo polar, ou seja, 60 mm, 120 mm, 180 mm e 240 mm para RBMLSs com 2, 4, 6 e 8 polos, respectivamente.

Figura 60 – Influência do número de polos na força axial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Influência do número de polos no conjugado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A relação de transmissão pode ser obtida pela relação entre a força e o conjugado (104,7, 52,35, 34,76, 26,19 para RBMLSs com 2, 4, 6 e 8 polos, respectivamente). Portanto, quanto menor for o número de polos, maior será a conversão de movimento linear em rotativo.

4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Um estudo de sensibilidade paramétrica foi conduzido com a utilização de dois modelos de elementos finitos, um axissimétrico 2D e um 3D, com a finalidade de avaliar a influência de alguns parâmetros dimensionais e magnéticos na produção de conjugado e máxima força axial. A função objetivo da otimização foi a maior produção de força por unidade volumétrica de ímãs permanentes, em outras palavras, a maximização da utilização dos ímãs permanentes.

Do estudo de sensibilidade realizado acima do modelo axissimétrico 2D puderam ser estimados as melhores dimensões para a espessura dos PMs, encobrimento polar e profundidade das ranhuras do rotor. O modelo 3D foi utilizado para verificar a influência do número de polos e também a influência da utilização de estruturas helicoidais não ideais (grau de discretização). Observou-se que um maior número de polos resulta em uma menor relação de transmissão, portanto, RBMLSs com 2 polos resultam na maior relação de transmissão

possível, sendo indicada para aplicações de alta densidade de força linear. O estudo em função do grau de discretização das estruturas helicoidais apontou que uma redução no conjugado e na força são experimentados quanto mais distante for a estrutura de uma hélice perfeita. Segmentação acima de 24 peças por volta não apresentam grandes variações, indicando que 24 segmentos é um bom grau de discretização a ser adotado. No entanto, composto por 2 estruturas de PMs e duas ferromagnéticas, 24 segmentos por volta por hélice indica um montante de 96 segmentos, o que, do ponto de vista construtivo, foi considerado demasiado complexo. Contudo, foi definido o grau de discretização em 12 segmentos por volta por hélice, reduzindo em 50% o total de peças a serem produzidas na construção do protótipo.

Após a análise numérica dos parâmetros do fuso de relutância variável, as dimensões levadas para a etapa da construção estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros a serem utilizados no protótipo.

| Símbolo | Parâmetro | Valor | Unidade |
|----------------|--|--------------|----------------|
| w_m | Largura dos ímãs | 20 | mm |
| w_t | Largura dos dentes | 10 | mm |
| h_t | Profundidade da ranhura | 10 | mm |
| h_m | Espessura dos ímãs | 10 | mm |
| R_{in} | Raio interno do rotor | 0 | mm |
| R_t | Raio externo do translator | 40 | mm |
| R_r | Raio externo do rotor | 29 | mm |
| R_g | Raio da linha do entreferro | 29,5 | mm |
| g | Comprimento do entreferro | 1 | mm |
| λ | Passo de rosca | 60 | mm |
| L | Comprimento ativo do translator | 70 | mm |
| B_r | Densidade de fluxo remanescente | 1,40 | T |
| H_c | Coercitividade magnética | 950 | kA/m |
| α_p | Encobrimento polar | 2/3 | - |
| τ_p | Passo polar | 30 | Mm |
| - | Número de segmentos por volta por hélice | 12 | - |
| - | Arco por segmento | 30 | ° mec. |
| P | Número de polos | 2 | - |

Fonte: Elaborada pelo autor

5 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO PROTÓTIPO

Este capítulo apresenta os aspectos construtivos do protótipo com base nos valores de projeto estabelecidos no capítulo anterior. Na sequência, são fornecidos também detalhes técnicos relativos à bancada de testes desenvolvida para a realização dos ensaios estáticos.

Tanto o fuso magnético quanto a bancada de testes foram projetados com o apoio do *software* SolidWorks®.

A estrutura magnética e as dimensões do protótipo construído seguem os resultados apresentado na Tabela 5. No entanto, outros detalhes, considerados relevantes para a construção do protótipo, serão apresentados ao longo desta seção.

5.1 RBMLS

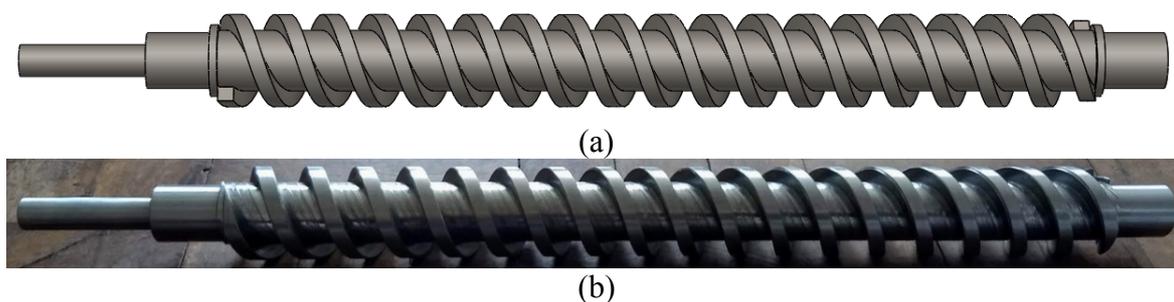
Esta seção incorpora a construção das duas partes que compõem o fuso magnético propostos neste trabalho, ou seja, o translator e o rotor, como indicados na Figura 42.

5.1.1 Rotor

O rotor é formado por uma única peça que se assemelha a um fuso com rosca de dupla entrada e composto de material ferromagnético maciço (aço SAE-AISI 1020). Por não possuir dimensões disponíveis comercialmente, a produção deste componente foi feita sob medida.

O desenho em CAD e o fuso usinado estão apresentados na Figura 62. O comprimento total da peça é de 720 mm, mas o comprimento da parte onde há dentes é de 550 mm. As outras partes sem dentes são reservadas para o acoplamento do rotor aos rolamentos do tipo mancal pedestal e a um dispositivo rotativo para operar o fuso magnético. As principais dimensões da peça estão listadas na Tabela 6. É válido mencionar que o comprimento do rotor pode ser estendido para atender à necessidade da aplicação. Como o protótipo foi desenvolvido para fins experimentais, dimensões laboratorialmente praticáveis foram adotadas.

Figura 62 – Rotor (fuso ferromagnético de dupla entrada): (a) desenho em CAD e (b) foto do rotor usinado em aço SAE-AISI 1020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Principais dimensões do fuso ferromagnético (Rotor).

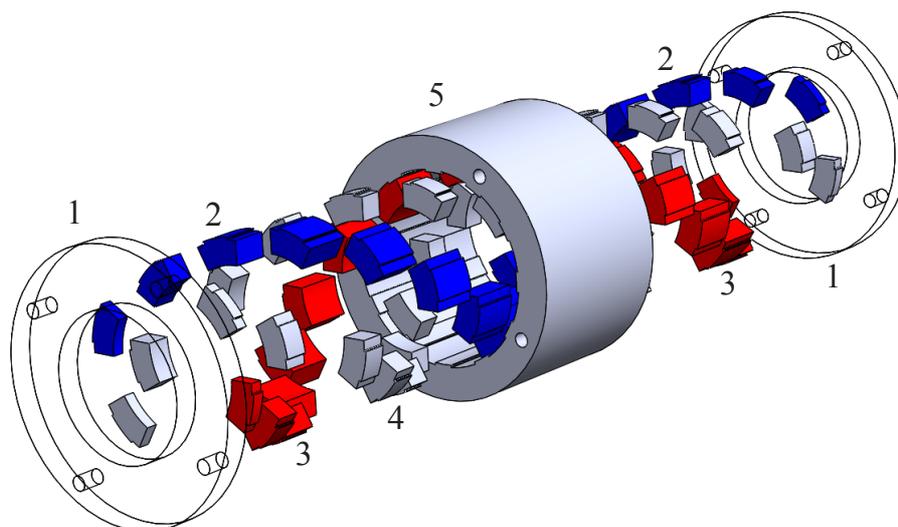
| Descrição do Parâmetro | Valor | Descrição do Parâmetro | Valor |
|---|--------|---------------------------|-------|
| Diâmetro externo | 58 mm | Larguras dos dentes | 10 mm |
| Comprimento da região com dentes (roscas) | 550 mm | Profundidade das ranhuras | 10 mm |
| Comprimento total | 720 mm | Passo da rosca | 60 mm |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 Translator

O translator, Figura 63, é composto por quatro estruturas helicoidais alojadas em um cilindro não ferromagnético (5). De maneira a manter todas as peças juntas, dois discos de acrílico (1) são parafusados nas extremidades. As quatro estruturas helicoidais são formadas por segmentos de arco de 30° cada, arranjados de maneira a se aproximar de hélices ideais. De acordo com a representação da Figura 63, os números 2 e 3 representam as estruturas helicoidais de ímãs permanentes, onde cada cor representa um sentido de magnetização, sendo ambos axialmente magnetizados; as outras duas hélices são semelhantes e compostas de segmentos de arco de material ferromagnético, indicadas pelo número 4. A Tabela 7 apresenta o detalhamento de acordo.

Figura 63 – Vista explodida do desenho em CAD do translator.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Materiais utilizados no translator.

| Parte | Número | Material | Observação |
|-------------------------|--------|-----------------------|--|
| Discos das extremidades | 1 | Acrílico transparente | Escolhido para manter visível o interior do translator |
| Hélices de PMs | 2 e 3 | NdFeB N50 | Dados de caracterização no decorrer desta seção |
| Hélices ferromagnéticas | 4 | Aço SAE-AISI 1020 | - |
| Cilindro de alumínio | 5 | Alumínio 6061 | Somente para fins estruturais |

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2.1 Discos de acrílico (1)

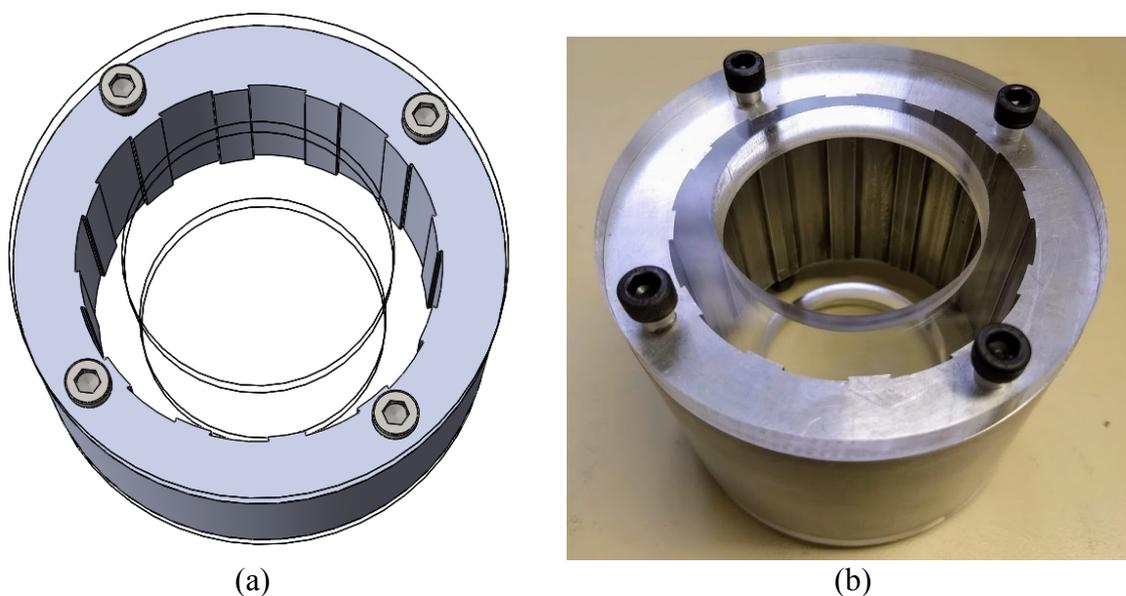
Sem finalidade magnética, somente com a função de proteger os ímãs permanentes contra possíveis choques mecânicos, o acrílico transparente foi escolhido por motivos estéticos, possibilitando a visualização das estruturas localizadas no interior do translator, Figura 64 (a).

5.1.2.2 Cilindro de alumínio (5)

O cilindro externo de alumínio também não tem finalidade magnética, somente estrutural. Esse componente não deve ser de material ferromagnético em função do tipo de magnetização dos ímãs permanentes. Em topologias de fusos magnéticos radialmente magnetizados é desejável a presença de uma culatra ferromagnética no exterior dos ímãs

permanentes para que o caminho magnético seja por ela fechado com um caminho de baixa relutância magnética. No entanto, em topologias com ímãs axialmente magnetizados, a existência de uma culatra ferromagnética no exterior do translator faria com que boa parte do fluxo magnético produzido pelos PMs fechasse o circuito magnético pela culatra, ao invés de ser direcionado para o entreferro. Portanto, para se evitar esse curto-circuito magnético, uma estrutura não ferromagnética se faz necessária. Optou-se pela utilização de alumínio em função da possibilidade deste ser cortado na geometria desejada utilizando a tecnologia de eletroerosão a fio⁷, disponível no LMEAE, e pela leveza e pela rigidez estrutural adequada. Uma montagem contendo os discos de acrílico parafusados no cilindro de alumínio pode ser visualizada na Figura 64. O cilindro de alumínio apresenta diversos sulcos no interior. Estes sulcos possuem geometria do tipo rabo de andorinha, e neles são encaixados os ímãs permanentes e os segmentos de material ferromagnético.

Figura 64 – Partes estruturais do translator: (a) desenho em CAD e (b) foto do cilindro de alumínio e dos discos de acrílico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

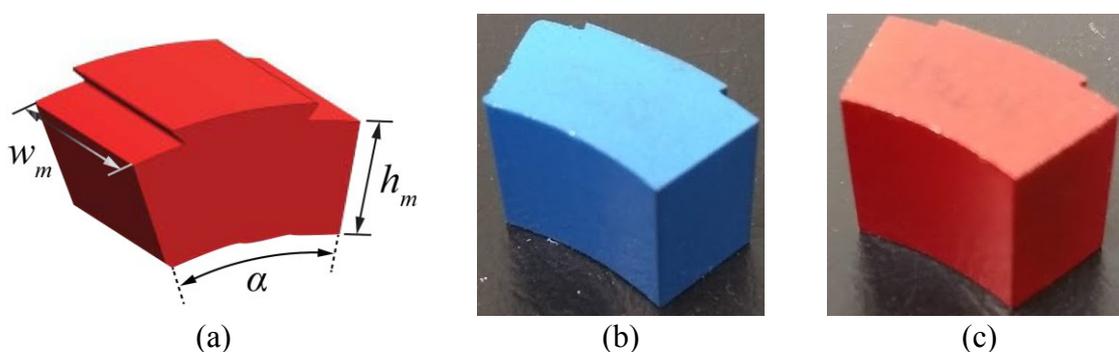
⁷ Eletroerosão a fio modelo FANUC ROBOCUT α -OiD.

5.1.2.3 PMs (2) e (3)

O processo de confecção dos ímãs permanentes começou pela aquisição de blocos de neodímio-ferro-boro sinterizado (NdFeB grade N50), desmagnetizados. Mais uma vez, a geometria final dos ímãs permanentes utilizados no protótipo foi customizada, portanto, os blocos retangulares precisaram passar por uma série de cortes utilizando a tecnologia de eletroerosão a fio até atingirem a geometria desejada, Figura 65. A pintura dos ímãs mostrados na Figura 65 tem caráter meramente ilustrativo e não é mantida na montagem final do RBMLS. As principais dimensões dos arcos de ímãs permanentes estão listadas na Tabela 8.

A Figura 66 ilustra o processo da confecção dos segmentos de PMs. Em (a), um bloco com 20 mm de espessura na direção de magnetização dos ímãs é extraído do bloco inicial (dimensões de 24,4 x 24,5 x 50,8 mm); (b e c) mostram as peças resultantes do primeiro corte. O bloco resultante (c) é então reposicionado de onde 6 segmentos de ímãs com a geometria

Figura 65 – Geometria dos segmentos de ímãs permanentes: (a) desenho em CAD, (b e c) fotos dos segmentos de ímãs pintados em azul e vermelho para indicar alternância no sentido de magnetização.



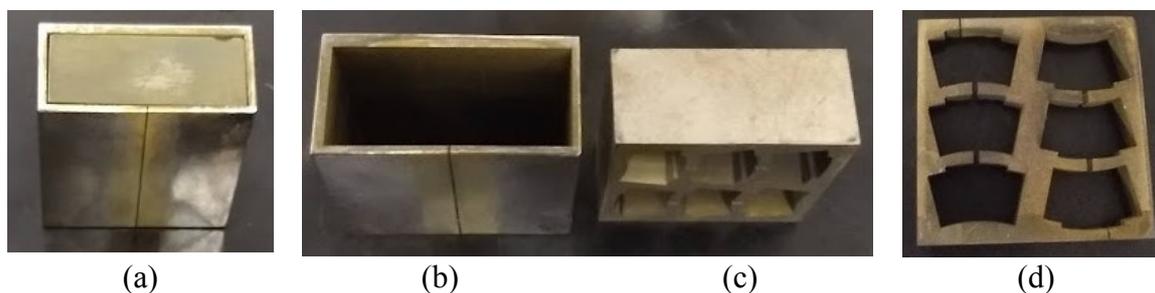
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Dimensões dos ímãs permanentes de acordo com a Figura 65 (a).

| Descrição do Parâmetro | Símbolo | Valor |
|-----------------------------|----------|-------|
| Espessura | h_m | 10 mm |
| Comprimento axial (largura) | w_m | 20 mm |
| Arco | α | 30° |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 66 – Série de cortes para os blocos de ímãs permanentes até a obtenção da geometria final desejada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

final são extraídos (d). O mesmo procedimento é realizado para a confecção de segmentos com diferentes valores para w_m . Um total de 34 segmentos foram confeccionados, conforme discriminado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo da quantidade de ímãs utilizados no protótipo do RBMLS.

| Quantidade | Comprimento axial - w_m |
|------------|---------------------------|
| 4 | 5 mm |
| 4 | 10 mm |
| 4 | 15 mm |
| 22 | 20 mm |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a etapa de corte, os ímãs permanentes foram magnetizados através de um magnetizador⁸ disponível no LMEAE. Para assegurar um bom alinhamento das peças dentro da bobina do magnetizador durante a magnetização, um estojo exibindo o negativo das peças a serem magnetizadas foi produzido em impressora 3D, Figura 67. Uma de cada vez, as peças foram inseridas dentro do estojo e alocadas no interior da bobina do magnetizador.

Para verificar a uniformidade na magnetização apresentada pelos segmentos de ímã permanente, estes são mantidos dentro do estojo e, com a ajuda de um gaussímetro⁹, a

⁸ Magnetizador modelo: X-Series da Magnet-Physik.

⁹ Gaussímetro modelo: FH 54 da Magnet-Physik.

Figura 67 – Estojo para os segmentos de ímã permanentes impresso em impressora 3D.

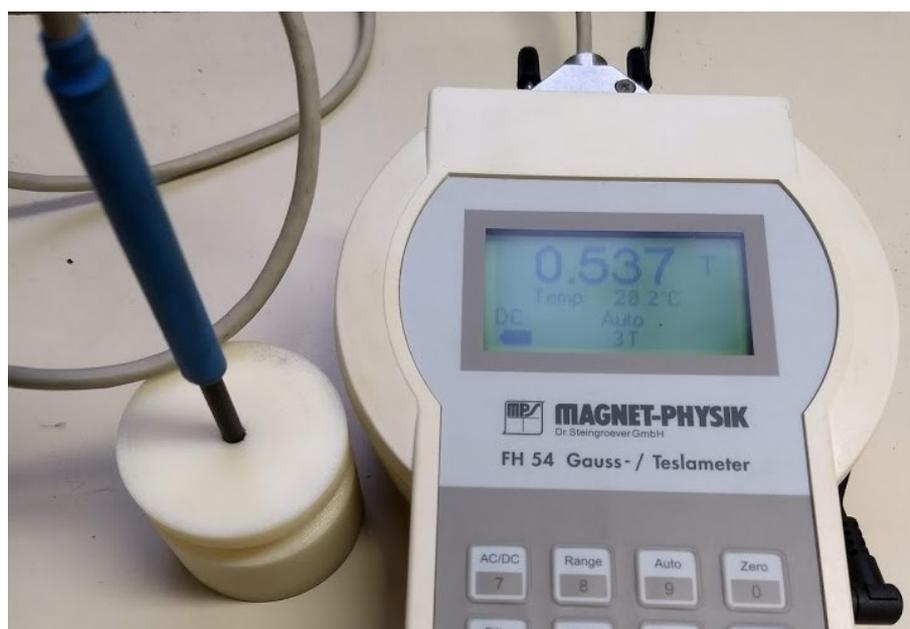


Fonte: Elaborada pelo autor.

densidade de fluxo magnético é medida, Figura 68. As medições de densidades de fluxo para cada segmento utilizado no protótipo estão dispostas na Tabela 10, ao final desta seção.

No período em que a metodologia de projeto do atuador foi desenvolvida, utilizou-se as características dos ímãs permanentes fornecidas por catálogos de fabricantes. No entanto, uma vez que os mesmos estavam disponíveis, pode-se realizar ensaios de caracterização. Para isso, dois cilindros foram cortados do material excedente da etapa de cortes, ambos possuindo

Figura 68 – Verificação da densidade de fluxo magnético.

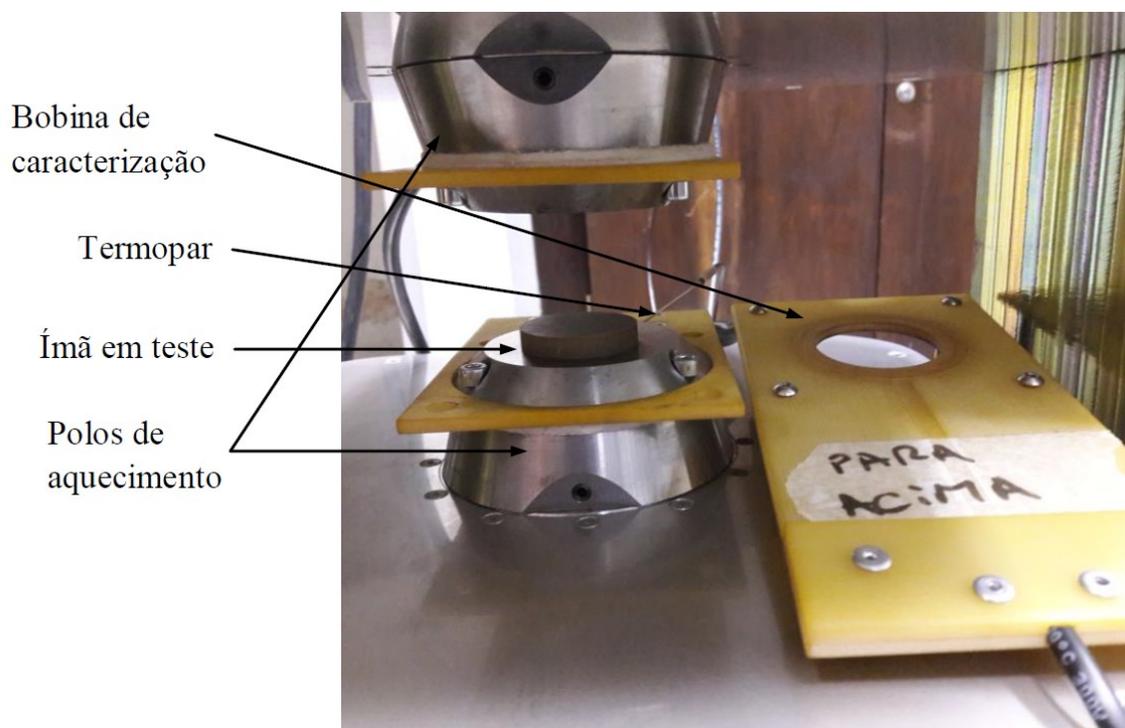


Fonte: Elaborada pelo autor.

30 mm de diâmetro e espessuras de 5,75 mm e 7,5 mm cada. A caracterização dos ímãs permanentes foi realizada com auxílio de um histeresímetro¹⁰, disponível no LMEAE, de acordo com a Figura 69.

Embora exista a possibilidade de realizar caracterizações dos PMs com temperaturas de até 200 °C, entendeu-se que isso seria desnecessário no caso. Por não possuir bobinas, e também pelas temperaturas experimentadas pelo protótipo durante os ensaios, não haveria necessidade de caracterização dos ímãs permanentes em temperaturas superiores a 30°C. Dessa forma, a caracterização foi realizada somente à temperatura ambiente (24,9°C no momento da caracterização). O resultado da caracterização, ou seja, a curva BH no segundo quadrante, na temperatura de 24,9 °C, para os cilindros de 5,75 mm e 7,5 mm estão no APÊNDICE A e no APÊNDICE B, respectivamente. Os valores para a densidade de fluxo remanescente e de coercitividade obtidos foram: $B_r = 1,40$ T e $H_c = 950$ kA/m.

Figura 69 – Instrumento de caracterização utilizado nos ímãs permanentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

¹⁰ Histeresímetro modelo: Permagraph da Magnet Physik,

O *software* de simulações via MEF foi alimentado com os dados dessa caracterização. Todos os resultados numéricos, neste trabalho apresentados, comportam ímãs permanentes modelados conforme os dados obtidos na caracterização apresentada.

Tabela 10 – Dados de densidade de fluxo magnético na superfície dos ímãs permanentes .

| Comprimento axial dos ímãs - w_m (mm) | Densidade de fluxo (mT) | Comprimento axial dos ímãs - w_m (mm) | Densidade de fluxo (mT) |
|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| 5 | 344 | 20 | 566 |
| 5 | 342 | 20 | 573 |
| 5 | 343 | 20 | 567 |
| 5 | 342 | 20 | 566 |
| 10 | 493 | 20 | 575 |
| 10 | 488 | 20 | 570 |
| 10 | 489 | 20 | 571 |
| 10 | 492 | 20 | 569 |
| 15 | 544 | 20 | 570 |
| 15 | 542 | 20 | 574 |
| 15 | 544 | 20 | 575 |
| 15 | 541 | 20 | 578 |
| 20 | 574 | 20 | 572 |
| 20 | 571 | 20 | 571 |
| 20 | 566 | 20 | 567 |
| 20 | 573 | 20 | 584 |
| 20 | 567 | 20 | 574 |

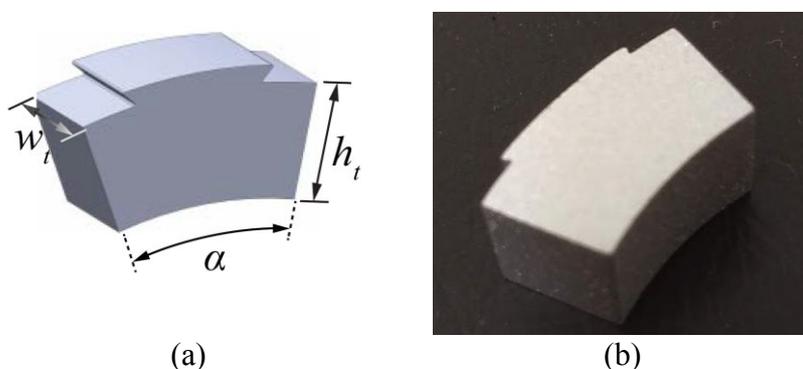
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2.4 Arcos de Fe (4)

Os segmentos de material ferromagnético macio foram fabricados com mesmo aço magnético utilizado no rotor (SAE-AISI 1020). A geometria das peças ferromagnéticas é idêntica à geometria dos segmentos de ímã permanente, sendo que a única diferença

dimensional se dá no sentido axial. Enquanto os ímãs permanentes possuem 20 mm de comprimento axial, com exceção aos localizados nas extremidades do translator, as peças ferromagnéticas possuem 10 mm. O procedimento para a confecção foi realizado com a tecnologia de eletroerosão a fio, onde uma chapa de aço contendo a espessura 10 mm foi cortada em diversas peças com o perfil desejado, Figura 70. Um total de 30 segmentos foram utilizados, 26 de 10 mm de comprimento axial e outros 4 com 5 mm.

Figura 70 – Geometria dos segmentos de material ferromagnético macio: (a) desenho em CAD e (b) fotos do segmento de aço SAE-AISI 1020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Dimensões dos segmentos ferromagnético Figura 70 (a).

| Descrição do Parâmetro | Símbolo | Valor |
|-----------------------------|----------|-------|
| Espessura | h_t | 10 mm |
| Comprimento axial (largura) | w_t | 10 mm |
| Arco | α | 30° |

Fonte: Elaborada pelo autor.

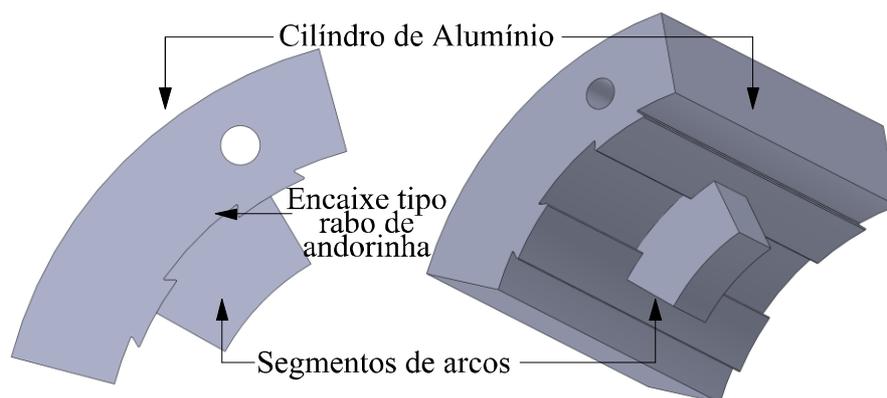
5.1.3 Montagem do Translator

A montagem do translator constitui do encaixe de todos os 34 segmentos de ímãs permanentes mais os 30 segmentos de material ferromagnético macio no interior do cilindro de alumínio. O encaixe do tipo rabo de andorinha presente nos segmentos é alinhado axialmente com o sulco de geometria equivalente presente no cilindro de alumínio e deslizados

até a posição final desejada, Figura 71. Os segmentos de ímãs permanentes e os segmentos de aço são arranjados de maneira a formarem as estruturas helicoidais discretizadas, as quais são responsáveis pela produção do desejado fluxo de formado helicoidal.

Como descrito na seção 4.4, cada segmento de arco é deslocado em relação ao seu vizinho o equivalente a um passo de rosca, λ , dividido pelo número de segmentos por volta na direção axial e radialmente o equivalente a 360° dividido pelo número de segmentos por volta. Como o RBMLS possui 12 segmentos por volta, isso resulta em um deslocamento equivalente a 5 mm na direção axial e 30° na direção radial, de maneira a formar a estrutura da Figura 72.

Figura 71 – Detalhe do encaixe dos segmentos no cilindro de alumínio: (a) detalhes do encaixe tipo rabo de andorinha e (b) foto dos encaixes de dois segmentos de PMs



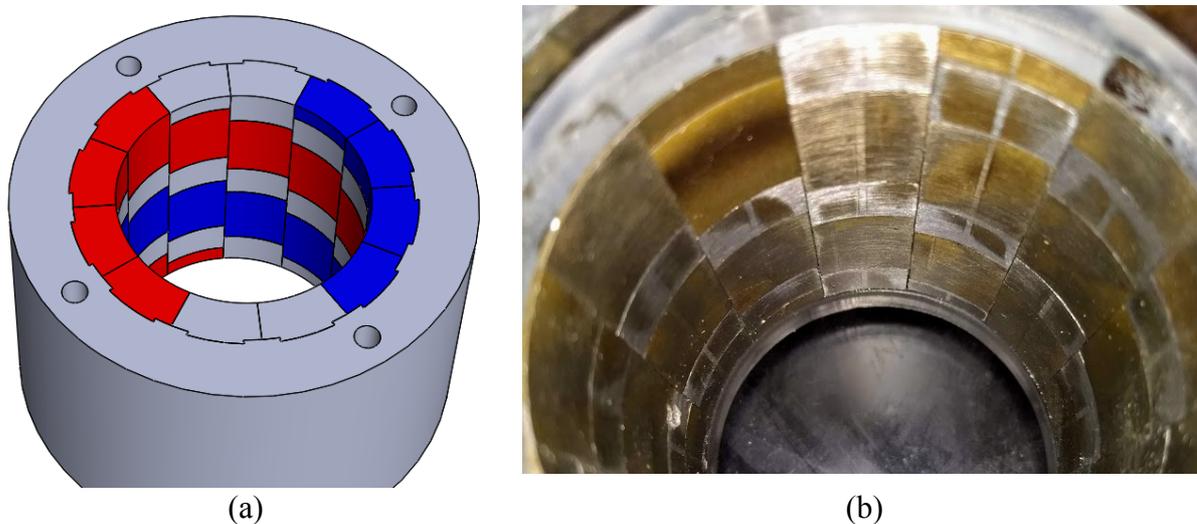
(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

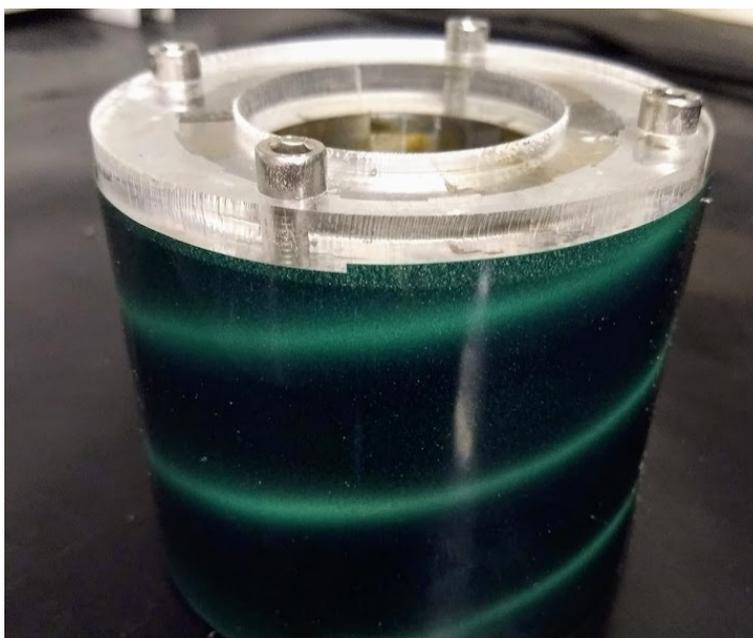
Figura 72 – Detalhes das estruturas helicoidais discretizadas: (a) desenho em CAD e (b) foto do interior do translator contendo as estruturas discretizadas de PMs e aço.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De maneira a verificar a forma do campo magnético resultante produzido pelas estruturas segmentadas ilustradas na Figura 72, um filme magnético é aproximado do translator, revelando a geometria helicoidal do fluxo.

Figura 73 – Campo magnético resultante visualizado com auxílio de um filme magnético.



Fonte: Elaborada pelo autor.

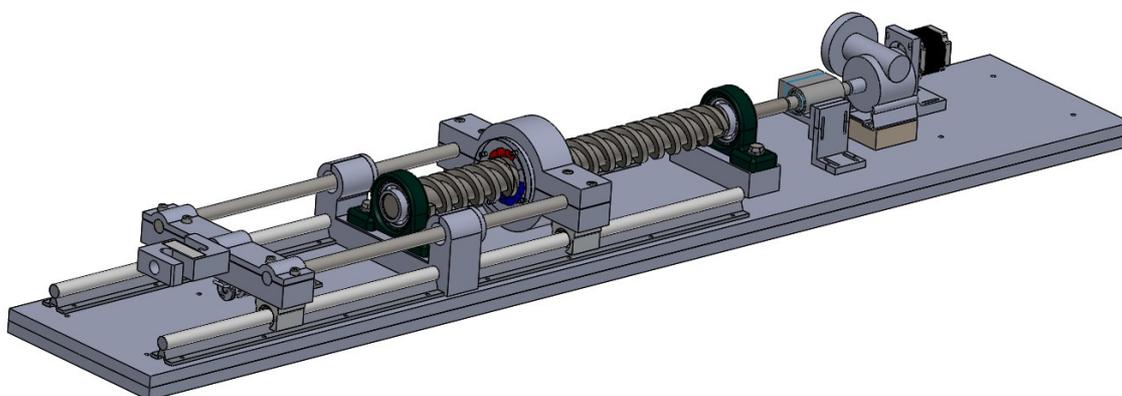
5.2 BANCADA DE TESTES

Para que o protótipo de fuso magnético de relutância variável pudesse ser experimentalmente avaliado, uma bancada de testes foi, primeiramente, projetada em *software* SolidWorks®, Figura 74. A bancada é inteiramente montada em cima de uma plataforma de MDF de dimensões 180 cm x 30 cm.

O rotor, constituído de material ferromagnético sólido, conforme apresentado na seção 5.1.1, é acoplado a dois rolamentos radiais do tipo mancal pedestal, permitindo que este gire livremente em torno de seu próprio eixo, mas com restrição de movimentos nas demais direções. Os rolamentos são fixados em blocos de alumínio de mesma altura para garantir que o rotor fique horizontalmente nivelado.

O tradutor, composto pelo cilindro de alumínio e os 64 segmentos de arco, resultando nas estruturas discretizadas responsáveis pela produção do fluxo magnético helicoidal, conforme apresentado na seção 5.1.2, Figura 64 (b), é fixado por compressão entre duas partes de um flange bipartido de alumínio. O flange, por sua vez disposto acoplado a dois trilhos guia através de rolamentos lineares. Essa configuração possibilita que o tradutor, junto com o flange, se desloque somente na direção axial.

Figura 74 – Desenho em CAD do projeto da bancada de testes para realização dos ensaios do fuso magnético de relutância variável (RBMLS).

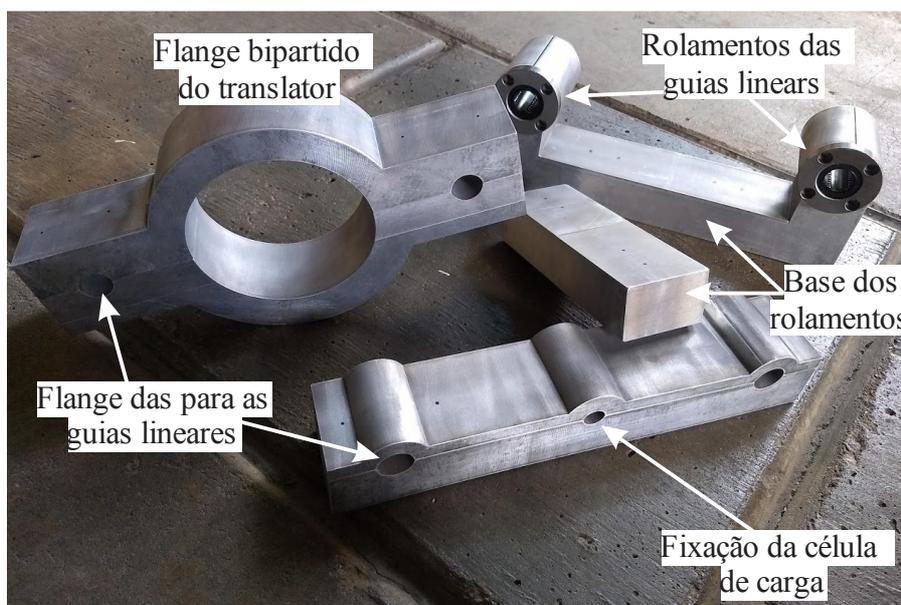


Fonte: Elaborada pelo autor.

Duas guias lineares são responsáveis por auxiliar no alinhamento das partes móveis e também transmitir, axialmente, a força imposta pelo translator até outro flange bipartido de mais fácil acesso. É de uma célula de carga fixada a este segundo flange, chamada de flange externo, que se obtém os dados de força do translator. Por esse motivo, é crucial que o eixo central das guias lineares, do translator e da célula de carga estejam em um mesmo plano horizontal. Além da célula de carga, um transdutor linear também é fixado ao flange externo. Informações de deslocamento linear podem ser obtidas através desse sensor. As peças em alumínio utilizadas na estrutura da bancada estão dispostas na Figura 75.

Na outra extremidade da bancada, um transdutor rotativo é acoplado ao eixo do rotor. Com ele são obtidos os dados de conjugado e de posição angular durante os testes. A operação do fuso magnético é realizada por um motor de passo acoplado a uma caixa de redução de relação 300/1, que é então acoplada ao eixo do rotor. A caixa de redução, além de melhorar a resolução dos experimentos, amplifica o torque do motor de passo, o qual, por si só, seria incapaz de fornecer os valores de torque necessários para a execução dos ensaios.

Figura 75 – Peças de alumínio utilizadas na construção da bancada dedicada aos testes do fuso magnético de relutância variável.



Fonte: Elaborada pelo autor.

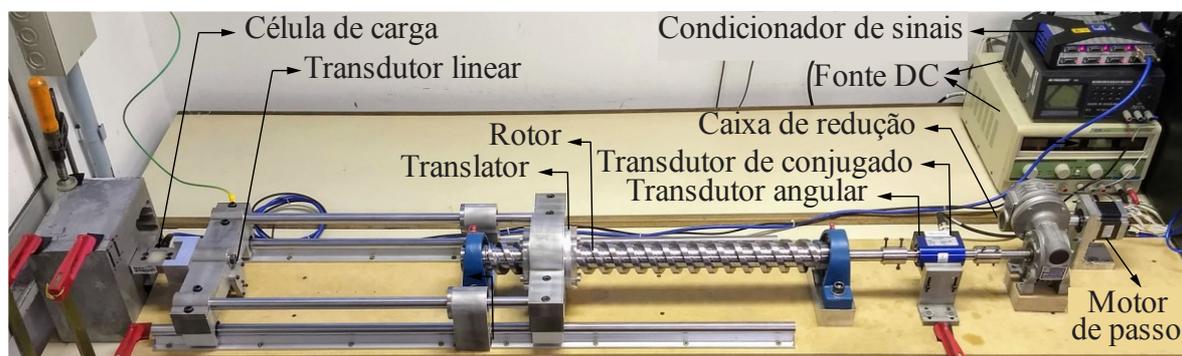
Informações sobre os componentes utilizados para a aquisição dos dados experimentais estão disponíveis na Tabela 12. A maneira como estes componentes estão dispostos, bem como o resultado final da montagem da bancada são apresentados na Figura 76.

Tabela 12 – Especificações dos componentes utilizados na bancada de testes.

| Componente | Modelo | Especificação |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Motor de passo | Minebea - 23KM-C051-09V | 200 passos, 0,99 Nm |
| Transdutor rotativo | Interface T4 | 20 Nm |
| Célula de carga | Reaccion 200 | 200 kg |
| Condicionador de sinais | HBM Quantum X | - |
| Transdutor linear | Renishaw LinACE | Transdutor absoluto |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 76 – Bancada de testes construída para a realização dos procedimentos experimentais no protótipo do fuso magnético de relutância variável (RBMLS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo é reservado para a descrição do sistema de aquisição e para a análise dos dados experimentais do protótipo do fuso magnético de relutância variável construído.

6.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Uma rotina foi programada em linguagem Java, capaz de realizar os ensaios de maneira automatizada. O programa desenvolvido possibilita que os dados sejam obtidos de maneira mais sistemática, eliminando eventuais erros por falha humana. Ainda, um maior número de amostras pode ser obtido, uma vez que o sistema não depende de um usuário presente durante os ensaios.

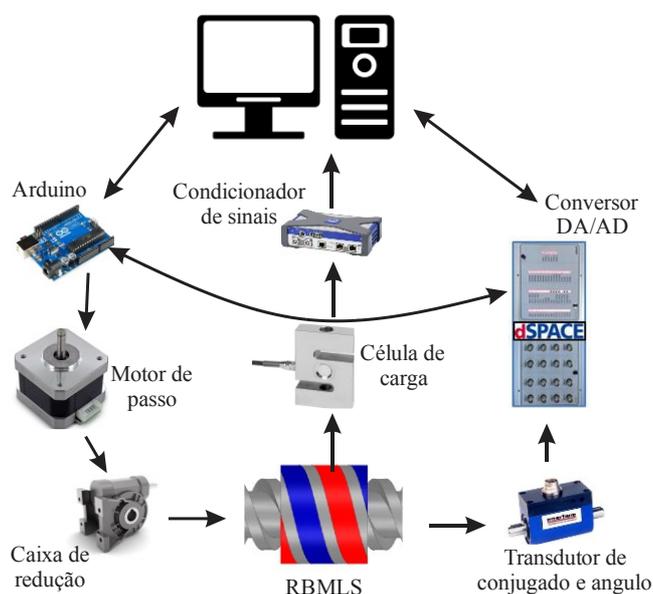
O sistema automatizado engloba um computador onde o programa Java é executado e os dados são armazenados, uma placa Arduino para acionar o servo motor, um condicionador de sinais para os dados de força e um conversor DA/AD par os dados de posição angular e conjugado.

O computador envia um sinal para o Arduino, indicando que está pronto para a leitura dos dados, o Arduino aciona o motor até que o rotor do fuso magnético gire o desejado e os dados são adquiridos durante um intervalo de tempo definido. O processo se repete de forma a obter valores de força e torque para diversas posições angulares do rotor. Um diagrama ilustrando o procedimento é apresentado na Figura 77.

6.2 ENSAIO DE FORÇA E CONJUGADO ESTÁTICOS

Para a obtenção experimental da característica de força e conjugado estático de um fuso magnético, mantém-se fixo o translator enquanto o rotor é girado. Durante o processo, dados de força do translator, posição angular e conjugado do rotor são adquiridos.

Figura 77 – Esquemático da interação entre os principais componentes constituintes da bancada de testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao passo que o rotor é girado e o translator mantido fixo, tanto o conjugado quanto a força axial produzida tenderão a aumentar até um determinado limite. Se o rotor for mantido a girar, chegará um momento que a acoplamento magnético entre os dentes do rotor e os dentes do translator será rompido, fazendo com que os dentes do translator tendam a se alinhar com a próxima estrutura helicoidal do rotor, resultando na inversão do sentido da força e conjugado. Para um fuso magnético de dois polos, esse evento se repete duas vezes para cada volta completa do rotor, existe assim, um pico de força para cada estrutura helicoidal.

Para a caracterização do protótipo, o rotor do RBMLS é girado por intermédio do motor de passo em conjunto com a caixa de redução. O valor em graus mecânicos a ser girado é controlado pelo Arduino. Enquanto isso, a célula de carga localizada no flange externo é parafusada à uma estrutura rígida, impedindo qualquer movimento na direção axial, Figura 76.

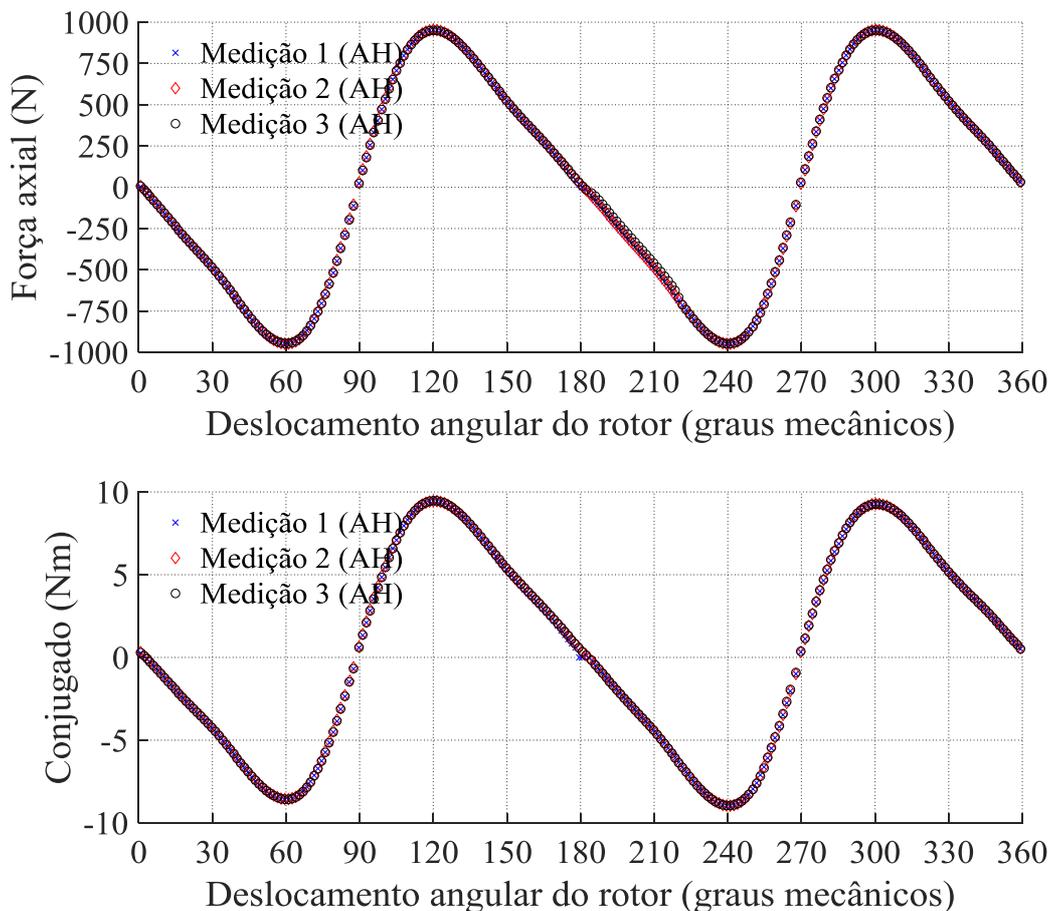
Os ensaios seguiram a metodologia apresentada na seção 6.1, onde foram realizadas 6 baterias de testes. 3 girando o equivalente a 360° do rotor no sentido horário e 3 no sentido anti-horário. O sistema automatizado foi configurado para adquirir dados de força e conjugado

em 240 pontos por revolução, ou seja, com resolução de $1,5^\circ$. Para cada ponto foram adquiridos dados de força e conjugado durante um intervalo de 20 segundos, sendo de 50 Hz a frequência amostral para a força, obtida através da célula de carga, e de 1 kHz para a posição angular e conjugado, provenientes do transdutor rotativo.

Para cada um dos seis ensaios foram calculadas as médias das leituras de força e conjugado para cada um dos 240. As características de força e conjugado para os 6 testes, 3 girando o rotor no sentido horário e 3 no anti-horário, estão dispostos na Figura 78 e Figura 79.

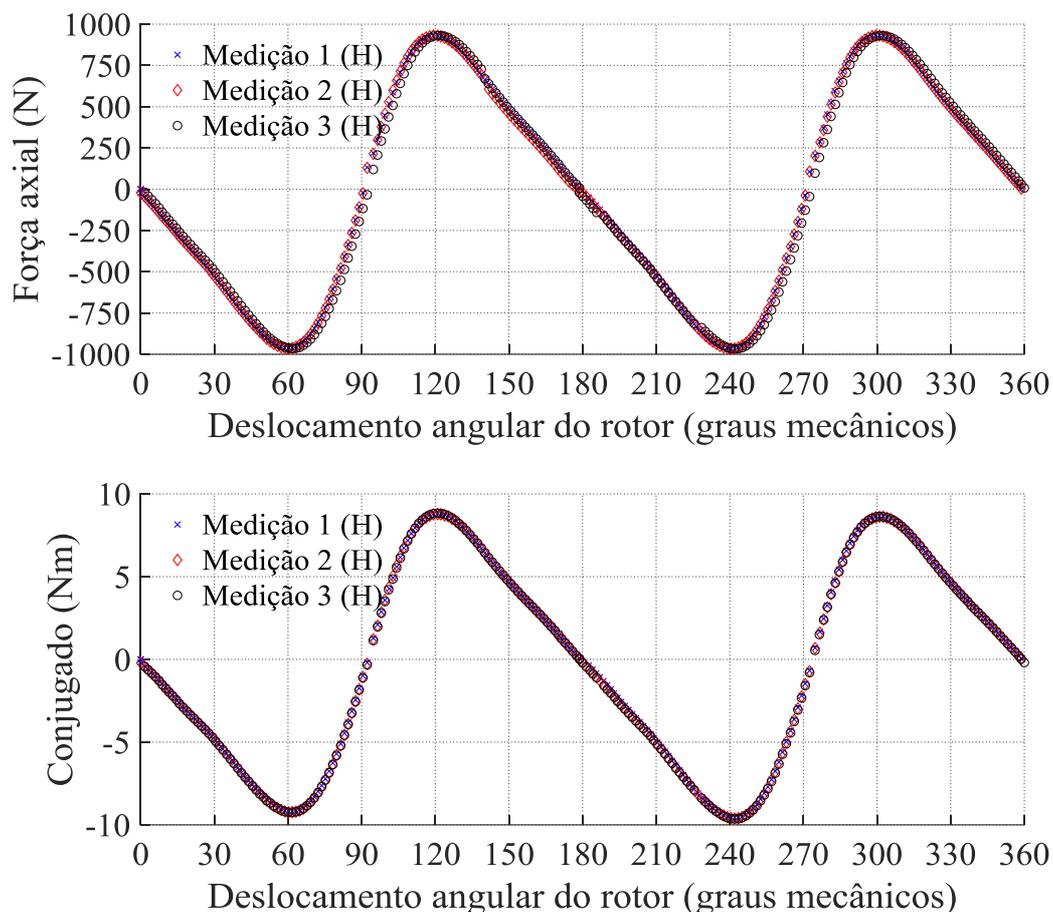
Através dos dados obtidos é possível afirmar que tanto os testes, quanto o comportamento característico da força e do conjugado para o protótipo ensaiado foram bastante consistentes, uma vez que os dados dos ensaios praticamente se sobrepõem.

Figura 78 – Resultados experimentais de 3 ensaios girando o rotor no sentido anti-horário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 79 – Resultados experimentais de 3 ensaios girando o rotor no sentido horário.



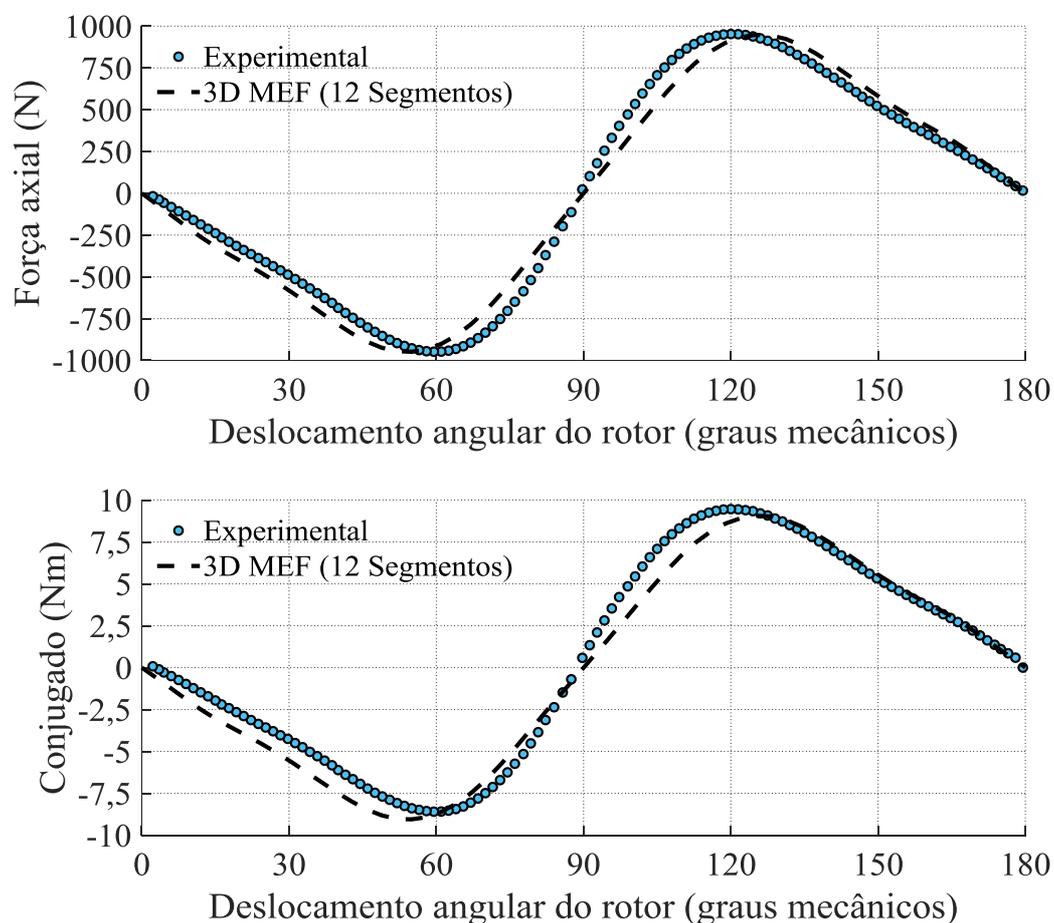
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados experimentais são confrontados com os obtidos numericamente do modelo de EF 3D discretizado em 12 segmentos relatado na seção 4.4.1, equivalente ao protótipo construído e experimentalmente ensaiado apresentando boa concordância. O valor de força máxima estimado pelo modelo 3D de 12 segmentos foi de 948,3 N e para o conjugado 9,06 Nm. O fuso magnético de relutância variável ensaiado apresentou valores de força máxima igual a 952,85 N e conjugado máximo de 9,46 Nm.

As curvas características da força e conjugado para o modelo MEF 3D e para os dados experimentais foram confrontadas na Figura 80. Usaram-se os valores em módulo para fins

comparativo dos dados de máxima força e conjugado, bem como para os valores médios. Um resumo quantitativo é apresentado na Tabela 13.

Figura 80 – Comparativo entre os dados experimentais e os simulados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais para as características de força e conjugado máximos e médios.

| Grandeza | Numérico | Experimental (diferença em relação ao numérico) |
|-----------------------------|----------|--|
| Conjugado máximo (módulo) | 9,06 Nm | 9,46 Nm (4,41 %) |
| Conjugado médio (módulos) | 5,16 Nm | 5,21 Nm (0,97 %) |
| Força axial máxima (módulo) | 948,3 N | 952,85 N (0,48 %) |
| Força axial média (módulos) | 540,4 N | 548,55 N (1,51 %) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar dos resultados experimentais apresentarem apreciável concordância com os resultados estimados via método de elementos finitos, ao se observar as curvas características de conjugado e força apresentadas na Figura 80, é possível perceber que há uma pequena defasagem espacial das grandezas. Para essa diferença foi levantada algumas possíveis causas, porém, aprofundada verificação não foi realizada. Dentre as possíveis causas destacam-se:

- erro na medição proveniente da incorreta calibração dos transdutores de conjugado, força e posição angular.

- entreferros existentes no contato entre cada arco de material ferromagnético. Mecanicamente sempre existirá um pequeno espaço (entreferro) entre cada peça. Esse efeito não foi levado em conta na modelagem numérica.

- excentricidade entre o rotor e o translator no momento da montagem. Apesar da qualidade e robustez estrutural da bancada desenvolvida para os ensaios, as forças de atração, tanto radial quanto axial, são de considerável magnitude. Dessa forma, a existência de pequenos desalinhamentos não pode ser desconsiderada.

- folga mecânica introduzida pela caixa de redução 1:300 utilizada nos ensaios. A característica de força, ao longo de um ciclo completo, apresenta força hora em um sentido, hora em outro. Devido à existência de folga mecânica, no momento da inversão do sentido da força, o perfil característico pode ser afetado (deslocado espacialmente).

6.3 RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO - G

A relação de transmissão para o RBMLS pode ser obtida de duas maneiras: pela relação entre a força axial produzida e o conjugado. Para o protótipo ensaiado, a relação de transmissão foi calculada para cada ponto ensaiado e extraído a mediana do vetor resultante.

$$G = \text{mediana} \left(\frac{F}{T} \right) = 102,73 \text{ m}^{-1}$$

ou ainda, pelos parâmetros dimensionais, conforme Equação (8) e calculado a seguir

$$G = \frac{2\pi}{P\tau_p} = \frac{2\pi}{2 \times 30 \times 10^{-3}} = 104,72 \text{ m}^{-1}$$

Conforme anteriormente apresentado na seção 3.2.2, as duas equações somente irão resultar em um mesmo valor para a taxa de transmissão em fusos magnéticos ideais, onde toda a potência aplicada no eixo do rotor é transferida para o translator ou vice-versa.

Se o sistema for mantido a vazio (sem carga), o rotor e o translator estarão livremente condicionados a manterem os dentes alinhados, nessas condições a taxa de transmissão do deslocamento angular em deslocamento linear será de $104,72 \text{ m}^{-1}$. Contudo, taxa de conversão de conjugado em torque não será a mesma devido às perdas mecânicas da estrutura e magnéticas do fuso magnético.

É possível estimar a eficiência da transmissão de conjugado em força da bancada como um todo através da relação entre a taxa de transmissão alcançada por um fuso ideal ($104,72$) e a taxa de transmissão medida experimentalmente. Obviamente a eficiência do conjunto dependa diretamente da velocidade de operação. Mas, para velocidades muito baixas, esta pode ser estimada por:

$$\eta = \frac{102,73}{104,72} = 98,1\%$$

6.4 CARACTERÍSTICA DE DESLOCAMENTO

Com o translator livre para se deslocar linearmente, foi realizado um ensaio para estimar a resolução de deslocamento angular e linear da bancada de testes. O motor de passo possui resolução de $1,8^\circ$ por passo ($360^\circ/200$). Essa resolução poderia ser elevada com acionamentos de passo fracionado, mas o conjugado do motor seria reduzido. A caixa de redução acoplada aos eixos do motor de passo e do rotor do fuso magnético possui relação de transmissão de

1/300, inferindo que para cada passo do motor, um deslocamento angular de apenas $0,006^\circ$ é realizado pelo rotor do RBMLS. Isso significa que para deslocar o rotor do translator o equivalente a uma volta completa, são necessários 60.000 passos do motor de passo.

O passo de rosca do fuso magnético é de 60 mm –para cada revolução do rotor, o translator é linearmente deslocado o equivalente a 60 mm–. Teoricamente, com o aparato utilizado na bancada de testes, a resolução no deslocamento linear alcançado é de $1\mu\text{m}$ por passo do motor de passo. Um ensaio foi realizado girando o motor de passo de 5 em 5 passo até que o rotor do fuso magnético realizasse um giro de 90° . Os dados adquiridos pelo transdutor linear indicaram deslocamentos constantes de 5 em 5 μm , assegurando constante deslocamento e boa precisão nos ensaios a vazio.

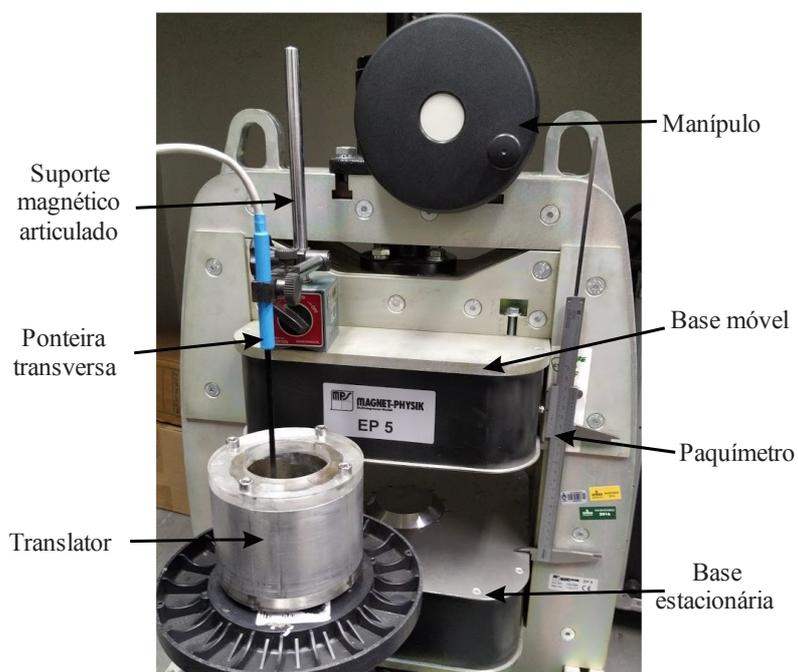
Além de verificar a precisão alcançada pelo RBMLS, esse ensaio também revela verdadeira a relação de transmissão de $104,72\text{ m}^{-1}$ calculada na seção anterior.

Deslocamentos lineares ainda menores poderiam ser realizados alterando o acionamento do motor de passo para passos fracionários, no entanto, a bancada não é equipada com instrumentação capaz de avaliar deslocamentos tão pequenos.

6.5 DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO PRODUZIDO PELOS ÍMÃS PERMANENTES

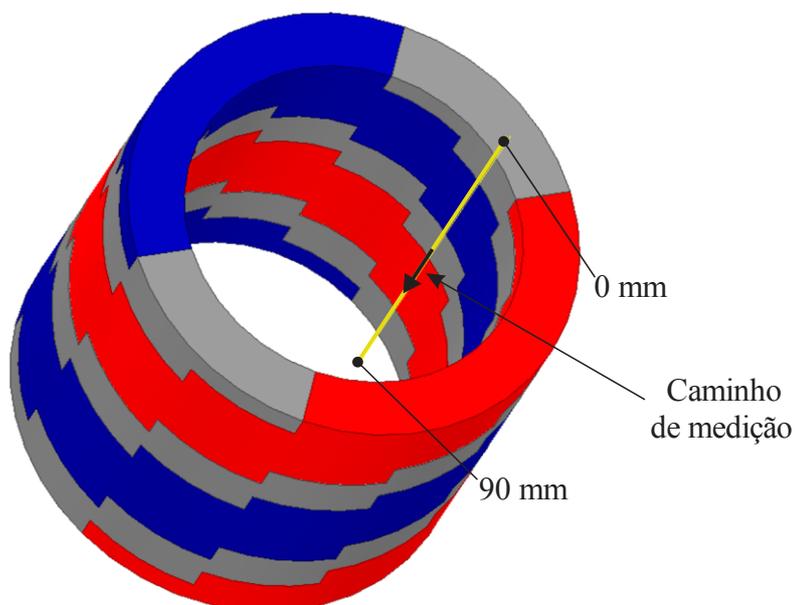
A medição experimental da componente radial da densidade de fluxo magnético foi realizada com uma ponteira transversa de Efeito Hall em um aparato montado conforme mostrado na Figura 81, onde o translator encontra-se isolado do rotor para permitir fácil acesso ao seu interior e assim, realizar as medidas de densidade de fluxo. A ponteira foi posicionada de forma a variar a sua posição axialmente no entreferro magnético médio, isto é, na distância radial de 29,5 mm ao longo do caminho ilustrado na Figura 82. O aparato foi montado em uma estrutura que permite variar a posição da ponteira axialmente por meio de um fuso de esferas ajustável através de um manípulo. A posição da ponteira dentro do entreferro foi medida com

Figura 81 – Aparato para medição da componente radial do fluxo magnético resultante produzida pelos ímãs permanentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 82 – Ilustração do caminho axial de onde os dados da componente radial do fluxo magnético foram obtidas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

um paquímetro fixado entre a base estacionária e a base móvel do equipamento, conforme mostrado na Figura 81. É válido salientar que o histeresímetro foi utilizado exclusivamente

como estrutura de fixação durante as medições.

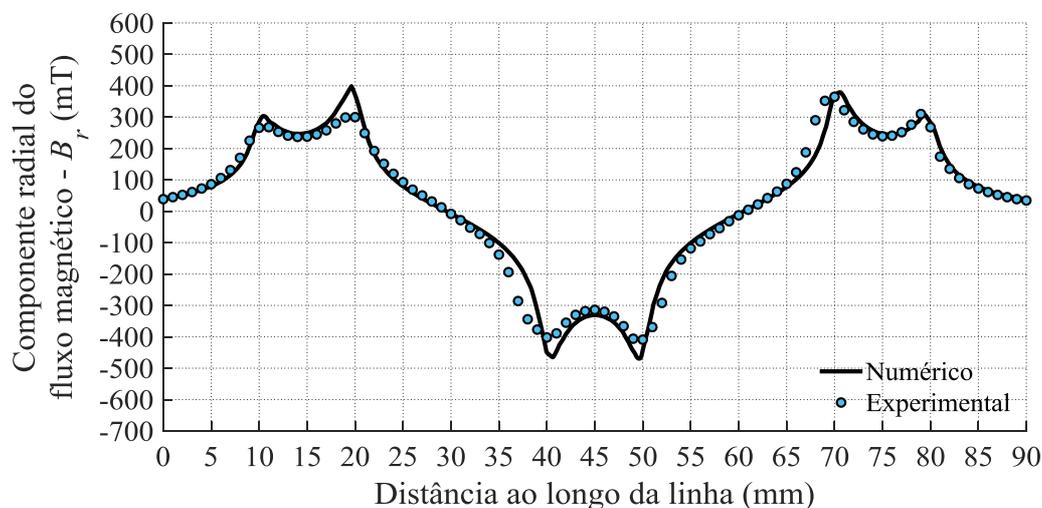
O experimento foi realizado deslocando-se a ponteira de Efeito Hall em passos de 1 mm ao longo da distância axial do translator. O comprimento total do translator é $L = 70$ mm, no entanto, as medições foram feitas ao longo de um caminho com 90 mm de comprimento, de forma a existir um trecho excedente de 10 mm para cada extremidade do translator. Esta medição foi realizada à temperatura ambiente de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Adicionalmente, na Figura 83 são mostradas curvas de densidade de fluxo magnético obtidas a partir do modelo numérico.

Na Figura 83 é possível observar que existe uma boa concordância entre os resultados numéricos e os obtidos experimentalmente da densidade de fluxo magnético, especialmente no que diz respeito ao formato de onda. Uma pequena diferença é observada na amplitude máxima, conforme resumido através da Tabela 14.

Devido ao pequeno comprimento de entreferro, a medição da componente radial no entreferro na presença do rotor não foi possível. As ponteiras disponíveis eram espessas demais para serem inseridas entre o rotor e o translator. Contudo, tendo em vista que os resultados

Figura 83 – Componente radial do fluxo magnético na linha de entreferro sem a presença do rotor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Comparação dos resultados da componente radial do fluxo magnético no entreferro.

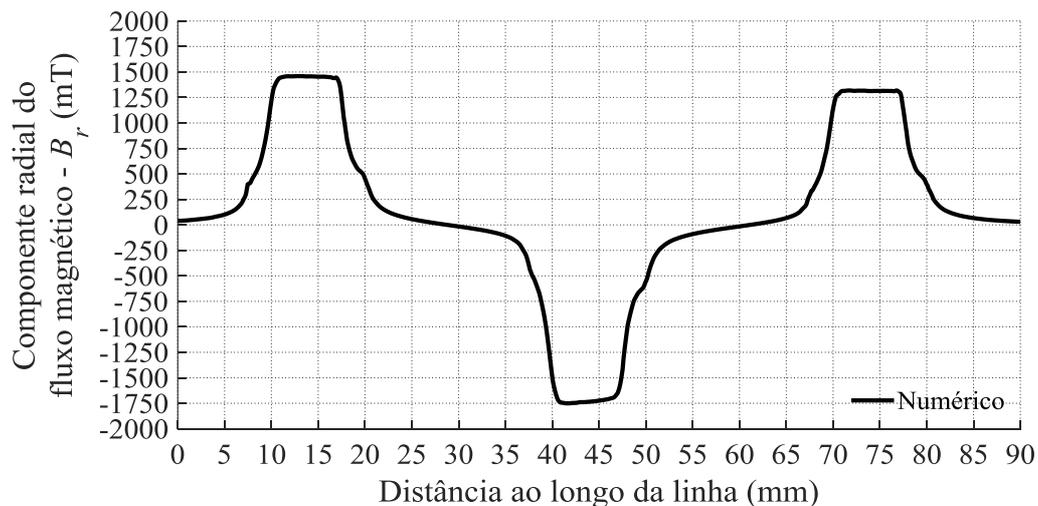
| Grandeza | Numérico | Experimental (diferença em relação ao numérico) |
|------------------------|-----------|--|
| B_r pico | 398,00 mT | 365,00 mT (8,29 %) |
| B_r médio | 37,27 mT | 32,24 mT (13,49 %) |
| B_r médio (absoluto) | 182,80 mT | 185,01 mT (-1,21 %) |

Fonte: Elaborada pelo autor.

obtidos das medições sem o rotor terem sido bastante próximos aos estimados pelo modelo em elementos finitos, pode-se confiar, com certo grau de certeza, que os valores estimados pelo modelo 3D, agora com a presença do rotor, estarão de acordo com o real.

A Figura 84 apresenta a componente radial do fluxo magnético ao longo da linha destacada pela Figura 82, desta vez, com a presença do rotor ferromagnético disposto concentricamente no interior do translator e com os dentes perfeitamente alinhados com os do translator.

Figura 84 – Componente radial do fluxo magnético na linha de entreferro na presença do rotor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Um protótipo de fuso magnético de relutância variável, composto por um curto translator, externamente disposto, e um longo rotor, internamente alocado foi experimentalmente avaliado. A característica de força e conjugado foram levantadas com base numa série de ensaios em que o translator foi mantido bloqueado enquanto que o rotor foi girado ao longo do seu próprio eixo. Dados de força e conjugado foram obtidos com auxílio de transdutores.

Um ensaio a vazio foi realizado para avaliar a precisão no deslocamento linear efetuado pelo translator, quando o rotor é girado onde verificou-se que o RBMLS apresenta elevada precisão no deslocamento linear.

A componente de fluxo radial no interior do translator, sem a presença do rotor, foi medida ao longo de um caminho axial de 90 mm e comparado com os resultados estimados pelo modelo de MEF 3D apresentando boa concordância. A medição das componentes radiais do fluxo na presença do rotor fora impossibilitada pela pequena dimensão do entreferro, dessa forma, somente os resultados estimados pelo modelo MEF 3D foram disponibilizados.

Os experimentos apresentaram boa concordância com a teoria e com os dados obtidos numericamente, verificando os conceitos acerca dos fusos magnéticos de relutância variável.

7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do histórico, evolução e estado da arte sobre os fusos magnéticos apresentado neste trabalho, foi possível perceber uma carência de conteúdo de cunho científico para as topologias de fusos magnéticos contendo ímãs permanentes axialmente magnetizados.

Também pode-se concluir que, do ponto de vista construtivo, um fator limitante, independentemente do tipo de magnetização atribuído para os ímãs, é enfrentado no processo de fabricação das estruturas responsáveis por produzir o desejado fluxo magnético helicoidal. Até o momento nenhum protótipo foi construído utilizando ímãs permanentes de geometria perfeitamente helicoidal. A confecção de peças nesse formato provou-se demasiadamente complicada e mesmo se atingida, sua magnetização seria impraticável. Dessa forma, soluções foram adotadas para contornar essa barreira construtiva. Algumas soluções foram apresentadas e a mais popular, e também empregada nesse trabalho, é a técnica de discretização das estruturas helicoidais em diversos segmentos. Os efeitos do emprego desta técnica foram avaliados via MEF 3D, onde se constatou que a força e o conjugado máximos resultantes são proporcionais ao nível de discretização das estruturas, quanto mais segmentos por estrutura melhor.

Além da utilização de ímãs permanentes axialmente magnetizados, outro diferencial apresentado pela topologia escolhida é a utilização de PMs somente no translator. Essa característica apresentou vantagens em função da suavidade do perfil de força e conjugado, além de torna-lo indicado para aplicações de longo curso.

O protótipo foi construído seguindo os parâmetros definidos na etapa de projeto. Em seguida, uma bancada de testes foi projetada e construída com a finalidade de viabilizar a aquisição de dados de força e conjugado para o protótipo construído.

Os dados experimentais do perfil da força e conjugado estático proveniente dos ensaios foram confrontados com os previamente adquiridos via MEF e apresentaram boa concordância, especialmente com relação à força axial máxima produzida, apresentando diferenças menores que 1 %, e para conjugados menores que 4,5%.

Os ensaios para avaliar a resolução de deslocamento linear do translator mostraram que os o fuso magnético apresentado nesse trabalho apresenta potencial para aplicações que exijam precisão de movimento linear, tecnologias CNC, por exemplo.

De modo geral, este trabalho contribui para o melhor entendimento do caráter magnético de fusos magnéticos de relutância variável através do estudo da influência que diversos parâmetros construtivos exercem na produção de força e conjugado. Ainda, os modelos numéricos utilizados foram validados experimentalmente provando-se adequados, portanto, similar metodologia pode ser reproduzida em outros trabalhos.

Do ponto de vista prático, tanto a construção do protótipo, quanto a da bancada de ensaios, servem de referência para futuros trabalhos apresentando desenvolvimento de protótipos. Destaque para o método de fixação dos ímãs à culatra de alumínio. O encaixe do tipo rabo de andorinha. Este encaixe garantiu um excelente alinhamento entre os segmentos, dispensou a utilização de cola e ainda facilitou o processo de montagem do translator. Dados mais consistentes e em maior volume são atingidos com o emprego de uma rotina automatizada para a aquisição dos dados experimentais, portanto, se possível, essa prática deve ser adotada.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado, o de construir um protótipo de fuso magnético com topologia inovadora. A inovação consistiu na redução da utilização de ímãs permanentes com a utilização destes em somente uma das partes móveis, neste caso, o translator. A ausência de PMs no rotor possibilitou que este fosse confeccionado em uma única peça maciça de aço e usinado em formato de fuso de dupla entrada em torno CNC, dessa forma, simplificando o processo de construção, fato atrativo para produção em larga escala.

É válido salientar que, mesmo com a ausência de ímãs permanentes em uma das partes, o princípio de funcionamento não foi alterado. Assim, as atrativas e desejadas características ainda se fazem presente. No entanto, devido à diminuição do material ferromagnético duro, responsável pela produção do fluxo magnético, houve redução na força máxima produzida.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

O objetivo deste trabalho foi alcançado, o de projetar e desenvolver um fuso magnético de relutância variável. No entanto, diversos outros trabalhos podem ser continuados a partir daqui, especialmente no que diz respeito a procedimentos experimentais.

- os dados experimentais levantados apresentam as características de conjugado e força estáticas. Portanto, um estudo de teórico e experimental pode ser realizado para a obtenção do comportamento dinâmico do RBMLS;

- juntamente com comportamento dinâmico do dispositivo, um estudo sobre as perdas magnéticas pode ser conduzido;

- o desenvolvimento de um componente dedicado a operar o fuso magnético, incorporando o controle de velocidade, posição linear e angular, conjugado e força;

- a utilização do protótipo construído em uma aplicação específica.

- desenvolvimento de modelo analítico e de projeto com formulação que permita analisar e dimensionar o fuso magnético a partir de suas dimensões e características magnéticas.

- aplicação de um processo de otimização para atingir a melhor configuração para um determinado objetivo, por exemplo, a máxima força produzida.

7.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Até o presente momento, três publicações foram produzidas.

1. Artigo apresentando a topologia desenvolvida e resultados numéricos com o título de “*Design Aspects of a Reluctance-Based Magnetic Lead Screw*”. A ser publicado na IEEE Transactions on Magnetics, (Qualis A2). Disponível para acesso em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8643737>.¹¹
2. Resumo aceito no *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications – LDIA 2019*. Onde as características estáticas do RBMLS foram apresentadas e comparados com os resultados numéricos do trabalho anterior. Com o título de “*Design Aspects and Realization of a Reluctance-Based Magnetic Lead Screw*”. Possibilidade de publicação na *IEEE Transactions on Industry Applications* (Qualis A1).
3. Resumo aceito no *19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering – ISEF 2019* com o título de “*Realization and Experimentally Testing of a Reluctance-Based Magnetic Lead Screw*”. Possibilidade de publicação na *SENSORS* (Qualis A1).

¹¹ Referência: (CIROLINI et al., 2019)

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, B. **Magnetic Screw**. Depositante: Benjamin Andrews. US 1.562.730, 24 nov. 1925. Depósito: 4 May. 1925. Concessão: 24 Nov. 1925. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US1562730?q=1562730>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- BERG, N. I.; HOLM, R. K.; RASMUSSEN, P. O. A novel magnetic lead screw active suspension system for vehicles. *In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION, ECCE, 2014, Pittsburgh, PA. Proceedings [...]* [s. l.]: IEEE, 2014. p. 3139-3146.
- BERG, N. I.; HOLM, R. K.; RASMUSSEN, P. O. Design and test of a novel magnetic lead screw for active suspension system in a vehicle. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM), 2014, Berlin. Proceedings [...]* [s. l.]: IEEE, 2014. p. 470-477.
- BERG, N. I.; HOLM, R. K.; RASMUSSEN, P. O. Theoretical and experimental loss and efficiency studies of a magnetic lead screw. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 51, n. 2, p. 1438–1445, July 2015.
- CIROLINI, M. *et al.* Design aspects of a reluctance-based magnetic lead screw. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2019. (Early Access). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8643737/>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- GERRARD, J.; PAUL, R. J. A. Rectilinear screw-thread reluctance motor. *In: IEE Proceedings (Institution of Electrical Engineers)*, [s. l.], v. 118, n. 11, p. 1575, 1971. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5251911>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- HOLM, R. K. *et al.* Design of a magnetic lead screw for wave energy conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v. 49, n. 6, p. 2699-2708, Nov.-Dec. 2013.
- HOLM, R. K.; BERG, N. I.; RASMUSSEN, P. O. Magnetic design consideration of a Magnetic Lead Screw with Halbach Array. *In: LINEAR DRIVES FOR INDUSTRY APPLICATIONS LDIA, 2015, Aachen. Proceedings [...]* [s. l.], July 2015.
- JENNEY, K.; PAKDELIAN, S. Design and fabrication of the trans-rotary magnetic gear using quasi-halbach arrays. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON), 63., 2018, Washington, DC. Proceedings [...]* New York, IEEE, 2018. p. 450-455.
- JI, J. *et al.* Design and analysis of a halbach magnetized magnetic screw for artificial heart. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 51, n. 11, p. 1–4, Nov. 2015.
- LING, Z. *et al.* Design of a new magnetic screw with discretized PMs. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 1–5, June 2016.
- LING, Z. *et al.* Design and analysis of a new HTS electromagnetic screw. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 53, n. 11, p. 1–4, Nov. 2017.

LING, Z. *et al.* Design optimization and test of a radially magnetized magnetic screw with discretized PMs. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s. l.], v. 65, n. 9, p. 7536–7547, Sept. 2018.

LU, K. *et al.* New helical-shape magnetic pole design for magnetic lead screw enabling structure simplification. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 51, n. 11, p. 1–4, Nov. 2015.

LU, K.; WU, W. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 50, n. 11, p. 1–4, Nov. 2014.

PAKDELIAN, S. Electromagnetic lead screw for potential wave energy application. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego. Proceedings* [...] [s. l.]: IEEE, 2012. p. 1-4.

PAKDELIAN, S. **Trans-rotary magnetic gear for wave energy application**. 2014. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University, Houston, Dec. 2014.

PAKDELIAN, S.; FRANK, N. W.; TOLIYAT, H. A. Analysis and design of the trans-rotary magnetic gear. *In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, Raleigh. Proceedings* [...] [s. l.]:IEEE, 2012. p. 3340–3347.

PAKDELIAN, S.; FRANK, N. W.; TOLIYAT, H. A. Magnetic design aspects of the trans-rotary magnetic gear. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 41–50, 17, Mar. 2015.

PAKDELIAN, S.; TOLIYAT, H. A. Trans-rotary magnetic gear for wave energy applicaion. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING 2012, San Dieg. Proceedings* [...] [s. l.]: IEEE, 2012.

PAKDELIAN, S.; TOLIYAT, H. A. Design aspects of the trans-rotary magnetic gear. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY 2012 (IECON), 38., 2012, Montreal. Proceedings* [...] [s. l.]: IEEE, 2012. p. 1720-1725.

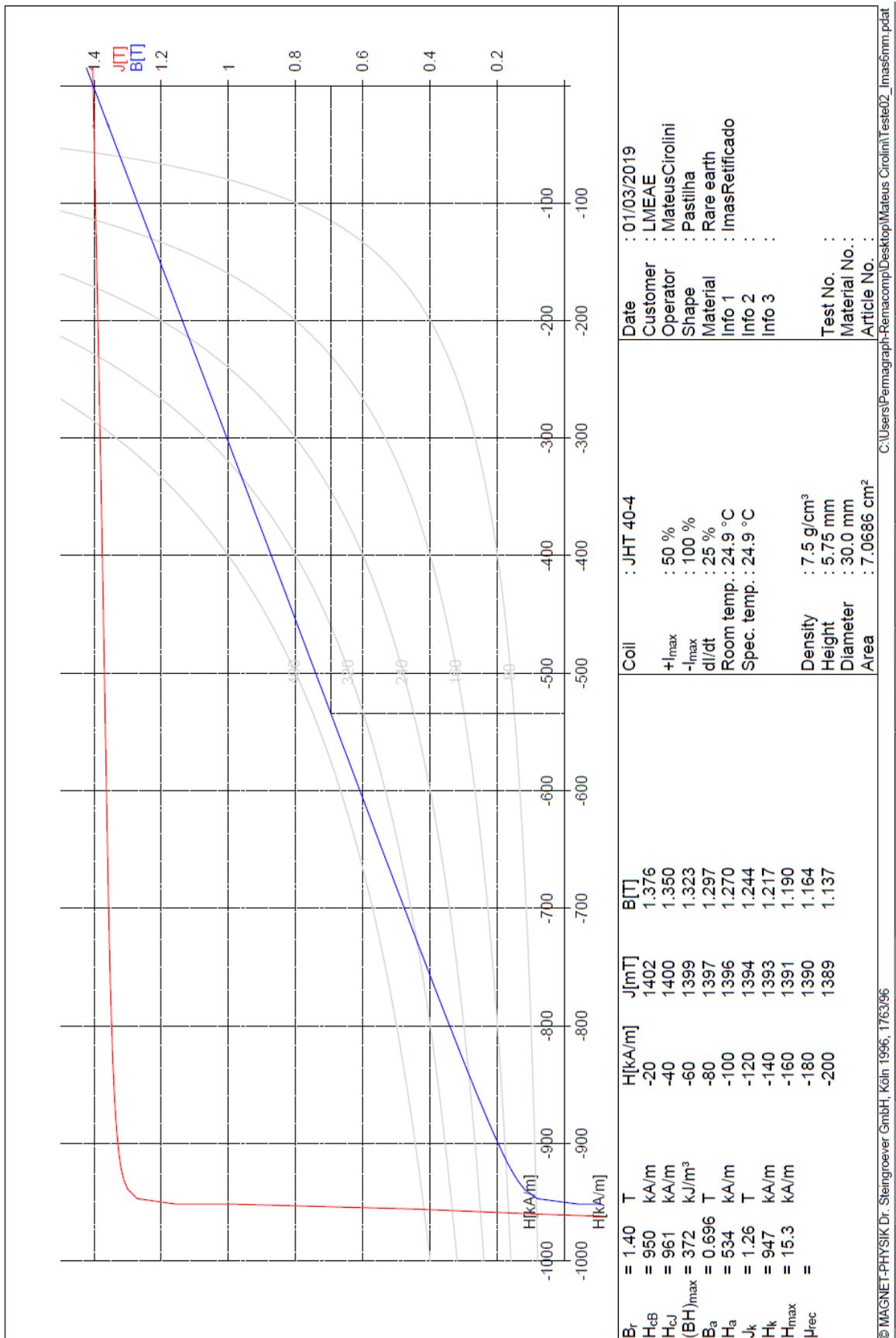
PAUL, R. J. A. Magnetic rotary-to-linear convertor. **IEE Journal on Electric Power Applications**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 115, Nov. 1978.

PAUL, R. J. A. Magnetic rotary-linear or linear-rotary converter. **IEE Journal on Electric Power Applications**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 135-138, Aug. 1979.

TLALI, P. M.; WANG, R.-J.; GERBER, S. Magnetic gear technologies: a review. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM) 2014, Berlin. Proceedings* [...] [s. l.]: IEEE, 2014, p. 544-550

WANG, J.; ATALLAH, K.; WANG, W. Analysis of a magnetic screw for high force density linear electromagnetic actuators. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 47, n. 10, p. 4477–4480, Oct. 2011

APÊNDICE A – Caracterização (Curva BH) correspondente ao ímã permanente de 5,75 mm de espessura.



APÊNDICE B – Caracterização (Curva BH) correspondente ao ímã permanente de 7,50 mm de espessura.

