

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FÁBIO SILVA FIRMO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DIDÁTICO PARA  
DEMONSTRAÇÃO E MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS**

Porto Alegre

2017

FÁBIO SILVA FIRMO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA DEMONSTRAÇÃO E  
MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

Porto Alegre

2017

FÁBIO SILVA FIRMO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA DEMONSTRAÇÃO E  
MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

Orientador

---

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho

Chefe do DELET

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

Paulo Roberto Eckert (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Ály Ferreira Flores Filho (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Ben Hur Bandeira Boff (Eng.) – PPGEE - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Roberto Petry Homrich (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe Elisabete e ao meu tio Francisco de Paula que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos colegas de graduação que compartilharam dos mais diversos momentos da graduação, tornando o curso mais agradável.

Ao colega de graduação e laboratório, Gabriel Crespi Pavão, em especial pelos momentos de descontração durante o decorrer deste trabalho.

Aos professores que a UFRGS me proporcionou, em especial aos do LMEAE.

Ao meu grande amigo e professor Igor Pasa Wiltuschnig, que fez as simulações numéricas do dispositivo alvo deste trabalho.

Ao Professor Dr. Ály Ferreira Flores Filho, que idealizou, propôs, apoiou e buscou maneiras de financiar este trabalho.

Ao amigo, professor e orientador Dr. Paulo Roberto Eckert, pela sua dedicação, experiência e sabedoria ofertada para realização deste trabalho.

Ao Mestrando Ben Hur Bandeira Boff, pela sua contribuição na fase de testes deste trabalho.

À Mestranda Ana Paula Zanatta, pela sua ajuda e contribuição na fase de revisão deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente ajudaram a formar meu caráter.

## RESUMO

Atualmente, os dispositivos de conversão eletromecânica de energia que conhecemos, essencialmente, utilizam energia magnética, seja para fazer conversão de energia elétrica em energia mecânica ou conversão de energia mecânica em energia elétrica. O entendimento dos fenômenos eletromagnéticos envolvidos nos dispositivos de conversão eletromecânica de energia é essencial para formação de profissionais na área eletrotécnica. No âmbito de ensino, estudos mostram que o aprendizado e fixação dos conceitos são melhores quando alunos têm contato com experimentos práticos que permitem visualizar os conceitos teóricos abordados. Portanto, este trabalho tem a finalidade de desenvolver um dispositivo eletromagnético capaz de demonstrar experimentalmente propriedades, fenômenos e características magnéticas de forma clara e direta. O dispositivo foi projetado e um protótipo foi concebido e instrumentado de tal forma que seja possível realizar medições, tais como: força de atração magnética, densidade de fluxo magnético, indutância, fluxo magnético concatenado, tensão induzida etc. Fenômenos como saturação magnética também podem ser demonstrados. Neste trabalho, são apresentadas todas as etapas do projeto, o equacionamento teórico que envolve a determinação de diversas grandezas eletromagnéticas e simulação numérica utilizando o *software* de elementos finitos ANSYS<sup>®</sup>/Maxwell para fins de validação dos resultados experimentais.

Palavras-chave: **Culatra, Ensino, Entreferro, Indução magnética, Fluxo disperso, Força de atração magnética.**

## ABSTRACT

Currently, well-known electromechanical energy conversion devices, essentially, employ magnetic energy, either to convert electric energy in mechanical energy or to convert mechanical energy to electrical energy. Acknowledgment of electromagnetic phenomena related to electromechanical energy conversion machines is indispensable in college journey of electrotechnical engineers and technicians. In the education field, there are researches demonstrating that learning and retention progressions are better achieved when students have contact with practical experiments that permit observation of taught theoretical concepts. Therefore, this document aims to present the development of an electromagnetic device capable of showing magnetic properties, phenomena and characteristics, experimentally, in a clear and straight manner. The device prototype was designed and instrumented in order to facilitate measurement of magnetic attraction force, magnetic flux density, inductance, magnetic flux linkage, induced voltage etc. Additionally, other phenomena as magnetic saturation, for example, can also be visualised. In this work, design process, theoretical equations that describe magnetic quantities, numerical simulations assisted by the finite elements software ANSYS<sup>®</sup>/Maxwell, and experimental results are presented to confirm the proposition.

**Keywords: Teaching, Back-iron; Air-gap, Magnetic induction, Leakage flux, Magnetic attraction force.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dispositivo Eletromecânico para ensino de propriedades magnéticas .....	15
Figura 2 - Antigo dispositivo didático para medição de força de atração magnética no entreferro .....	17
Figura 3 - Núcleo magnético em formato de duplo “E” .....	18
Figura 4 - Fotografias do processo de caracterização do pacote de chapas do núcleo ferromagnético no histeressímetro do LMEAE.....	20
Figura 5 - Curva característica de magnetização inicial do pacote de chapas do núcleo ferromagnético.....	20
Figura 6 - Direção e sentido da força de atração entre as partes ferromagnéticas integrantes do núcleo .....	23
Figura 7 – Balanço energético do sistema .....	23
Figura 8 – Caminhos de integração para determinação da energia magnética.....	24
Figura 9 - Núcleo do antigo dispositivo didático do LMEAE.....	27
Figura 10 – Dimensões do núcleo .....	27
Figura 11 - Equivalente elétrico do circuito magnético .....	28
Figura 12 – Curva B versus i de referência para o teste de saturação magnética.....	31
Figura 13 – Força em função da abertura do entreferro para diferentes correntes.....	32
Figura 14 - Curvas Bxi analítica e numérica, por MEF, para o ensaio de saturação magnética .....	33
Figura 15 – Curvas analíticas e numéricas de força magnética frente a variação do entreferro .....	34
Figura 16 - Protótipo final com peças identificadas .....	36
Figura 17 – Densidade de fluxo magnético por corrente elétrica para entreferro mínimo.....	40
Figura 18 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,2 A .....	41
Figura 19 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,5 A .....	41
Figura 20 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,8 A .....	42
Figura 21 – Densidade de fluxo magnético na culatra central .....	43
Figura 22 – Densidade de fluxo magnético na culatra lateral .....	44

Figura 23 – Bobinas inseridas no núcleo para ensaio de fluxo concatenado .....	45
Figura 24 – Tensão induzida nas bobinas exploratórias.....	46
Figura 25 – Simulação por MEF da Indução magnética no plano central do entreferro para corrente contínua de 0,2 A e diferentes valores de abertura de entreferro .....	47
Figura 26 – Linhas de fluxo magnético e vetores de densidade de fluxo magnético, determinados por MEF .....	47

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Componente para construção e instrumentação do dispositivo.....	19
Tabela 2 – Definições a respeito do núcleo ferromagnético .....	30
Tabela 3 – Peças utilizadas para construção do dispositivo .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$A$	Área
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
$B$	Densidade de fluxo magnético
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
$D$	Deformação mecânica
DDP	Diferença de Potencial
DELET	Departamento de Engenharia Elétrica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
$e$	Força eletromotriz
$\mathcal{F}$	Força Magnetomotriz
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de Potência
$H$	Intensidade de campo magnético
$i$	Corrente elétrica
$L$	Indutância
LMEAE	Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia
MEF	Método de Elementos Finitos
$N$	Número de espiras
$\mathcal{R}$	Relutância magnética
RMS	<i>root mean square</i>
RP	Regime Permanente
$\mathcal{R}_{Eq}$	Relutância magnética equivalente
$\mathcal{R}_f$	Relutância magnética do ferro
$\mathcal{R}_g$	Relutância magnética do entreferro central
$V_{Enrolamento}$	Tensão contínua nos enrolamentos
$V_p$	Tensão aplicada no enrolamento primário, bobinas originais do dispositivo, conectadas em série
$W_{elétrico}$	Energia elétrica
$W_{campo}$	Energia magnética
$W_{mecânico}$	Energia mecânica
$\phi$	Fluxo magnético

$\lambda$

Fluxo concatenado

$\mu_0$

Permeabilidade magnética do ar

$\mu_r$

Permeabilidade magnética do ferro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	15
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	15
1.3 OBJETIVO .....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2. PROJETO DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 PREMISSAS PARA O PROJETO DO DISPOSITIVO .....	17
2.2 EMBASAMENTO TEÓRICO .....	21
2.2.1 EQUACIONAMENTO BÁSICO.....	21
2.2.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA CONTIDA EM UM CAMPO MAGNÉTICO	
22	
2.2.3 DETERMINAÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA A PARTIR DA ENERGIA.....	25
2.3 MODELAGEM ANALÍTICA DO DISPOSITIVO .....	26
2.4 MODELAGEM NUMÉRICA .....	33
<b>3. CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO .....</b>	<b>35</b>
3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO DISPOSITIVO.....	35
3.4 ESTRUTURA MECÂNICA .....	35
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>5. CONCLUSÃO E MELHORIAS FUTURAS.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE A – Desenhos Técnicos .....</b>	<b>50</b>
<b>APÊNDICE B – Curva de calibração da célula de carga SV50 Alfa Instrumentos.....</b>	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os primeiros fenômenos magnéticos percebidos pelo homem ocorreram na Grécia antiga por volta do século VI A.C. pelo filósofo Tales de Mileto, que observou a atração entre pedras, hoje chamadas de magnetita. Os estudos sobre o magnetismo se intensificaram e se tornaram interessantes a partir do século XIII, quando Oesterd, em 1820, observou relação entre a eletricidade e o magnetismo, que ainda eram considerados fenômenos completamente distintos. Depois, James Clerk Maxwell, estabeleceu bases teóricas sobre a relação entre o campo elétrico e o magnético. Consolidando, desde então, a complexa teoria eletromagnética que, em suma, é lecionada, conforme (COSTA, JOSEMBERTO ROSENDO, 2016), de maneira estritamente teórica, como a física em geral, desde o ensino médio.

Segundo (ANOCIBAR, ECKERT, & FLORES FILHO, 2015), existem dificuldades no ensino de alguns conceitos de engenharia elétrica, principalmente quando se trata de eletromagnetismo. Materiais magnéticos como ímãs e materiais ferromagnéticos têm importância em diversas áreas da Engenharia. Então, as propriedades e os fenômenos magnéticos devem ser muito bem compreendidos pelos profissionais e estudantes da área. Atualmente, em função da grande gama de programas computacionais capazes de simular fenômenos magnéticos, o aprendizado acaba se direcionando para simulações computacionais. Assim, os alunos não têm contato prático com experimentos para provar fenômenos e tirar conclusões baseadas em observações.

Desta forma, este trabalho propõe uma maneira efetiva de capturar a atenção dos estudantes a partir de experimentos tradicionais. Conceitos como campo magnético podem ser entendidos, por exemplo, em uma simulação computadorizada e validada em um aparelho didático. Por isto, o presente trabalho tratará do projeto e desenvolvimento do dispositivo experimental, Figura 1. Esse protótipo é capaz de demonstrar alguns fenômenos magnéticos como: Força de atração magnética, fluxo concatenado, densidade de fluxo magnético, saturação magnética, etc. Portanto, auxiliando no ensino, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em disciplinas de Conversão Eletromecânica de Energia I, Projeto de Dispositivos Eletromagnéticos, Métodos de Elementos Finitos, etc.

Figura 1 – Dispositivo Eletromecânico para ensino de propriedades magnéticas



Fonte: Próprio autor.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Devido à relevância das propriedades e fenômenos magnéticos, os estudos e a compreensão dos fundamentos magnéticos tornam-se indispensáveis para qualquer carreira na área eletrotécnica. Portanto, para uma sólida formação, é necessário ter embasamento teórico associado a aulas experimentais com dispositivos que permitam fazer comprovações práticas. Assim, desmistifica-se o assunto fazendo com que o entendimento e a fixação dos conceitos sejam mais fáceis.

### 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo (EDMUND HANSEN, 1990) estudantes memorizam 25% do que eles escutam, 45% do que eles vêem e 70% quando o aprendizado envolve atividades práticas. Portanto, dada a necessidade de complementar o entendimento dos fenômenos magnéticos, percebeu-se a oportunidade de propiciar aos discentes um aparato experimental capaz de demonstrar, de maneira didática, propriedades e fenômenos eletromagnéticos envolvidos nos dispositivos de conversão eletromecânica de energia.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é projetar e construir um dispositivo didático, para os futuros discentes, capaz de demonstrar efeitos magnéticos, tais como: força magnética em relação à abertura de entreferro, indução magnética, indutância, tensão induzida, acoplamento magnético e fenômenos de saturação magnética. Permitindo assim, que se realizem comparações entre modelos matemáticos e simulações computacionais com resultados experimentais.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório, como indicado a seguir:

No Capítulo Dois, são discutidas as condições de trabalho e funcionamento do dispositivo, em função das restrições de projeto e dos recursos disponíveis no laboratório. Neste capítulo é desenvolvido um modelo matemático que serve de base para o projeto do dispositivo. Assim, demonstrar-se-á todo o raciocínio necessário para chegar até à equação que determina a força entre duas faces magnéticas, e outras equações básicas do eletromagnetismo. Também são tratadas as justificadas para a escolha das dimensões físicas e a geometria do núcleo e das chapas magnéticas. Adicionalmente são realizadas simulações através do software *ANSYS/Maxwell*<sup>®</sup> para validar o modelo analítico, assim dando segurança para execução do protótipo.

O Capítulo Três versa sobre aspectos da construção do dispositivo. As especificações mecânicas e a topologia de montagem são abordadas de maneira sucinta. Também são apresentados os sensores e seus periféricos de instrumentação usados na aquisição de dados.

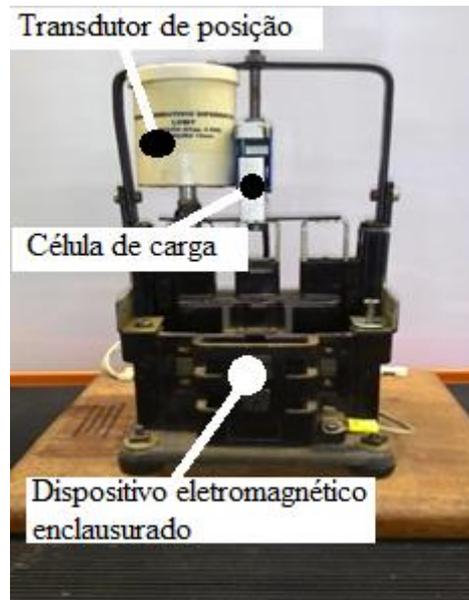
No Capítulo Quatro são mostrados resultados experimentais, realizados no dispositivo projetado, com o intuito de comprovar os resultados apresentados no Capítulo 2.

Por fim, no Capítulo Cinco são apresentadas as principais conclusões do estudo e sugeridas propostas para novos trabalhos.

## 2. PROJETO DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

A premissa do projeto partiu da remodelagem de um antigo dispositivo eletromagnético, Figura 2.

Figura 2 - Antigo dispositivo didático para medição de força de atração magnética no entreferro



Fonte: Próprio autor.

Esse instrumento era usado de maneira didática para o ensino de características magnéticas, na disciplina de Conversão Eletromecânica de Energia I. De maneira rudimentar, foi concebido através da implementação de uma célula de carga e um transdutor de posição linear na estrutura de uma contatora comercial trifásica. O dispositivo tinha diversas limitações ao que tange o ensino sobre dispositivos e grandezas magnéticas, sendo ele, unicamente usado para demonstrações de força de atração magnética em função da abertura do seu entreferro. A partir do novo dispositivo, será possível contemplar de maneira mais ampla o assunto sobre propriedades e fenômenos magnéticos, uma vez que, as características construtivas do novo dispositivo serão conhecidas, diferentemente do apresentado na Figura 2.

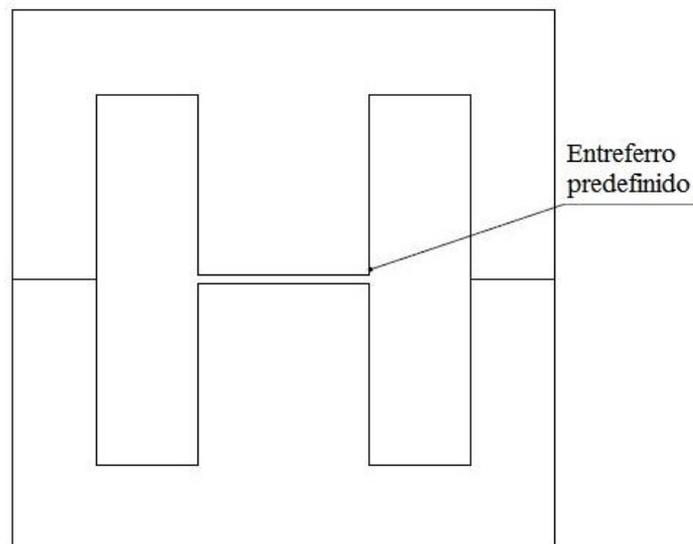
### 2.1 PREMISSAS PARA O PROJETO DO DISPOSITIVO

A primeira etapa do projeto é a definição do formato do núcleo do protótipo. Três topologias foram consideradas: formato de “C” com culatra de fechamento em formato de “I”, formato “E” com culatra oposta em “I” ou duplo “E”. Determinou-se que o núcleo com

configuração de duplo "E", mostrado na Figura 3, é o mais adequado. A escolha deu-se por duas razões:

- (a) essa geometria permite que se possa deixar um entreferro, entre as culatras centrais, para limitar a força de atração magnética, em seu ponto mais crítico, quando as duas partes do núcleo estão no limiar de se encontrar, onde a força é máxima; isso também permite inserção da ponteira do gaussímetro *Hirst GM05* do fabricante *Magnetic Instruments LTD* do LMEAE (Laboratório de Máquinas elétricas, Acionamentos e Energia) para medição da densidade de fluxo magnético no entreferro, assim tornando possível o experimento de saturação magnética através da obtenção da curva de indução magnética versus corrente elétrica;
- (b) partindo dessa geometria também será possível a inserção de mais de uma bobina no sistema, permitindo assim, uma série de testes futuros como fluxo concatenado, tensão induzida em corrente alternada (CA), indutâncias mútuas, etc.

Figura 3 - Núcleo magnético em formato de duplo "E"



Fonte: Próprio autor.

Para viabilização do projeto, observou-se algumas restrições, tais como: limites de trabalho da célula de carga para medição de força, limite do tamanho do entreferro, tensão e corrente máxima da fonte disponível para alimentação, ponto de saturação das chapas magnéticas disponíveis para construção do dispositivo, fio de cobre disponível para construção das bobinas, etc. Na Tabela 1 estão listados os componentes e periféricos disponíveis no laboratório para construção do protótipo.

Tabela 1 - Componente para construção e instrumentação do dispositivo

<b>Componentes e periféricos</b>	<b>Função</b>	<b>Características</b>	<b>Observações</b>
Chapas ferromagnéticas Fabricante: <i>Eperan</i> Modelo: E230-Grão não orientado	Compor o núcleo e conduzir o fluxo magnético.	Saturação magnética em aproximadamente 1,6 T.	Foi obtida a curva inicial de magnetização BxH do material.
Fio esmaltado 24 AWG	Produzir fluxo magnético no núcleo.	Corrente máxima 1,8 A.	Medido experimentalmente Temperatura limite suportada pelos enrolamentos 160 °C.
Célula de carga SV50	Medir a força de atração entre as duas culatras opostas, compostas pelo núcleo.	Carga máxima 50 kgf.	
Fonte de tensão Minipa-MLP-1303M	Aplicar a diferença de potencial nas bobinas para que se estabeleça corrente nas mesmas.	Tensão máxima: 32 V. Corrente máxima: 3 A.	

Fonte: Próprio autor.

Partindo da premissa de que se pretende demonstrar com o protótipo o fenômeno de saturação magnética, é necessário conhecer a curva característica de magnetização inicial do material utilizado no núcleo. Portanto, o material ferromagnético foi caracterizado no histerissímetro *EF5* da *Magnet Physyk*<sup>®</sup> do LMEAE, conforme ilustrado na Figura 4.

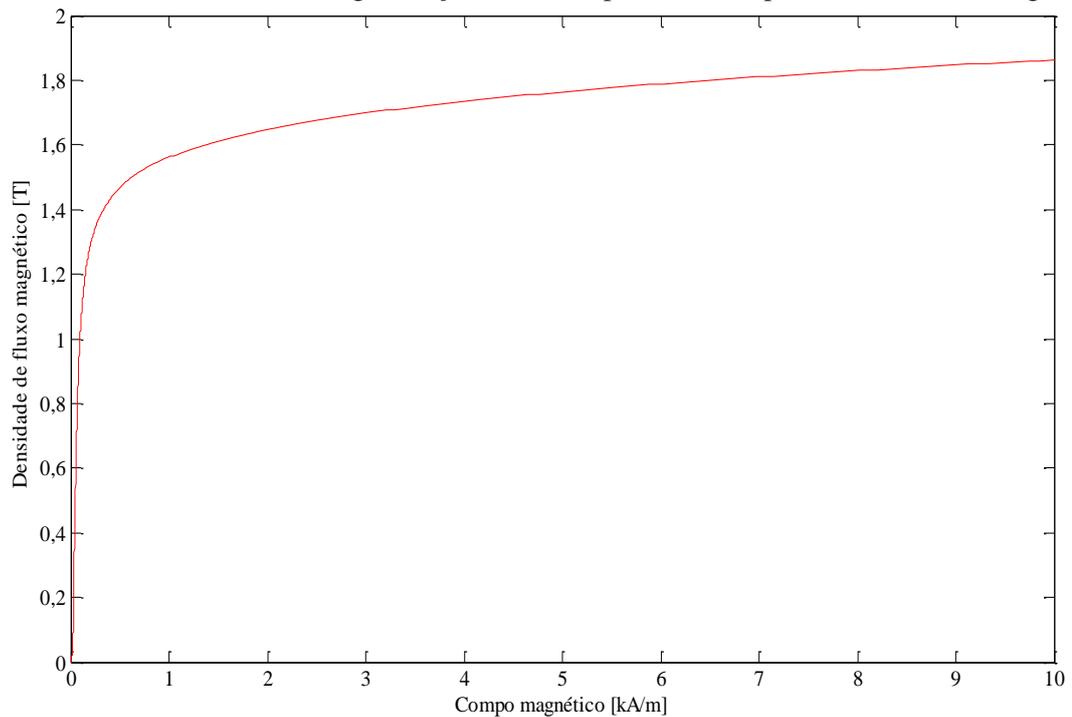
A curva de magnetização inicial do material, mostrada na Figura 5, permite observar que em 1,6 T o material começa a entrar na região de saturação magnética. Até esse ponto, a permeabilidade relativa do material fica em torno de 9000. Para fins de projeto, definiu-se como limite de densidade de fluxo magnético de 1,8 T, pois nesse ponto o fenômeno de saturação magnética é expressivo, e assim o fenômeno pode ser demonstrado experimentalmente de forma clara.

Figura 4 - Fotografias do processo de caracterização do pacote de chapas do núcleo ferromagnético no histeressímetro do LMEAE



Fonte: Próprio autor.

Figura 5 - Curva característica de magnetização inicial do pacote de chapas do núcleo ferromagnético



Fonte: Próprio autor.

As características dos equipamentos e materiais são consideradas para o dimensionamento e projeto do dispositivo. Essas características são empregadas no modelo matemático que descreve o comportamento do dispositivo.

## 2.2 EMBASAMENTO TEÓRICO

O embasamento teórico a respeito do tema deste trabalho é apresentado por meio do desenvolvimento do modelo matemático que representa a força de atração entre as duas culatras do duplo “E”, que compõem o dispositivo. Isso porque as demais variáveis e fenômenos magnéticos que se pretende observar e determinar, tais como: densidade de fluxo magnético, relutância, fluxo concatenado e indutância, precisam ser conhecidos e modelados previamente para determinar a força magnética.

Portanto, inicialmente serão apresentados os fundamentos físicos e matemáticos e na sequência estes são aplicados à modelagem do dispositivo. Neste modelo são considerados conceitos de circuito magnético que são uma analogia com circuitos elétricos, que é um recurso didático bastante utilizado.

### 2.2.1 EQUACIONAMENTO BÁSICO

Segundo (STEPHEN J. CHAPMAN, 2013), uma das equações fundamentais que descreve o comportamento eletromagnético do dispositivo é a Lei de Ampère, que para circuitos magnéticos pode ser escrita como

$$\mathcal{F} = Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

onde  $\mathcal{F}$  é a força magnetomotriz,  $N$  é o número de espiras, “ $i$ ” a corrente elétrica,  $\vec{H}$  é a intensidade de campo magnético e  $\vec{l}$  é o caminho fechado do campo magnético.

Outra relação matemática importante é a Lei de Ohm aplicada a circuitos magnéticos, que é dada por

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad (2)$$

onde  $\phi$  é o fluxo magnético,  $\mathcal{R}$  é a relutância magnética.

Todo o fluxo magnético que é concatenado por uma dada bobina que está em um circuito magnético é

$$\lambda = N\phi \quad (3)$$

Onde  $\lambda$  é o fluxo concatenado.

Uma vez conhecido o fluxo concatenado por uma bobina, é possível determinar a sua indutância  $L$ , ou seja,

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (4)$$

Aplicando-se (1), (2) e (3) em (4) chega-se à equação da indutância de uma bobina em função da relutância equivalente do circuito magnético.

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (5)$$

onde  $\mathcal{R}_{eq}$  é a relutância equivalente do circuito magnético.

O fluxo magnético, por sua vez, também pode ser escrito em função da densidade de fluxo magnético

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (6)$$

onde  $\vec{B}$  é o vetor densidade de fluxo magnético e  $\vec{A}$  é o vetor área da superfície, a qual o fluxo se estabelece.

Para topologias onde o vetor densidade de fluxo magnético é paralelo ao vetor área de uma superfície, tem-se

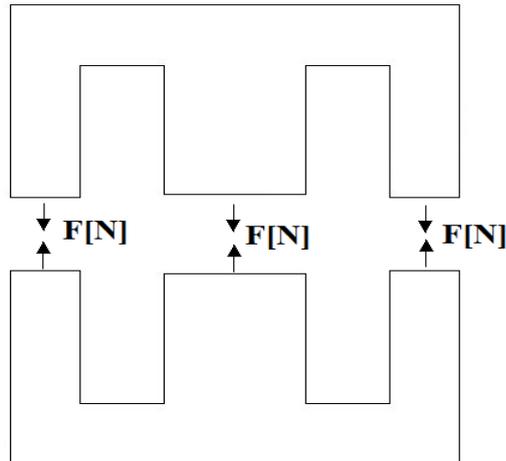
$$B = \frac{\phi}{A} \quad (7)$$

Os conceitos descritos podem ser explorados por meio do dispositivo proposto neste trabalho. Adicionalmente, eles servem de base para a determinação da força magnética.

## 2.2.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA CONTIDA EM UM CAMPO MAGNÉTICO

Conforme (CHARLES KINGSLEY, A. ERNEST FITZGERALD, 2006) e (BIM, 2014), a modelagem do módulo da força magnética de atração, entre as duas partes ferromagnéticas do dispositivo, compostas pelo núcleo, pode ser determinado com base no princípio do balanço energético do sistema. Na Figura 6, pode ser visto a direção e sentido da força que será gerada entre as duas partes ferromagnéticas do dispositivo a ser projetado.

Figura 6 - Direção e sentido da força de atração entre as partes ferromagnéticas integrantes do núcleo



Fonte: Próprio autor.

O balanço energético do sistema pode ser resumido pelo diagrama mostrado na Figura 7. A energia elétrica que adentra os enrolamentos se transforma em energia magnética na parte ferromagnética, em perdas ôhmicas no cobre e na forma de trabalho mecânico, quando há variação de tamanho do entreferro do sistema.

Figura 7 – Balanço energético do sistema

$$\left( \begin{array}{l} \text{Entrada de} \\ \text{energia a partir} \\ \text{de fontes elétricas} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Saída de} \\ \text{energia} \\ \text{mecânica} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Variação da energia} \\ \text{armazenada no campo} \\ \text{magnético} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Energia} \\ \text{convertida} \\ \text{em calor} \end{array} \right)$$

Fonte: Adaptado de (CHARLES KINGSLEY, A. ERNEST FITZGERALD, 2006)

Na equação (8) é representado o sistema exposto pela Figura 7, desconsiderando as perdas ôhmicas, ou isolando as mesmas do sistema de conversão, de maneira a sintetizar o raciocínio matemático.

$$dW_{elétrico} = dW_{campo} + dW_{mecânico} \quad (8)$$

onde  $dW_{elétrico}$ ,  $dW_{campo}$  e  $dW_{mecânico}$  representam o diferencial de energia elétrica de entrada; diferencial de energia magnética no circuito magnético e diferencial de energia mecânica convertida, respectivamente.

A energia elétrica de entrada pode ser determinada da seguinte forma

$$dW_{elétrico} = ei.dt \quad (9)$$

sendo  $e$  a força eletromotriz que está submetido o enrolamento. Esta, por sua vez, pode ser determinada por

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (10)$$

Substituindo (10) em (9) tem-se

$$dW_{elétrico} = i \cdot d\lambda \quad (11)$$

Partindo do princípio básico da física que o trabalho é o produto da força pelo deslocamento

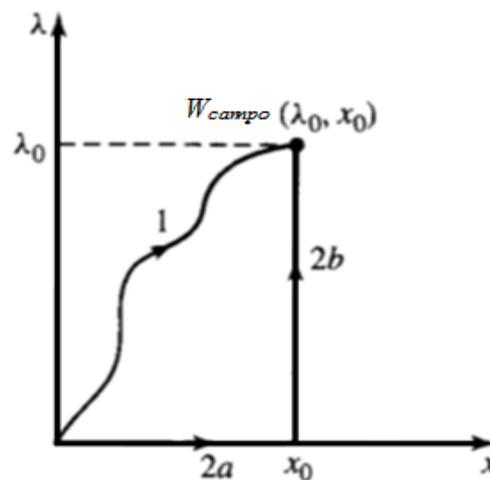
$$dW_{mecânico} = f_{campo} \cdot dx \quad (12)$$

Substituindo (11) e (12) em (8) e reajustando os termos, resulta em

$$dW_{campo} = i \cdot d\lambda - f_{campo} \cdot dx \quad (13)$$

Agora será dado um tratamento mais aprofundado à parcela da energia armazenada no campo magnético,  $W_{campo}$ , contida na equação (13). É entendido que a energia armazenada em formato de campo magnético é uma grandeza dependente exclusivamente das variáveis  $\lambda$  e  $i$ . Independentemente do caminho escolhido para integração, o trabalho realizado entre dois pontos em um sistema conservativo, o resultado é o mesmo. Na Figura 8 são ilustrados dois caminhos diferentes (1 e 2), para chegar no mesmo estado energético  $W_{campo}$ .

Figura 8 – Caminhos de integração para determinação da energia magnética



Fonte: (CHARLES KINGSLEY, A. ERNEST FITZGERALD, 2006).

Assim, a energia magnética armazenada no campo, em função de duas variáveis, para o caminho 2, é

$$W_{campo}(\lambda_0, x_0) = \int_{2a} dW_{campo} + \int_{2b} dW_{campo} \quad (14)$$

A partir da Figura 8, fica claro que o segundo caminho de integração é o mais atrativo para o cálculo, pois neste há variação de um só grandeza por vez, diferentemente da opção do caminho 1. Na etapa 2a,  $d\lambda=0$  e  $f_{campo}=0$ , porque não pode haver força magnética na inexistência de fluxo concatenado; logo, a equação (13) resulta em  $dW_{campo}=0$  para o caminho 2a. Para a próxima etapa, caminho 2b, tem-se  $dx=0$ . Portando, substituindo os resultados da equação (13) em (14) essa se reduz a

$$W_{campo}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0) d\lambda \quad (15)$$

Como

$$\lambda = L(x)i \quad (16)$$

a equação (15) acaba por resultar na energia armazenada em um sistema de campo magnético.

$$W_{campo}(\lambda, x) = \int_0^{\lambda} i(\lambda, x_0) d\lambda = \int_0^{\lambda} \frac{\lambda}{L(x)} d\lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{L(x)} \quad (17)$$

### 2.2.3 DETERMINAÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA A PARTIR DA ENERGIA

Retomando a equação (13), e reescrevendo-a de forma a mostrar que o diferencial de energia no campo é dependente das variáveis  $(\lambda, x)$  tem-se

$$dW_{campo}(\lambda, x) = i.d\lambda - f_{campo}.dx \quad (18)$$

Como o objetivo da análise é obter a força magnética entre as duas partes do núcleo, oriunda da parcela do diferencial de trabalho mecânico  $f_{campo}.dx$ , pode-se utilizar as equações (17) e (18) para isso.

Se na equação (18) a abertura do entreferro  $x$  for mantida constante, tem-se a corrente elétrica dada por

$$i = \left. \frac{\partial W_{campo}}{\partial \lambda} \right|_x \quad (19)$$

Por outro lado, se na equação (18) o fluxo concatenado for mantido constante, tem-se que a força produzida pelo campo é

$$f_{campo} = \left. \frac{\partial W_{campo}}{\partial x} \right|_{\lambda} \quad (20)$$

Uma vez conhecida a energia magnética,  $W_{campo}$ , contida no circuito magnético, conforme a equação (17), a mesma pode ser substituída em (20), e resulta em

$$f_{campo} = - \left. \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{L(x)} \right) \right|_{\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda^2}{L(x)^2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} \quad (21)$$

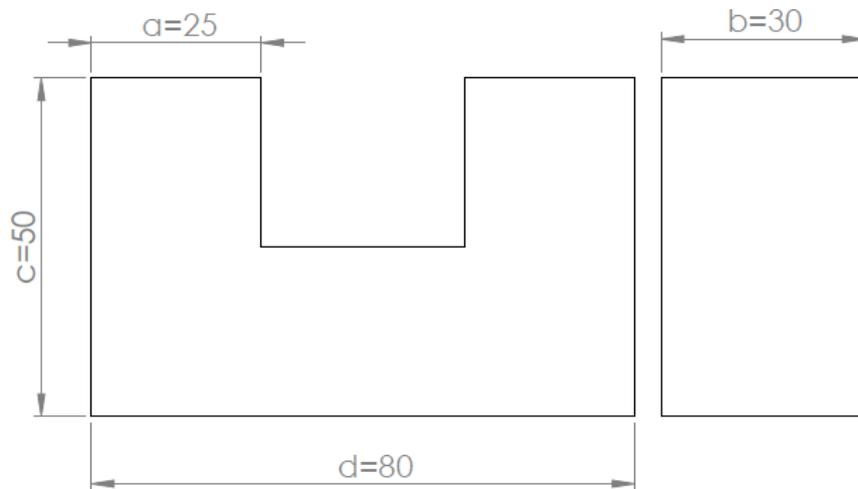
Se o sistema magnético for linear, pode-se fazer substituir o fluxo concatenado em (21) por  $\lambda = L(x)i$ , o que resulta em

$$f_{campo} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (22)$$

### 2.3 MODELAGEM ANALÍTICA DO DISPOSITIVO

Como o objetivo do trabalho é desenvolver um dispositivo didático para demonstrações experimentais, o tamanho físico do dispositivo foi levado em consideração, em todos os momentos do desenvolvimento do protótipo. Essa preocupação deu-se em função de construir um dispositivo o mais atrativo possível para os alunos que futuramente o utilizarão e concomitantemente respeitando outras características de projeto, abordadas no decorrer deste trabalho. Assim sendo, o núcleo magnético foi projetado visando ter dimensões didáticas apropriadas para o ensino. Então, tomou-se como referência, Figura 9, as medidas do núcleo do antigo dispositivo didático do LMEAE já apresentado na Figura 2.

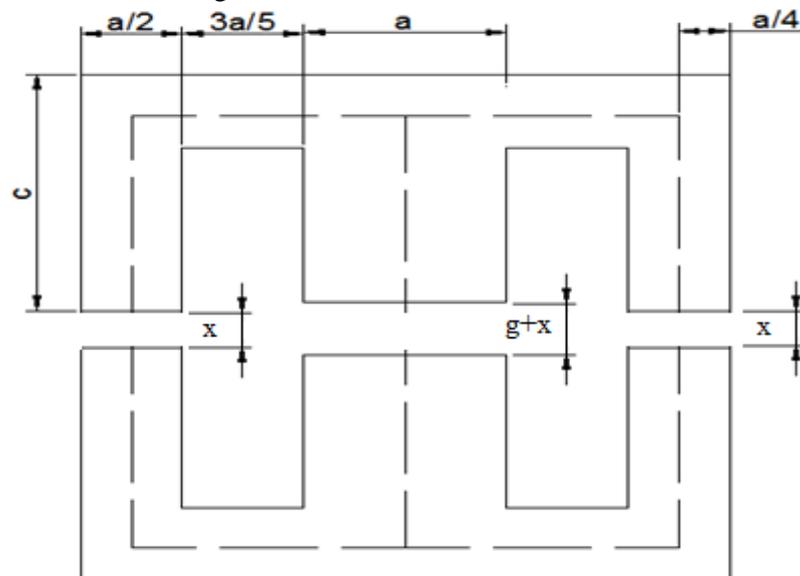
Figura 9 - Núcleo do antigo dispositivo didático do LMEAE



Fonte: Próprio autor.

Partindo das condições dadas na Figura 9 como premissa inicial para modelagem analítica do núcleo, a seguir é desenvolvido o cálculo da relutância equivalente em função da variação do entreferro do circuito magnético. Para auxiliar no dimensionamento, foi desenvolvido um *script* de *MATLAB*®. As dimensões do dispositivo são apresentadas em função das variáveis: “ $a$ ”, largura da parte central; “ $b$ ”, profundidade do pacote de chapas; “ $c$ ”, altura do núcleo e “ $g$ ”, entreferro predefinido. As demais medidas que compõem o núcleo estão em função da variável “ $a$ ” como representado na Figura 10.

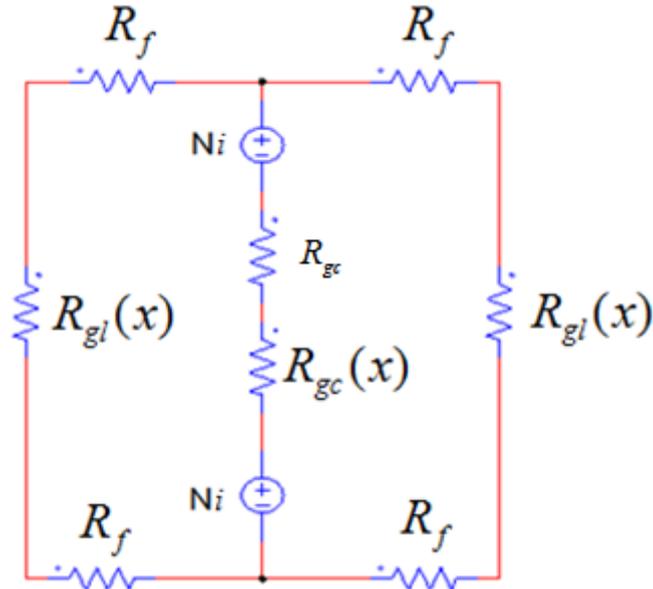
Figura 10 – Dimensões do núcleo



Fonte: Próprio autor.

Para auxiliar na modelagem da relutância magnética de cada um dos elementos do circuito magnético representado na Figura 10, foi feita a conversão do circuito magnético para o seu equivalente elétrico, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Equivalente elétrico do circuito magnético



Fonte: Próprio autor.

Onde,  $R_{gc}$  representa a relutância constante gerada a partir do entreferro de comprimento  $g$  na culatra central,  $R_{gc}(x)$  e  $R_{gi}(x)$  são as relutâncias que são agregadas ao circuito quando se varia o entreferro por meio da variável geométrica  $x$ ,  $R_f$  é relutância no ferro e  $Ni$  é força magnetomotriz. No circuito da Figura 11, já está sendo considerado que há duas bobinas, com força magnetomotriz que produz fluxo de mesma intensidade e na mesma direção.

As relutâncias do circuito magnético da Figura 11 podem ser calculadas da seguinte forma

$$R_{gc} = \frac{g}{\mu_0 \cdot a \cdot c} \quad (23)$$

$$R_{gc}(x) = \frac{x}{\mu_0 \cdot a \cdot c} \quad (24)$$

$$R_{gi}(x) = \frac{1}{2} \frac{x}{\mu_0 \cdot a \cdot c} \quad (25)$$

$$R_f = 2 \frac{2(c - \frac{a}{4}) - \frac{g}{2}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot Ac} = \frac{4c - a - g}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot a \cdot c} \quad (26)$$

$$R_{eq} = 2 \cdot (R_f // R_f) + (R_{gl}(x) // R_{gl}(x)) + R_{gc}(x) + R_{gc}(x) \quad (27)$$

$$R_{eq} = R_f + \frac{R_{gl}(x)}{2} + R_{gc}(x) + R_{gc}(x) \quad (28)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do ferro.

Substituindo (23), (24), (25), e (26) em (28) obtém-se

$$R_{eq} = \frac{10\mu_r x + 3a + 5(c + g(\mu_r - 1))}{5a \cdot b \cdot \mu_0 \mu_r} = \frac{2Ni}{B \cdot a \cdot b} \quad (29)$$

onde,  $R_{eq}$  é a relutância equivalente do circuito magnético. Foi considerado que a seção transversal composta, pelo empilhamento de chapas, é o produto entre as variáveis dimensionais “a” e ”b”, portanto, fator de empilhamento=1.

Como para o ensaio de demonstração do fenômeno de saturação magnética é necessário um  $B$  entre 1,1 T e 1,8 T; e o entreferro predefinido  $g$ , na culatra central ficou definido pela dimensão da ponteira do gaussímetro, isto é, 1,25 mm; as dimensões do núcleo ficariam restritas pela força magnética que seria gerada no dispositivo, e essa força, por sua vez, ficaria limitada pela célula de carga empregada no projeto.

Depois de uma análise feita usando o *software MATLAB*® e a partir das equações (7) e (22) constatou-se que para atender a condição de se trabalhar com  $B$  perto de 1,8 T e com uma força magnética não superior a 50 kgf, seria necessário que o núcleo tivesse seções retangulares de área muito pequenas, tornando assim difícil a construção e a instrumentação do protótipo. A partir dessa condição, optou-se por se fazer o teste de saturação magnética sempre com o entreferro mínimo, onde a força magnética acaba não sendo propagada para célula de carga e usando a máxima corrente elétrica admitida pelo fio, 1,8 A, conforme Tabela 1.

Já para os testes de força deve-se reduzir a corrente nos enrolamentos para que os limites de força fiquem dentro da região de operação da célula de carga. Portanto, a configuração dimensional do núcleo foi adaptada para atender o teste de saturação magnética,

sendo assim, para os demais testes de força será necessário fazer a redução da corrente nos enrolamentos para adequar a força gerada aos limites da célula de carga.

O fluxo magnético na parte central do núcleo pode ser determinado substituindo-se as equações (1) e (29) em (2) o que resulta em

$$\varphi = \frac{Ni.5.a.b.\mu_0.\mu_r}{10\mu_r.x + 3.a + 5.(c + g.(\mu_r - 1))} \quad (30)$$

Com isso, é possível determinar  $B$ , tanto na parte central como na lateral do núcleo, substituindo-se (30) na equação (7), isto é,

$$B = \frac{Ni.5.\mu_0.\mu_r}{10\mu_r.x + 3.a + 5.(c + g.(\mu_r - 1))} \quad (31)$$

A partir da equação (31) e substituindo-se os valores da Tabela 2 foi possível determinar o número de espiras de cada bobina.

Tabela 2 – Definições a respeito do núcleo ferromagnético

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor escolhido</b>	<b>Justificativa</b>
Indução magnética	1,8 T	Ver Tabela 1
Corrente nos enrolamentos	1,8 A	Ver Tabela 1
$\mu_r$	9000	Valor médio da derivada da curva característica de magnetização inicial do material do núcleo
Dimensão “a” da Figura 10	25 mm	Baseando-se nas dimensões do núcleo antigo dispositivo eletromagnético do LMEAE, Figura 9.
Dimensão “b” da Figura 10	30 mm	Baseando-se nas dimensões do núcleo antigo dispositivo eletromagnético do LMEAE, Figura 9.
Dimensão “c” da Figura 10	40 mm	Baseando-se nas dimensões do núcleo antigo dispositivo eletromagnético do LMEAE, Figura 9.
Dimensão “g” da Figura 10	1,25 mm	Medida mínima para inserção da ponteira do gaussímetro.

Fonte: Próprio autor.

Isolando o termo  $N$  da equação (31) e substituindo as outras variáveis pelos valores expostos até este momento, tem-se

$$N = 505 \text{ espiras}$$

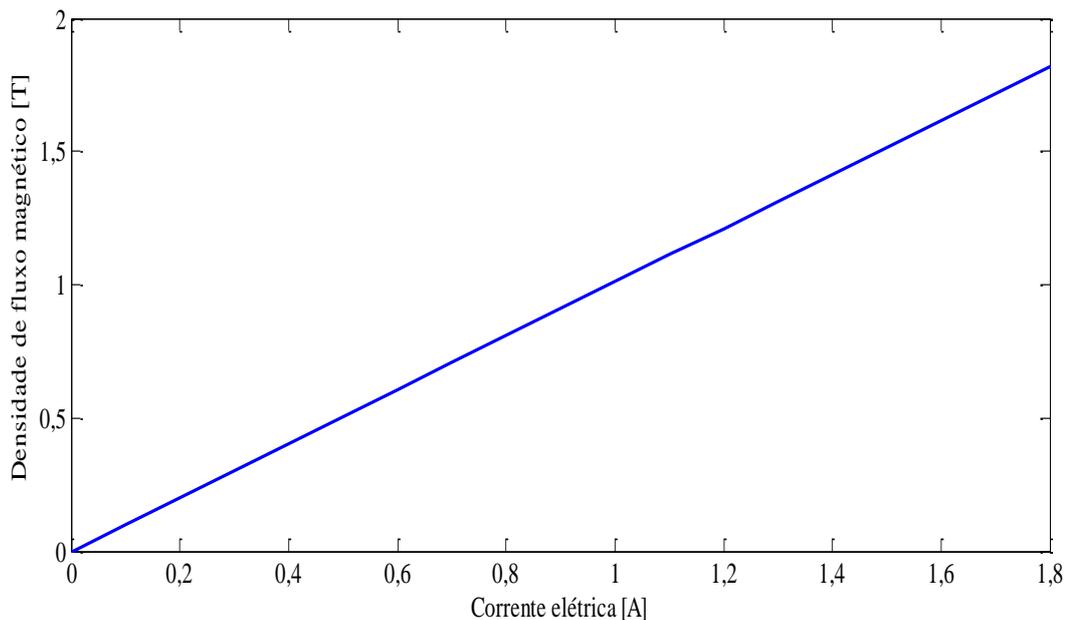
De maneira genérica se chega à equação de  $B$  em função das variáveis  $x$  e  $i$

$$B(x, i) = \frac{6,31 \cdot 10^{-4} i}{x + 6,31 \cdot 10^{-4}} \quad (32)$$

Sabe-se agora que para um dado valor de entreferro, no caso presente adotando-se o valor mínimo de entreferro com  $x=0$ , a curva da Figura 12 representa a densidade de fluxo magnético por corrente do protótipo com  $\mu_r = 9000$ . Essa será a curva de referência para o teste de saturação magnética. Assim sendo:

$$B(x, i) = i \Big|_{x=0} \quad (33)$$

Figura 12 – Curva  $B$  versus  $i$  de referência para o teste de saturação magnética



Fonte: Próprio autor.

Com uma corrente de 1,8 A nas bobinas, é necessário obter a resistência dos enrolamentos. Assim, a partir do caminho médio do enrolamento tem-se:

$$Perímetro_{médio} = 2(a + 3a/5) + 2(b + 3a/5) \quad (34)$$

$$Comprimento_{fio} = Perímetro_{médio} \cdot N / 2 \quad (35)$$

Usando os dados da *American Wire Gauge* (AWG) para o cálculo da resistência elétrica das bobinas

$$Resistência_{elétrica} = Perímetro_{fio} \cdot 84,4/1000 \quad (36)$$

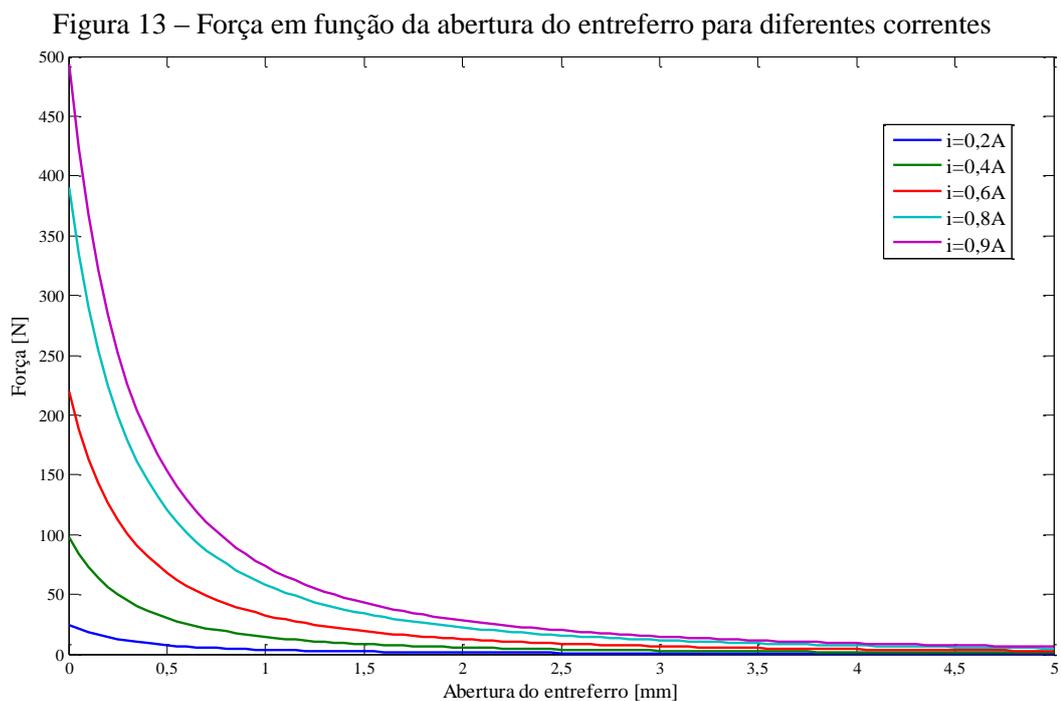
Assim, ainda teoricamente, a resistência dos dois enrolamentos em série será de  $6,24 \Omega$ . Portanto, a tensão contínua por bobina necessária para gerar uma corrente de  $1,8 \text{ A}$  será

$$V_{Enrolamento} = 6,24 \cdot 1,8 = 11,23 \text{ V} \quad (37)$$

Por fim, é necessário definir a corrente máxima nos enrolamentos, quando o dispositivo estiver operando no teste de força magnética; lembrando que neste teste a célula de carga estará sofrendo deformação mecânica. Assim, substituindo as equações (5) e (29) em (22) tem-se

$$F = \frac{2,4035 \cdot 10^{-4} \cdot i^2}{(x + 6,2798 \cdot 10^{-4})^2} \quad (38)$$

Onde  $F$  é a força em newtons produzida pelo dispositivo. A Figura 13 mostra a força magnética produzida pelo dispositivo em função da abertura de seu entreferro, aplicando a equação (38) para diferentes correntes elétricas.



Fonte: Próprio autor.

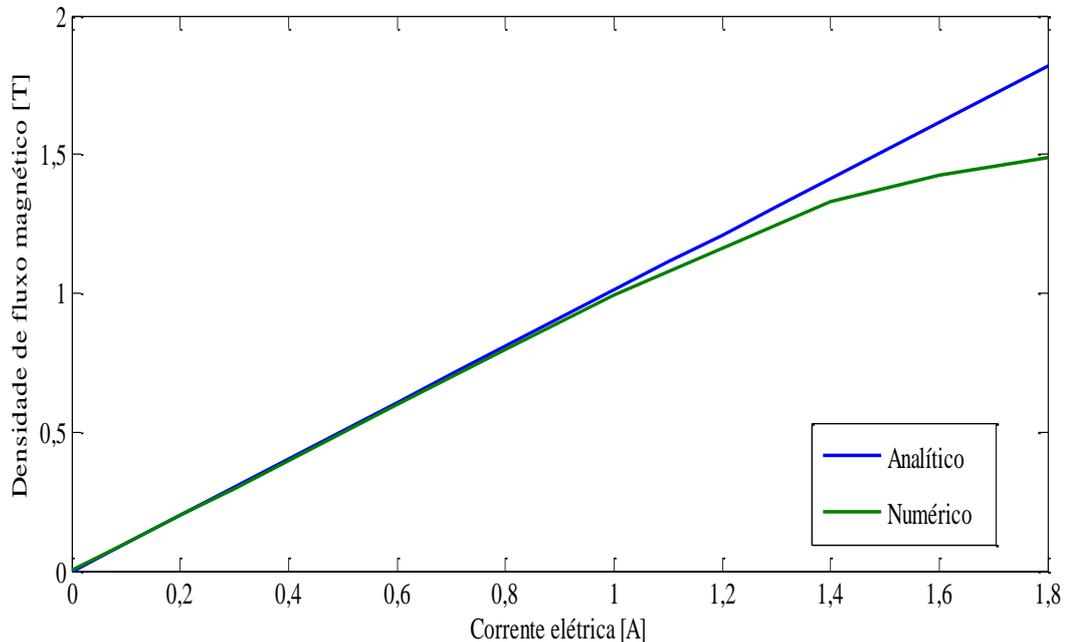
Analisando a Figura 13, nota-se que para uma CC (corrente contínua) de 0,9 A se atinge uma força de aproximadamente 480 N, quase atingindo limite admitido de carga pelo transdutor de força empregado no dispositivo. Por motivos de segurança foi adotada uma CC de 0,8 A, como limite de corrente para os ensaios de força ao se variar o entreferro.

## 2.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Por precaução, antes da execução do protótipo, foi feita uma análise por Método de Elementos Finitos (MEF), usando o *software ANSYS/Maxwell*<sup>®</sup>, com o intuito de comprovar os modelos analíticos para indução magnética e força do dispositivo.

Inicialmente, avaliou-se a relação entre a densidade de fluxo magnético e a corrente elétrica para o dispositivo com  $x=0$  e se comparou os resultados de MEF com os resultados analíticos, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Curvas  $B_{xi}$  analítica e numérica, por MEF, para o ensaio de saturação magnética

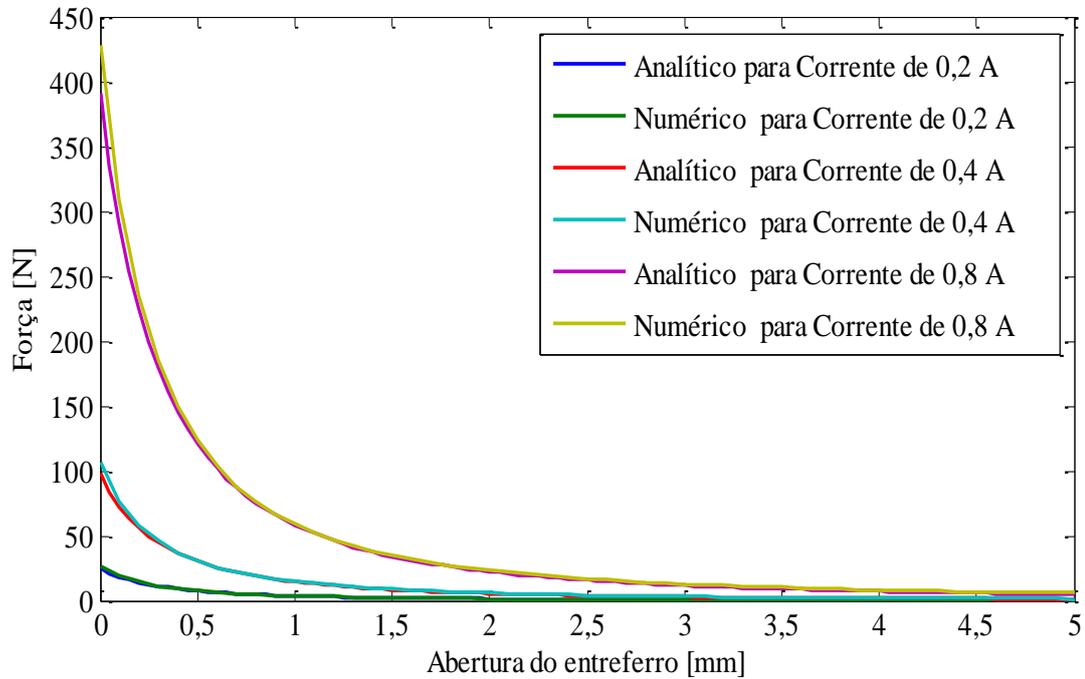


Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 14 percebe-se que as curvas começam a divergir com B aproximadamente igual a 1,1 T. Isso acontece em função do material começar a entrar na região de saturação magnética, conforme Figura 5, e a saturação não é considerada no modelo analítico. Portanto, se valida o modelo analítico para densidade de fluxo magnético representado pela equação (32).

Na sequência, foi analisada a relação entre força magnética e abertura de entreferro, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 – Curvas analíticas e numéricas de força magnética frente a variação do entreferro



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 15, percebe-se que as curvas analíticas e numéricas estão praticamente sobrepostas para correntes de 0,2 A e 0,4 A, mas apresentam diferença com corrente de 0,8 A, possivelmente provocado por efeito de saturação, não considerado no modelo analítico e considerado no modelo numérico.

### 3. CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO

A seguir é demonstrado de maneira sucinta o projeto mecânico e algumas etapas de processo de construção do dispositivo. Também são abordados neste capítulo os instrumentos de medidas que foram utilizados.

#### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO DISPOSITIVO

Foram usados os seguintes instrumentos de medidas de maneira fixa ao dispositivo:

- **Relógio comparador digital:**

Modelo: *ABLOLUTE ID-C Série 543*.

Fabricante: *Mitutuyo*.

Função: Medir a abertura de entreferro.

- **Célula de carga:**

Modelo: *SV50*.

Fabricante: *Alfa instrumentos*.

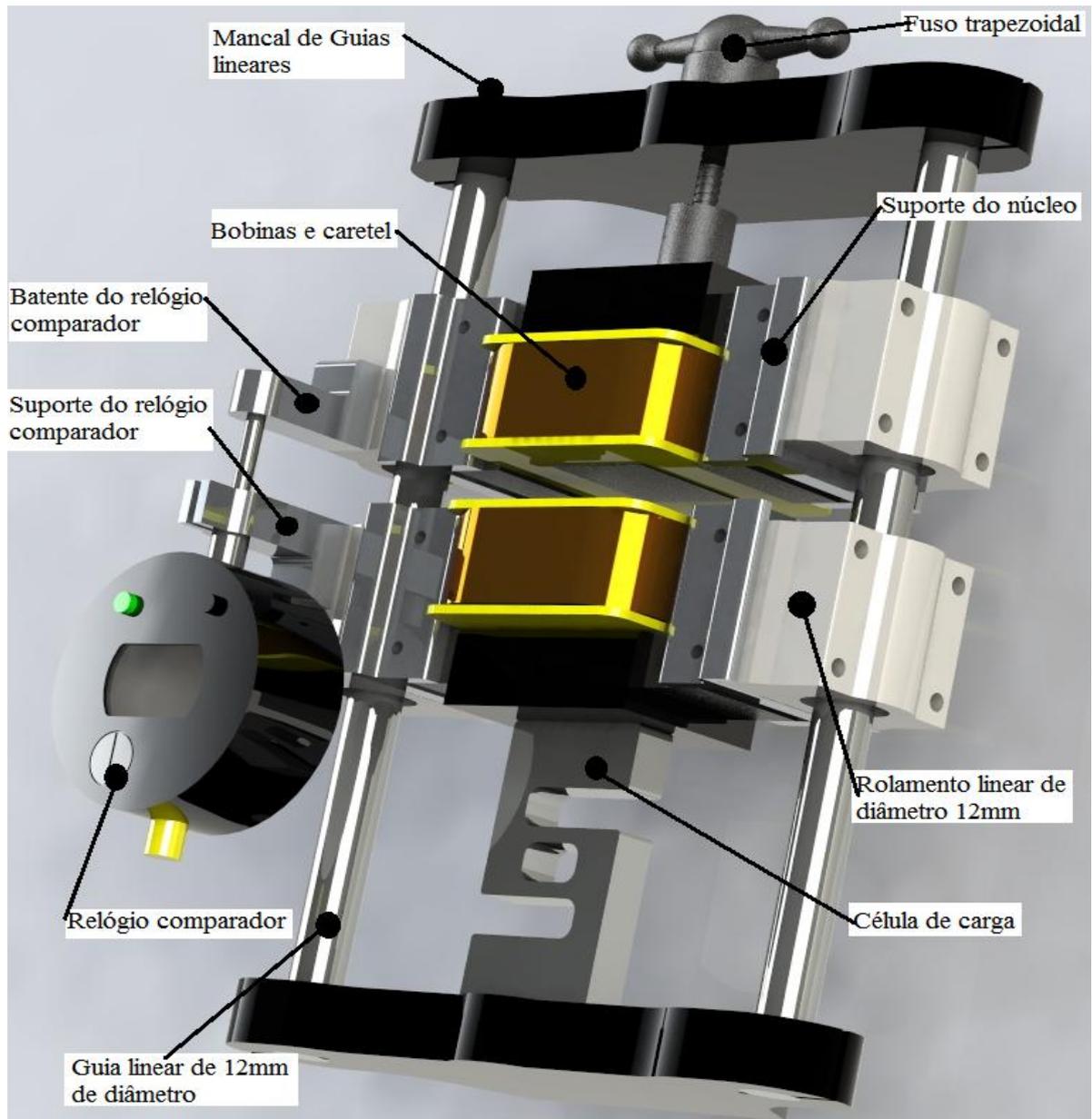
Função: Medir a força mecânica gerada no dispositivo.

Observação: Para célula de carga, segue no Apêndice A, a respectiva curva de calibração da mesma.

#### 3.4 ESTRUTURA MECÂNICA

Após as confirmações do modelo matemático, por intermédio do MEF, deu-se início a etapa de desenvolvimento físico do trabalho. A concepção mecânica, foi criada no *software SolidWorks* conforme Figura 16, excetuando-se algumas peças, já industrializadas, que foram incorporadas ao desenho final. No Apêndice A estão os desenhos técnicos das peças que foram usinadas para confecção do modelo já exposto na Figura 1.

Figura 16 - Protótipo final com peças identificadas



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 3 estão listadas as todas as peças e instrumentos que compõem o dispositivo, exceto o núcleo ferromagnético e as bobinas, a quantidade utilizada, o modelo, o fabricante e a procedência.

Tabela 3 – Peças utilizadas para construção do dispositivo

<b>Peça</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Procedência</b>
<b>Rolamento linear</b>	4	SBR12mm	Desconhecido	Retirado de um projeto em desuso do LMEAE.
<b>Guia linear</b>	2	LM12mm	Desconhecido	Retirado de um projeto em desuso do LMEAE.
<b>Mancal de Guia</b>	2	Não se aplica	LMEAE	Sobra de material dos projetos do LMEAE.
<b>Suporte do núcleo</b>	4	Não se aplica	LMEAE	Sobra de material dos projetos do LMEAE.
<b>Fuso trapezoidal</b>	1	Não consta	Não consta	Retirando de um Antigo torno mecânico do LMEAE
<b>Carretel da bobina</b>	2	Não se aplica	Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da UFRGS	Comprada Externamente
<b>Batente do relógio comparador</b>	1	Não se aplica	LMEAE	Sobra de material dos projetos do LMEAE.
<b>Suporte do relógio comparador</b>	1	Não se aplica	LMEAE	Sobra de material dos projetos do LMEAE.
<b>Relógio comparador</b>	1	<i>ABLOLUTE ID-C Série 543</i>	<i>Mitutoyo</i>	Ferramenta Encontrada na oficina do LMEAE
<b>Célula de Carga</b>	1	SV50	<i>Alfa Instrumentos</i>	Comprada Externamente

Fonte: Próprio autor.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

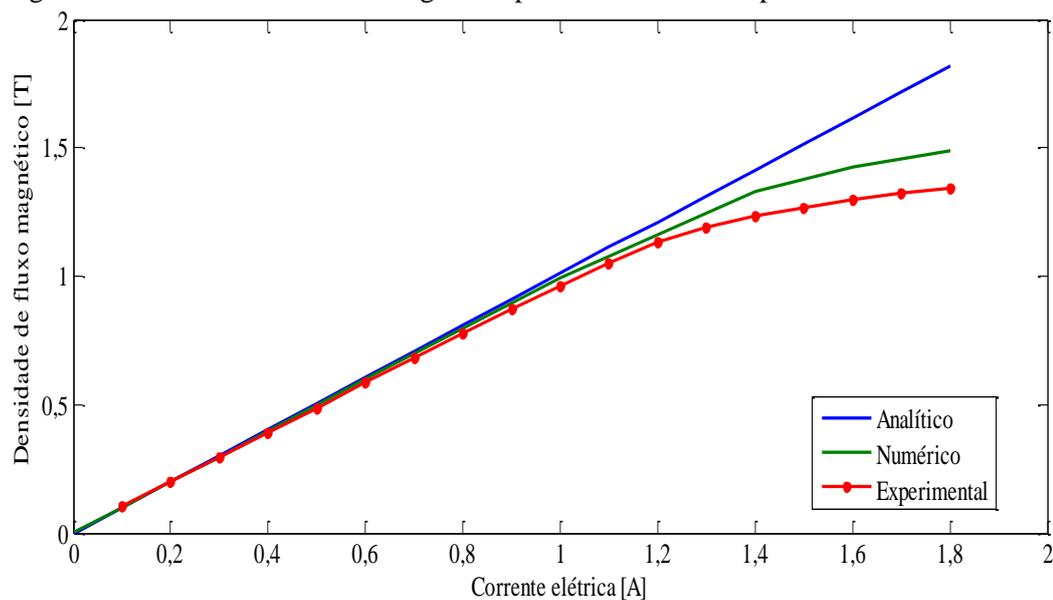
Foram feitos três tipos de ensaios no protótipo construído, sendo esses: saturação magnética do material, força magnética no entreferro e indução magnética nas culatras. Os instrumentos de medição e usados como periféricos foram:

- **Condicionador de Sinais:**  
Fabricante - *HBM*  
Modelo – *Quantum MX440B*
- **Multímetro:**  
Fabricante - *Fluke*  
Modelo - 15B+
- **Gaussímetro:**  
Fabricante - *Magnetic Instruments LTD*  
Modelo - *Hirst GM05*
- **Fonte de alimentação de corrente contínua (CC):**  
Corrente máxima – 2 A  
Tensão máxima – 32 V
- **Autotransformador variável (CA):**  
Corrente máxima – 15 A  
Tensão máxima – 220 V

### 4.1 ENSAIO DE SATURAÇÃO MAGNÉTICA DO NÚCLEO

Alimentou-se os dois enrolamentos elétricos do protótipo com a corrente contínua variando-se de 0 A a 1,8 A com passos de 0,1 A, enquanto se media com o gaussímetro a indução magnética gerada no entreferro predefinido. Foram feitas três repetições para o teste e depois se extraiu a média desses, obtendo-se a curva da Figura 17.

Figura 17 – Densidade de fluxo magnético por corrente elétrica para entreferro mínimo



Fonte: Próprio autor.

Foi constatado a partir da Figura 17, que a curva experimental ficou abaixo da numérica. Isso se deve a desalinhamentos mecânicos e imperfeições na usinagem das peças, assim isso, implicando em perdas que a análise por MEF não prevê.

#### 4.2 ENSAIO DE FORÇA MAGNÉTICA NO ENTREFERRO

Para determinar a curva nominal de força em função da abertura do entreferro para três diferentes níveis de corrente elétrica, isto é, para 0,2 A, 0,5 A e 0,8 A, respectivamente, com as bobinas conectadas em série. Para cada uma das correntes fez-se três repetições e depois se obteve a média dos valores. Os resultados dos testes são apresentados nas Figura 18, 19 e 20.

Figura 18 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,2 A

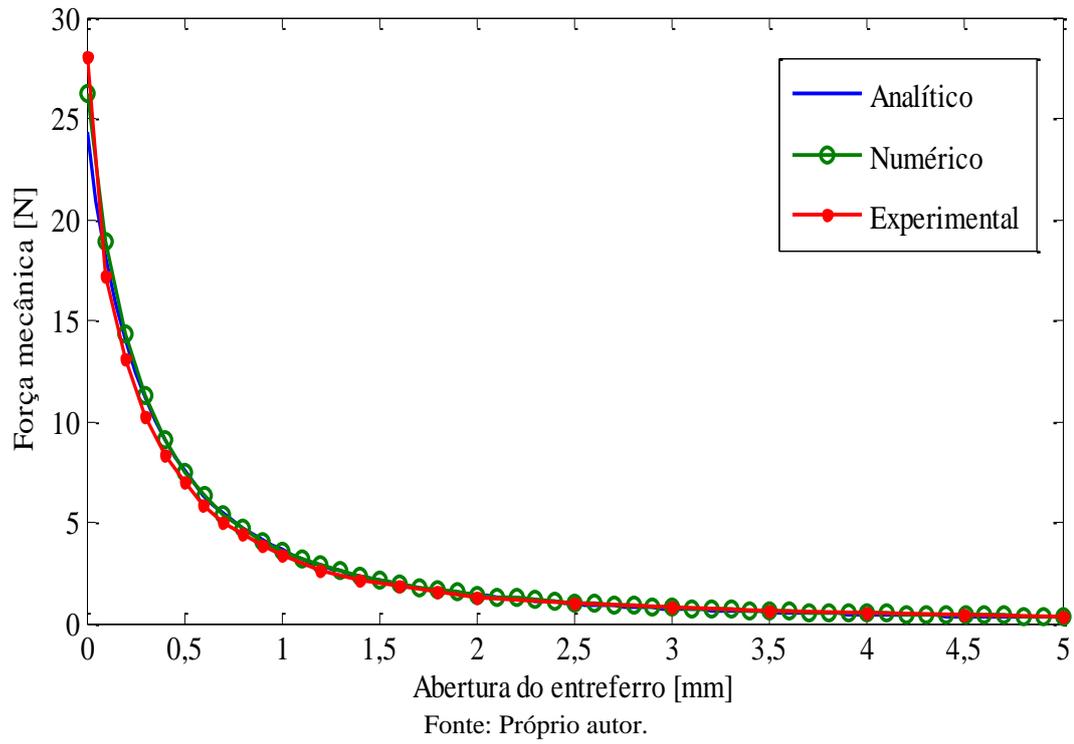


Figura 19 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,5 A

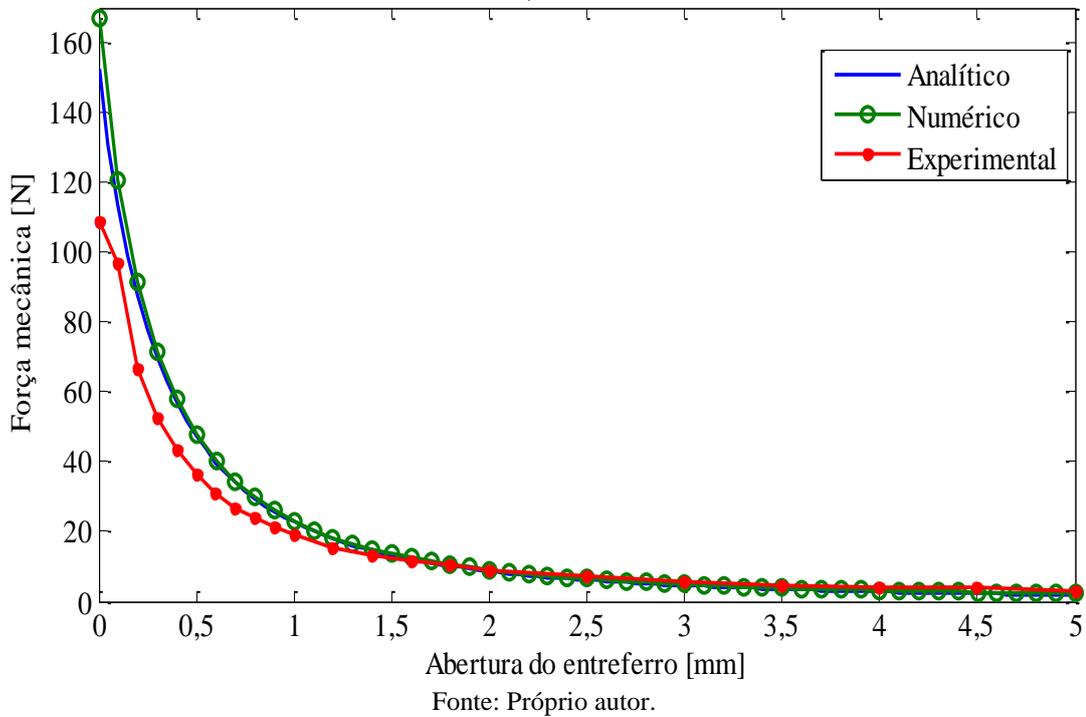
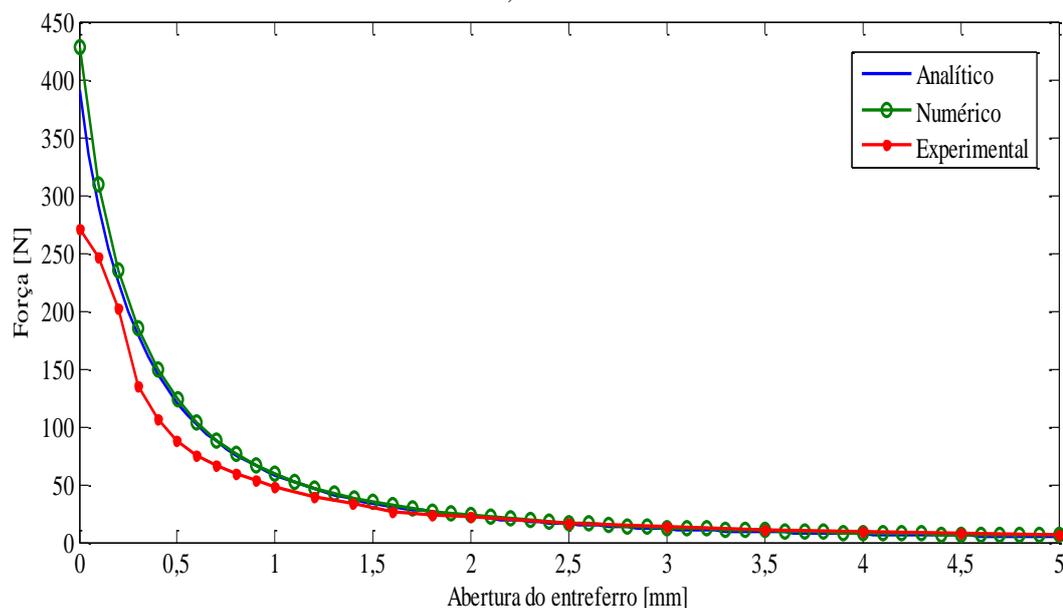


Figura 20 – Ensaio de força magnética de atração frente a variação do entreferro para corrente de 0,8 A



Fonte: Próprio autor.

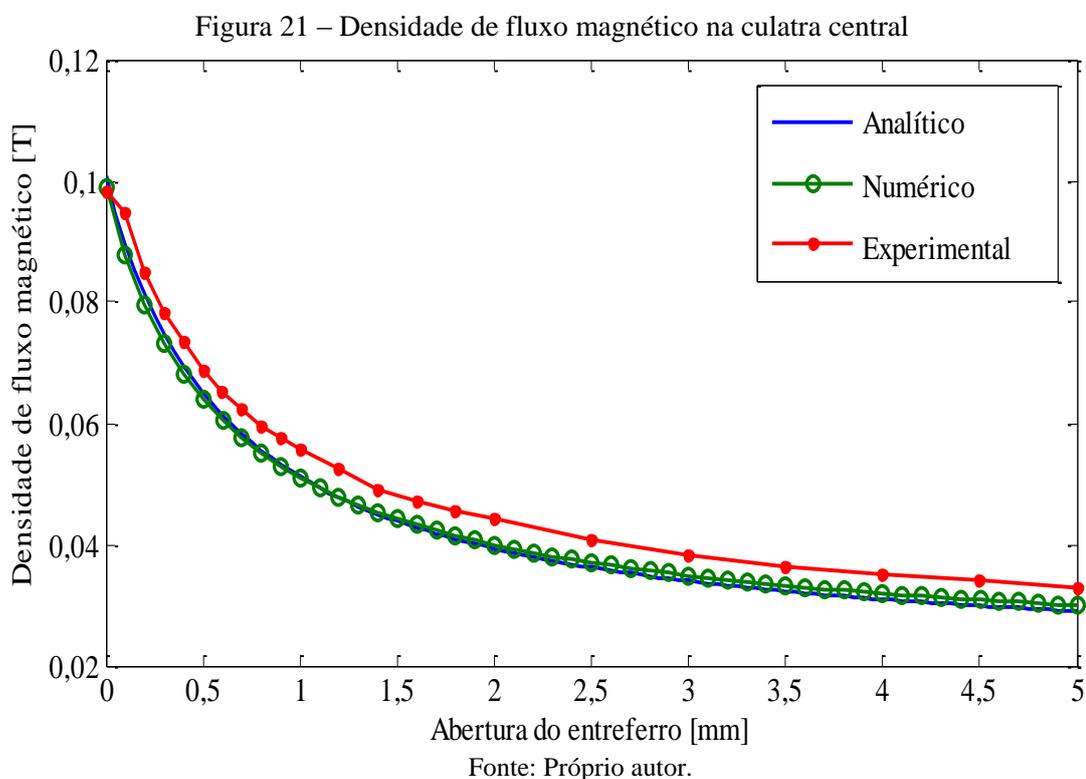
Nota-se que ao se gerar mais força no dispositivo, devido ao aumento da corrente de excitação, a curva experimental de força começa a se deformar perto da região de entreferro mínimo, ou seja, quando  $x \rightarrow 0$ . Isso acontece devido à deformação mecânica dos materiais que compõem o dispositivo. Quando as duas peças com formato “E” que formam o núcleo ferromagnético estão no limiar de encostar umas nas outras, tem-se a força aumentando significativamente, o que provoca pequenas deformações mecânicas na estrutura do dispositivo. O resultado disso é o fechamento repentino quando essas estão próximas a completar o fechamento do núcleo. Assim, o resultado experimental acaba divergindo do modelo analítico e numérico para pequenos valores de entreferro.

Com base nos três ensaios realizados para força mecânica e levando em consideração que esse trabalho tem o objetivo voltado a demonstrações para o ensino, escolheu-se como curva nominal de força magnética a que melhor se comportou no teste feito. Portanto, a corrente nominal de operação no teste de força magnética deve ser de 0,2 A.

### 4.3 ENSAIO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA COM CORRENTE CONSTANTE E ENTREFERRO VARIÁVEL

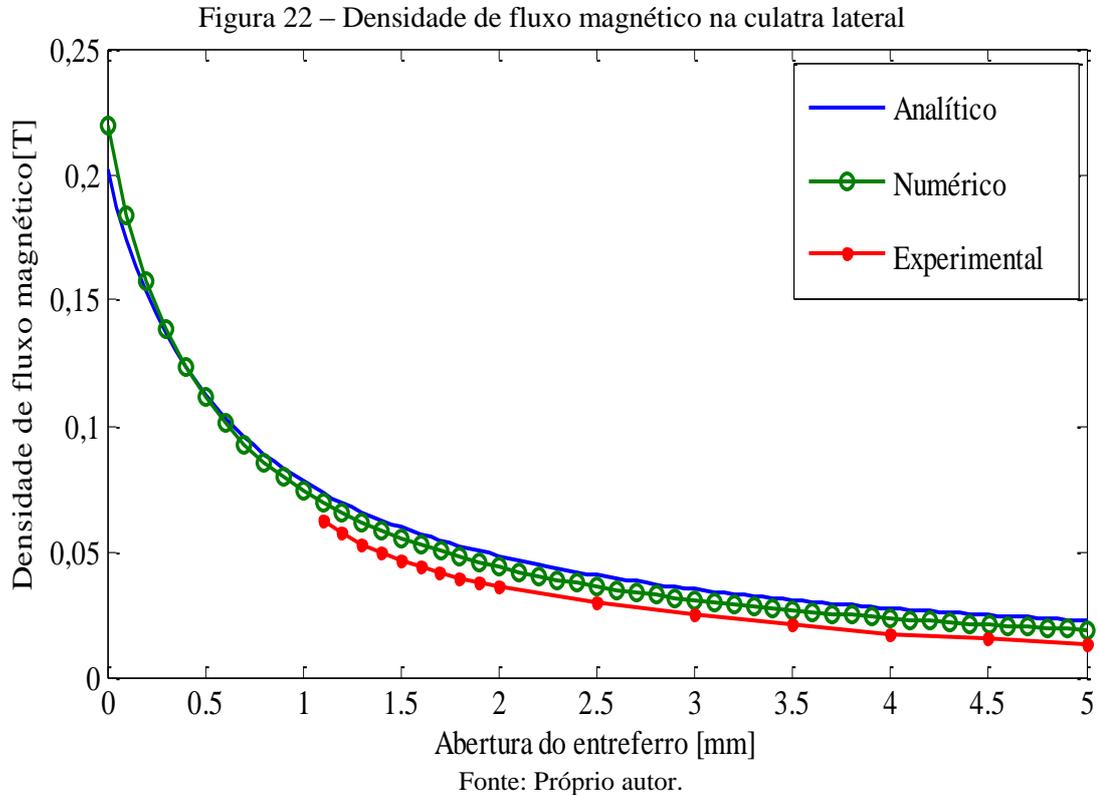
Como no ensaio anterior, este também resulta em deformações mecânicas devido à variação de força em função da alteração do entreferro. Portanto, o mesmo terá como limite a corrente de 0,2 A, como no anterior. Assim reduzem-se os efeitos não desejados devido à deformação mecânica dos materiais.

Como para todos os testes, foram feitos para este também três ensaios idênticos e posteriormente se extraiu a média destes. Para tal foi excitado o circuito com as duas bobinas em série com a corrente de 0,2 A.



Nesse ensaio encontrou-se um resultado de certa forma inesperado, ou seja, os resultados numéricos e principalmente os experimentais de densidade de fluxo magnético na culatra central tiveram valores superiores aos analíticos conforme mostra a Figura 21. Isso não era esperado, pois no modelo analítico não foi considerado espraiamento e tampouco fluxo disperso, que tendem a diminuir o valor da densidade de fluxo, e não aumentar. De forma investigativa, analisou-se a indução magnética em uma das culatras laterais para constatar se esta anomalia se presenciava naquela região também. Com uma única ressalva,

este teste necessitou ser feito com o entreferro lateral a partir de 1 mm para possibilitar a inserção da ponteira. A partir de três ensaios idênticos chegou-se a curva da Figura 22.

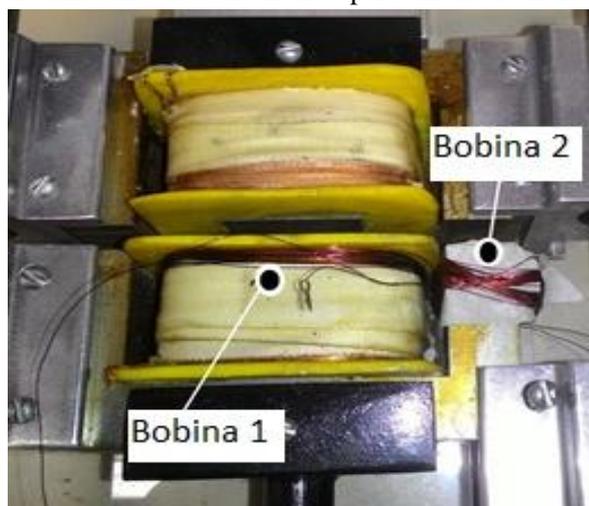


Percebe-se que nas laterais as curvas analítica, numérica e experimental se encontram na ordem inicialmente esperada, mas com a curva experimental significativamente abaixo das demais, o que exatamente acontece ao contrário na Figura 21. Assim, conclui-se que parte do fluxo magnético não está concatenando as laterais do protótipo pelo caminho ferromagnético.

#### 4.3.1 ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA COM BOBINAS EXPLORATÓRIAS

Explorando mais a fundo a questão da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro, fez-se a seguinte experiência: colocou-se duas bobinas, denominadas “Bobina 1” e “Bobina 2”, de fio 35 AWG, para que coubessem no pequeno espaço ainda presente entre as bobinas e a lateral no núcleo ferromagnético, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Bobinas inseridas no núcleo para ensaio de fluxo concatenado



Fonte: Próprio autor.

A partir da tensão induzida nessas bobinas podem-se estimar o fluxo concatenado da região central para as laterais, sendo que a razão entre os valores representa o percentual de fluxo disperso no sistema. Para esta condição, arbitrou-se que a “Bobina 1” teria 25 espiras e “Bobina 2” teria 50 espiras. Esta proporção é em função de se ter a metade do fluxo nas laterais do núcleo, em relação ao fluxo central. Portanto, a tensão induzida em ambas deve ser a mesma ao se dobrar o número de espiras da bobina que recebe a metade do fluxo. De forma analítica, tem-se

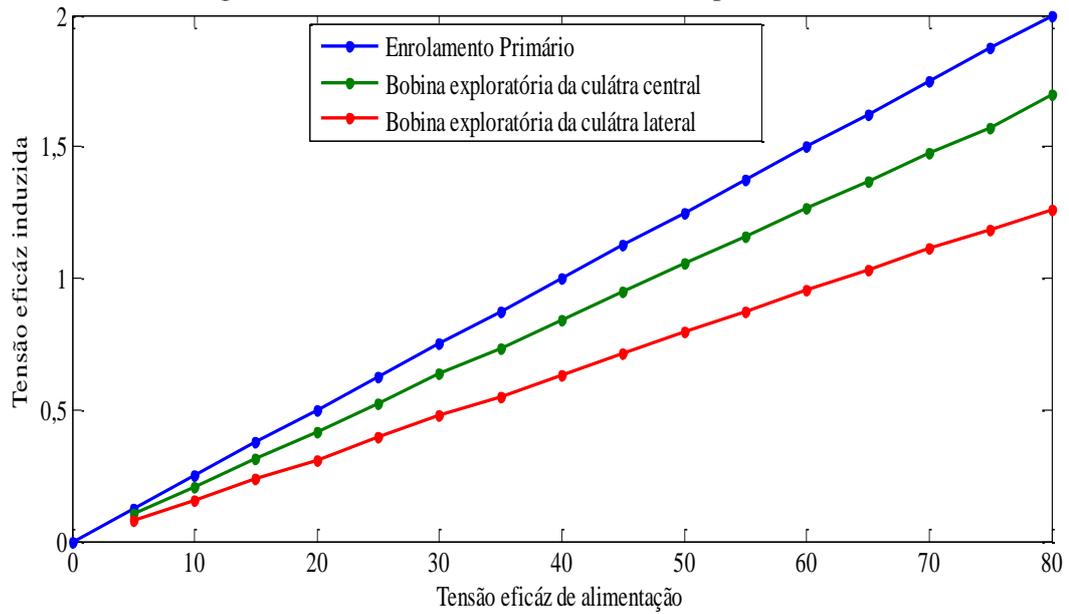
$$V_{Bobina1} = 1 \cdot \left( \frac{25}{2.505} \right) \cdot V_p \quad (39)$$

$$V_{Bobina1} = \frac{1}{2} \left( \frac{50}{2.505} \right) \cdot V_p \quad (40)$$

onde  $V_p$  é a tensão aplicada no enrolamento primário, bobinas originais do dispositivo, conectadas em série.

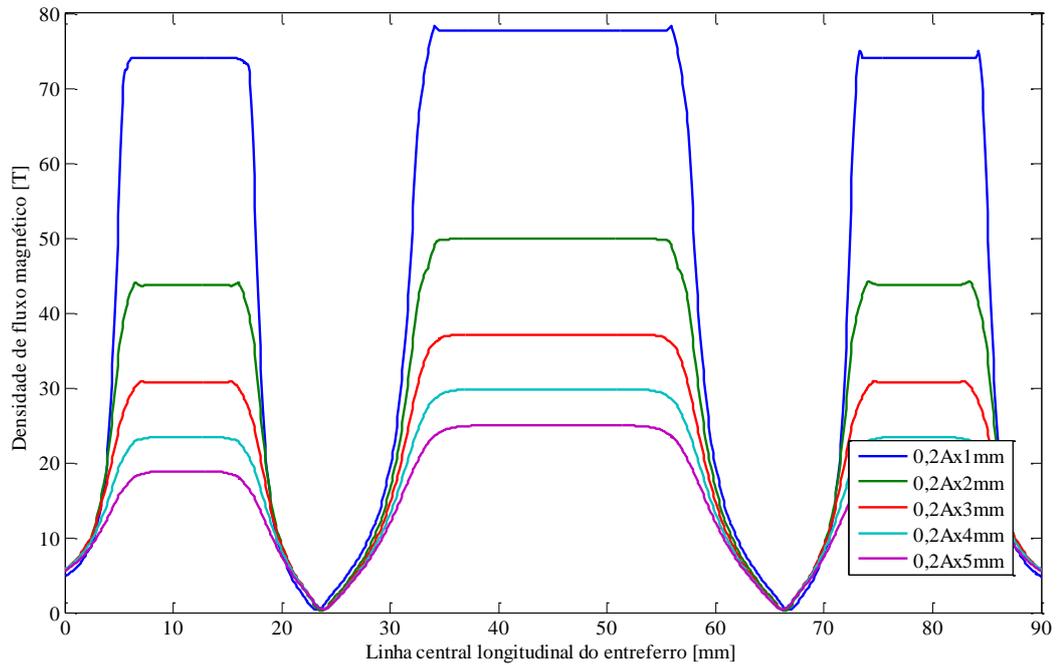
Então, com o auxílio de um autotransformador variável, aplicou-se uma tensão alternada de 0 V à 80 V, observando-se sempre a corrente eficaz, através do multímetro e as tensões induzidas nas bobinas exploratórias com outros dois multímetros idênticos. Assim, obteve-se a curva da Figura 24.

Figura 24 – Tensão induzida nas bobinas exploratórias



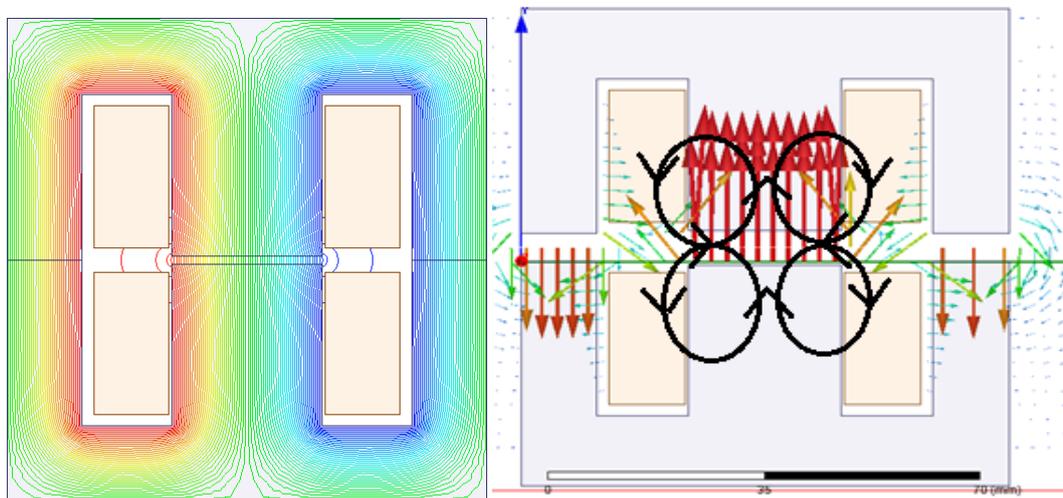
Idealmente as curvas deveriam coincidir na curva azul, porém o foco do teste se volta para análise das curvas verde e vermelha. Pode-se deduzir, a partir da Figura 24, que existe dispersão de fluxo magnético da culatra central para a lateral e esse é a razão entre os valores das tensões induzidas na Bobina 2 e na Bobina 1, que é de 0,75. Conclui-se com este teste que o fluxo magnético concatenado do centro do núcleo para as laterais sofre um decréscimo de 25%. Adicionalmente, confirmou-se por meio de análise com MEF que existe fluxo disperso no sistema e espriamento, conforme mostra a Figura 25 e a Figura 26.

Figura 25 – Simulação por MEF da Indução magnética no plano central do entreferro para corrente contínua de 0,2 A e diferentes valores de abertura de entreferro



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Linhas de fluxo magnético e vetores de densidade de fluxo magnético, determinados por MEF



Fonte: Próprio autor.

## 5. CONCLUSÃO E MELHORIAS FUTURAS

Neste trabalho, se descreveu a metodologia e as etapas de desenvolvimento de um dispositivo que permite fazer ensaios de propriedades como: fluxo concatenado, densidade de fluxo magnético, força de atração magnética. Assim sendo possível que se discuta resultados analíticos, numéricos e experimentais, fomentando o aprendizado.

Percebeu-se no decorrer deste trabalho a extrema importância do MEF, para validação de modelos analíticos. Posto que, é muito arriscado confiar, somente, na análise matemática, pois a mesma é muito suscetível a erros, porque existem muitos fatores que passam despercebidos na fase de projeto. Logo, a simulação numérica computacional traz segurança ao projetista na fase de execução de projetos de dispositivos eletromagnéticos, também sendo muito útil para ajudar a desvendar possíveis causas de problemas, quando os dispositivos não funcionam conforme o esperado.

Das melhorias futuras para este trabalho, percebe-se no decorrer do estudo que o dispositivo poderia apresentar resultados experimentais mais próximos dos analíticos e numéricos, se os efeitos de espraiamento e dispersão de fluxo pudessem ser reduzidos. Para isso, sugere-se algumas modificações dimensionais, no núcleo ferromagnético mostrado na Figura 10. Esse deveria ter a ranhura da bobina “alargada”, assim afastando a periferia da bobina das culatras laterais. Com isso, a relutância magnética do ar nesse caminho seria aumentada, assim dificultando a dispersão do fluxo magnético mostrado pela Figura 26. Também seria conveniente aumentar a medida “c” da Figura 10, para forçar a entrada das linhas de fluxo magnético, que não concatenam por dentro do entreferro central e sim diretamente de bobina para bobina como percebido na Figura 26. A partir disso esse problema seria atenuado, pois as bobinas estariam mais afastadas uma em relação à outra.

Seria de grande valia, uma análise mecânica por elementos finitos no *software SolidWorks*, com o objetivo de prever os pontos de deformação mecânica que influenciam no modelo matemático da parte magnética.

## REFERÊNCIAS

ANOCIBAR, H. R.; ECKERT, P. R.; FLORES FILHO, A. F. **Variable Air-Gap Hysteresimeter - a Learning Approach To Permanent Magnets**. Proceedings of the XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, p. 1–8, 2015.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

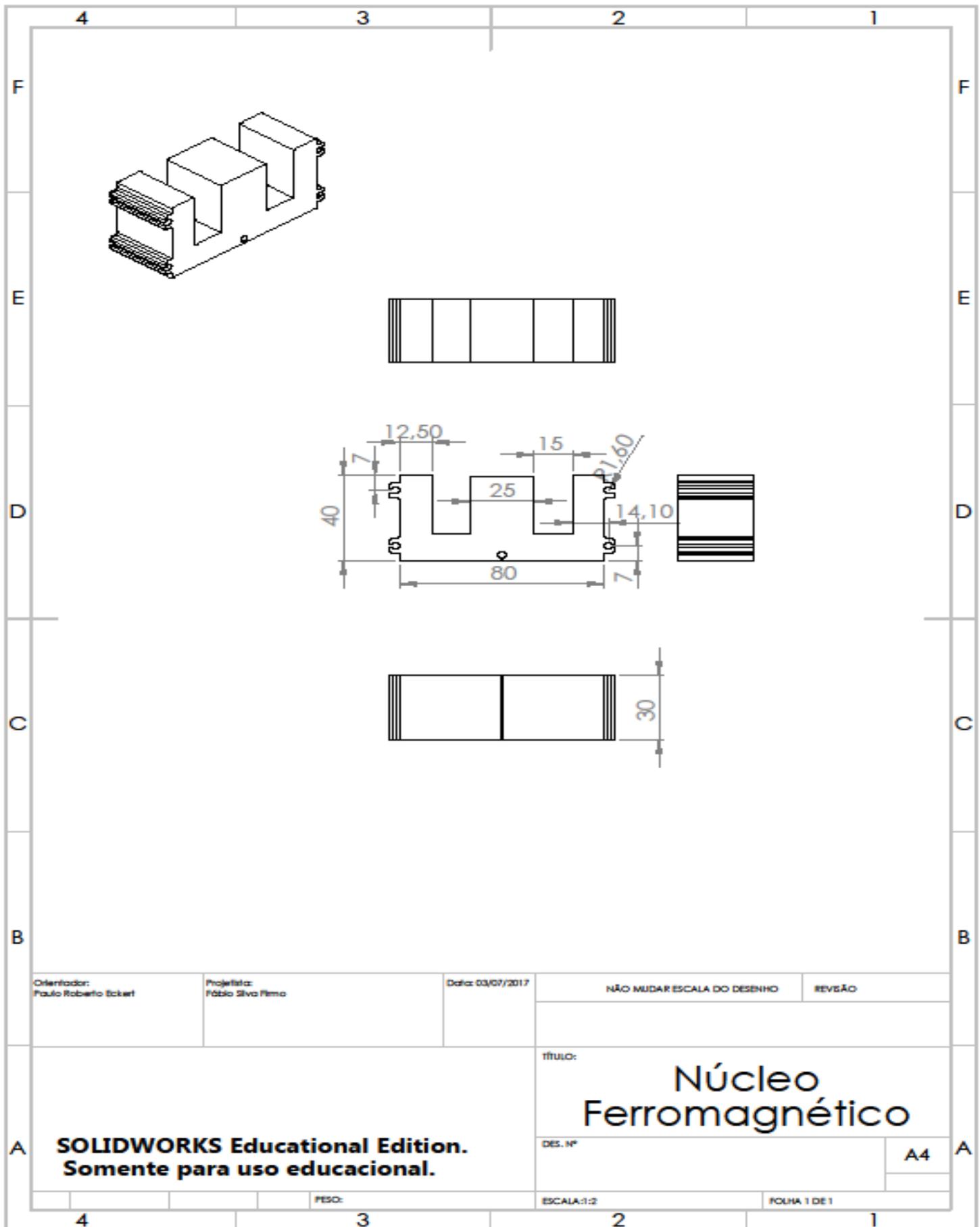
CHARLES KINGSLEY, A. ERNEST FITZGERALD, S. D. U. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

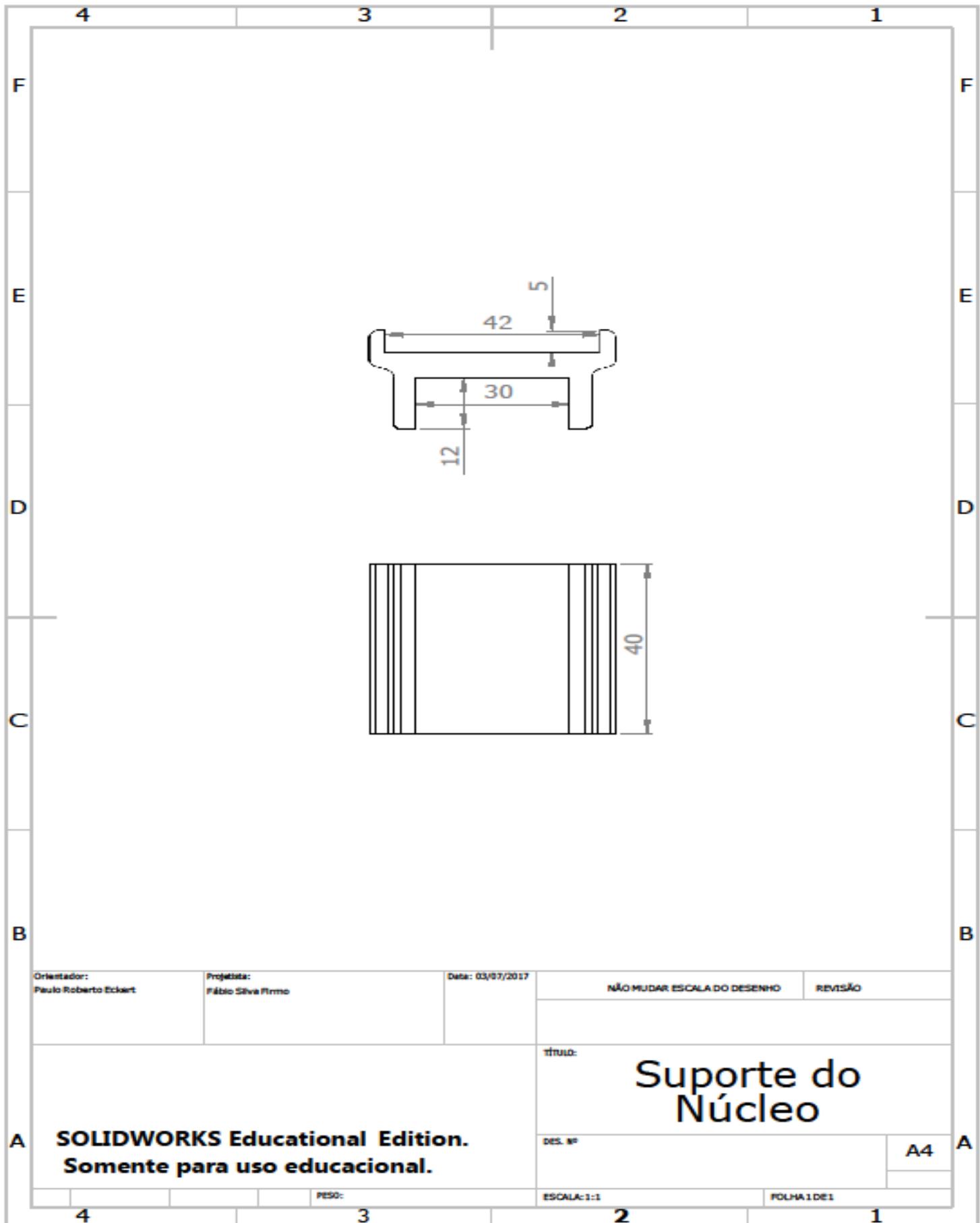
COSTA, JOSEMBERTO ROSENDO, S. A. F. **Uma proposta para o ensino do eletromagnetismo sob uma perspectiva histórico-experimental**. n. 2016, p. 1–12, 16 nov. 2016.

EDMUND HANSEN. **The Role of Interactive Video Technology in Higher Education: Case Study and a Proposed Framework**. Education Technology, p. 13–21, 1990.

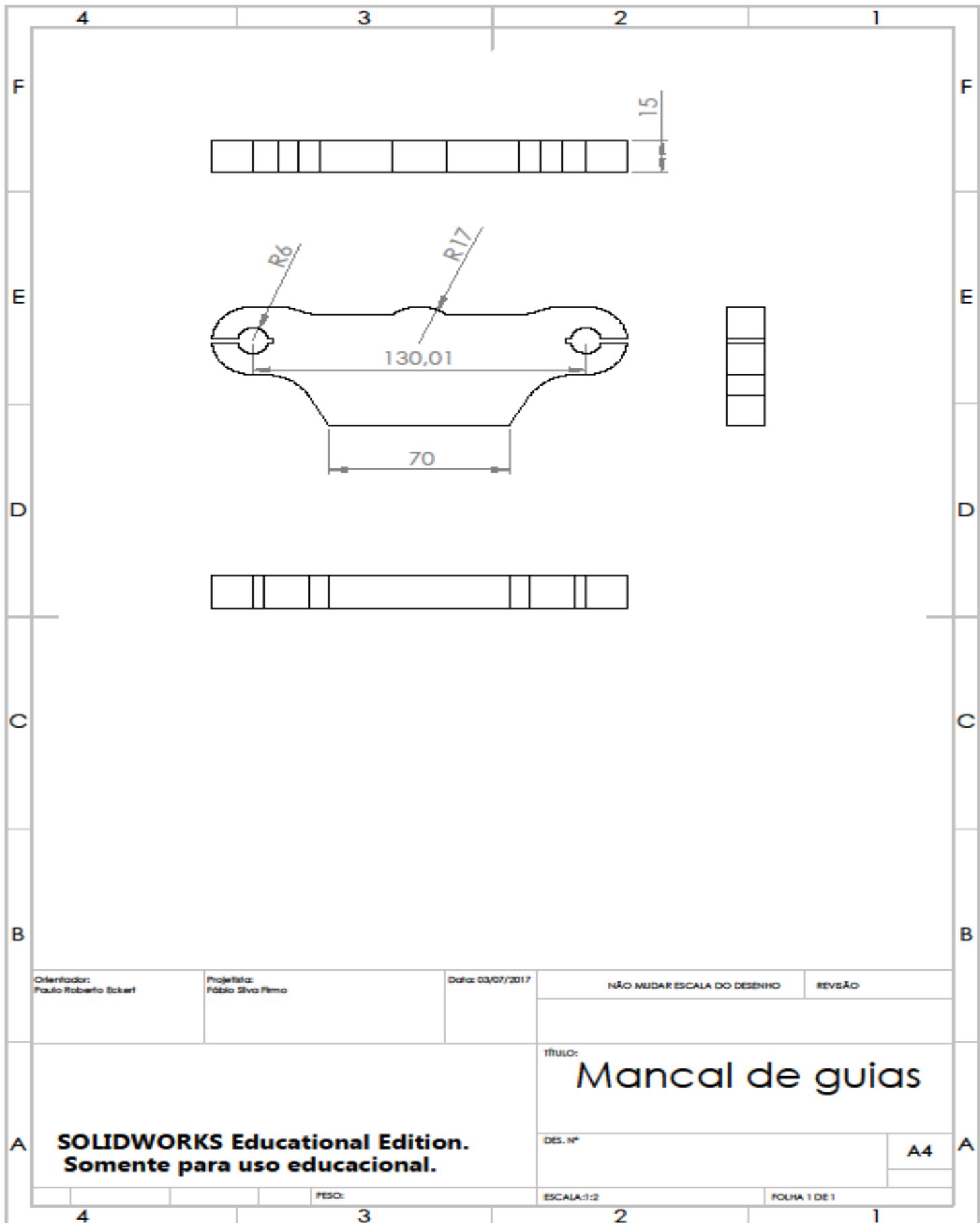
STEPHEN J. CHAPMAN. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

**APÊNDICE A – Desenhos Técnicos**

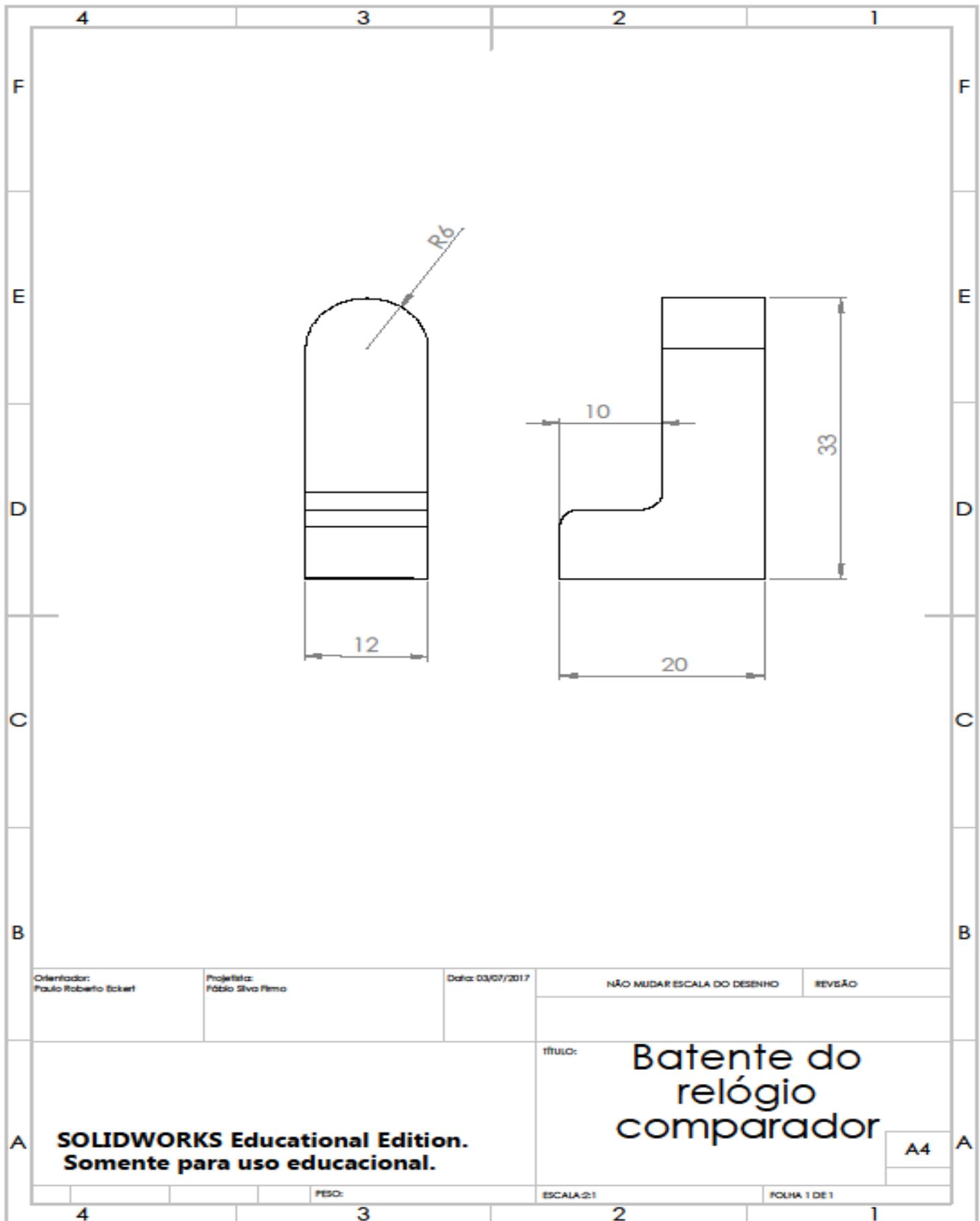


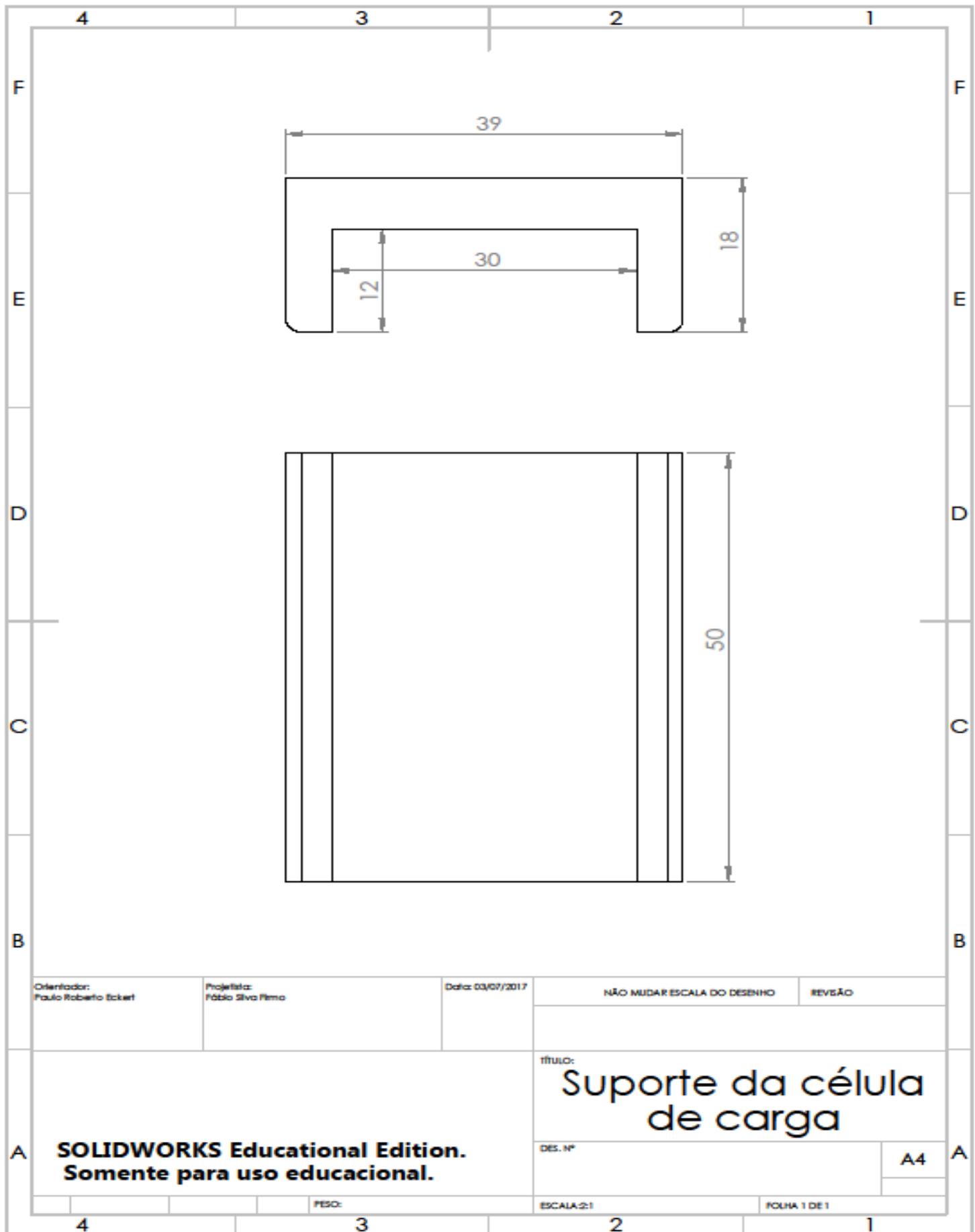












Orientador:  
Paulo Roberto Eckert

Projeteira:  
Fábia Silva Lima

Data: 03/07/2017

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

TÍTULO:

Suporte da célula  
de carga

DES. Nº

A4

**SOLIDWORKS Educational Edition.  
Somente para uso educacional.**

PESO:

ESCALA: 2:1

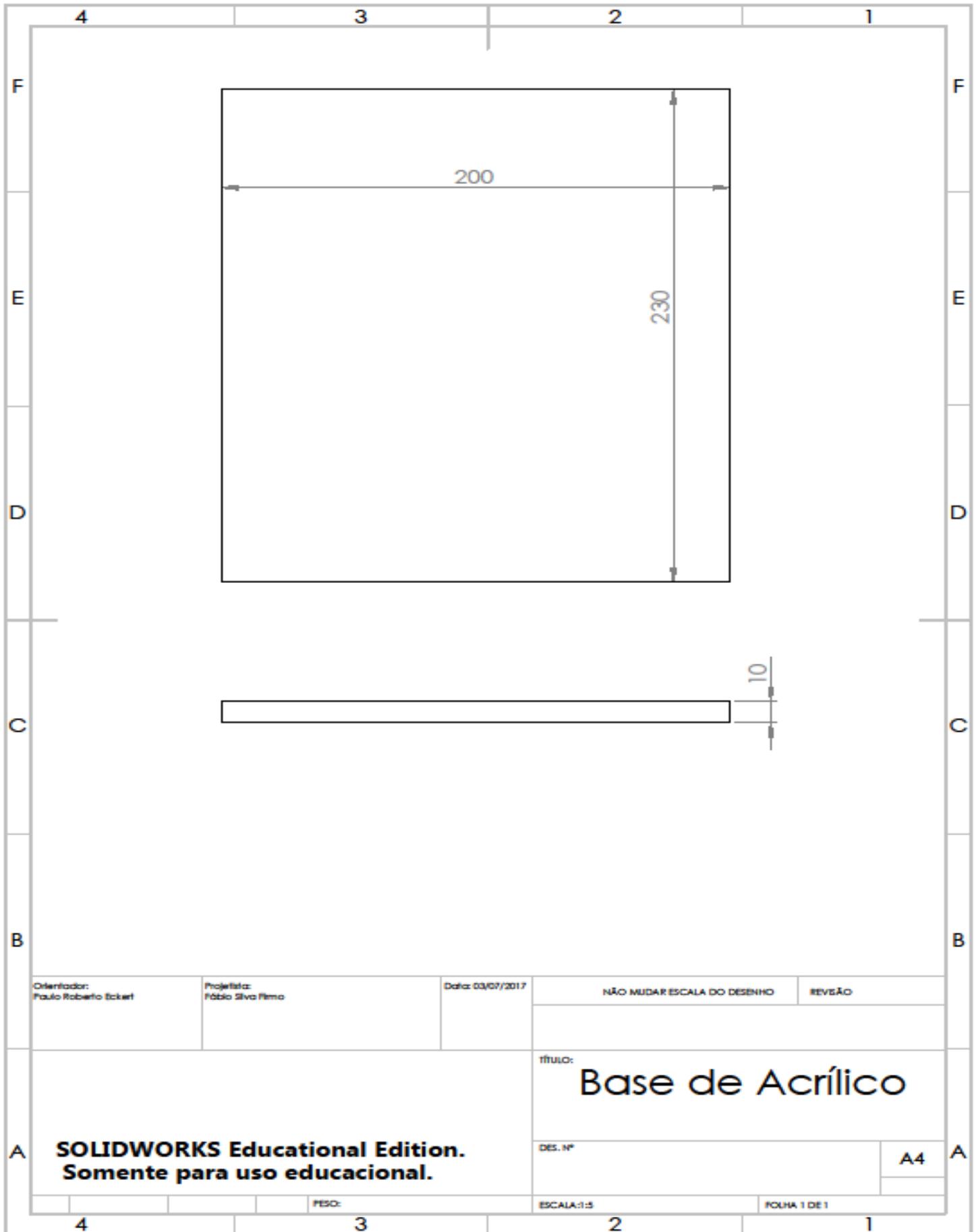
FOLHA 1 DE 1

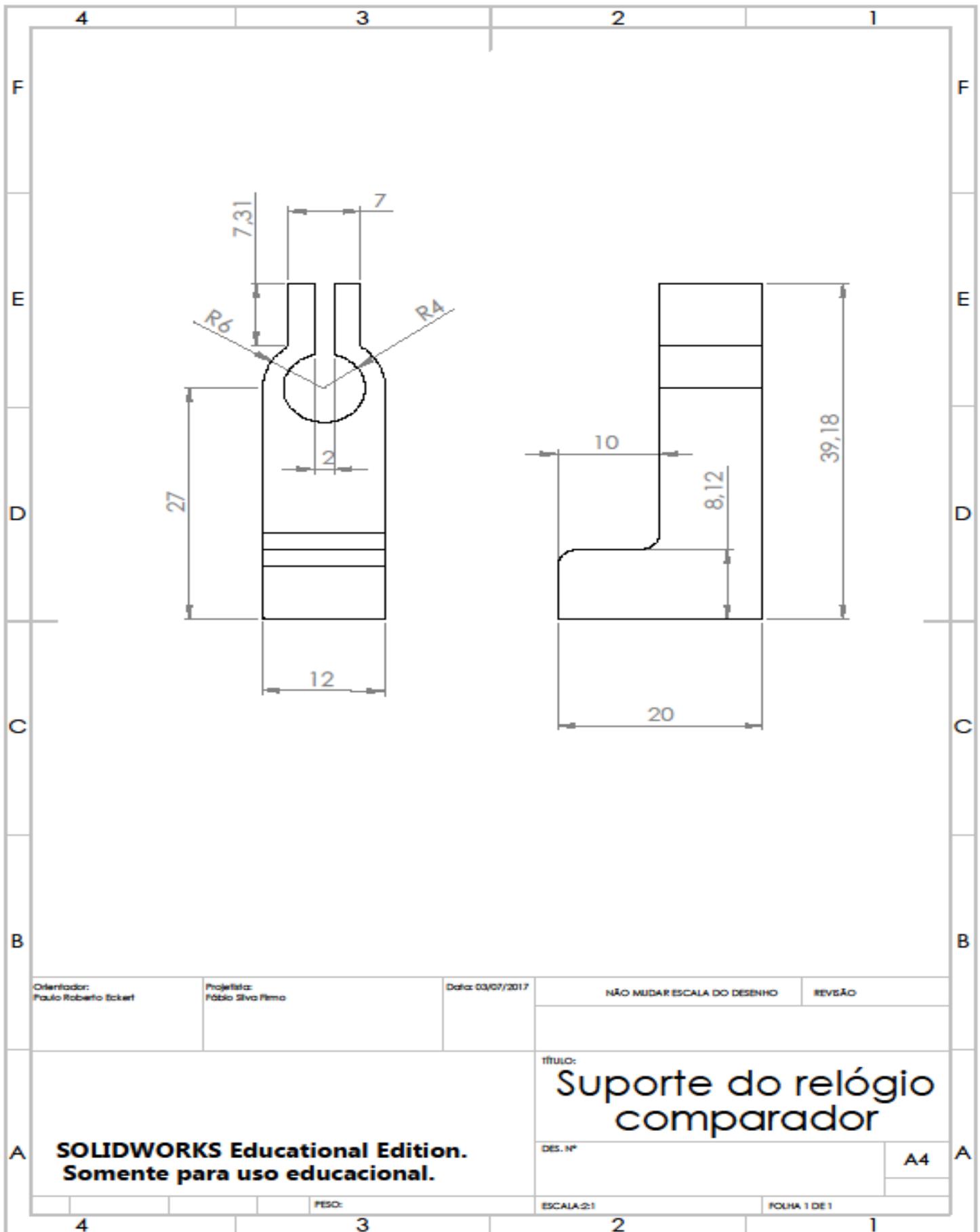
4

3

2

1





**APÊNDICE B – Curva de calibração da célula de carga SV50 Alfa Instrumentos**