



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas PEA/EPUSP

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



PROJETO DE FORMATURA – 2007
Concepção e Construção de Dispositivo Biestável

ALUNO: Leandro Zavarez Barbosa
ORIENTADORES: Luiz Lebensztajn
Ivan E. Chabu
COORDENADOR: Carlos Márcio Vieira Tahan



Projeto de Formatura 2007

Relatório Final

NOME DO ALUNO:

Leandro Zavarez Barbosa

E-mail: leandro.barbosa@poli.usp.br

Nº USP:

4957717

TÍTULO DO TRABALHO:

Concepção e Construção de Dispositivo bi-estável

ORIENTADORES:

Prof. Luiz Lebensztajn

e-mail: leb@pea.usp.br

Tel: (11)-3091-5309

Prof. Ivan Eduardo Chabu

e-mail: ichabu@pea.usp.br

Tel: (11)-3091-5533

LOCAL DO PROJETO:

Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LMAG PEA-USP



Sumário

INTRODUÇÃO:	8
OBJETIVOS DO TRABALHO:	9
1. Pesquisa bibliográfica	10
2. Metodologia	11
3. Anteprojeto	12
3.1. Projeto Inicial	12
3.2. Análise das geometrias	18
4. Projeto Final	22
4.1. Análise de Sensibilidade	22
4.2. Otimização	26
5. Testes Experimentais	39
5.1. Teste de Polaridade da Bobina	40
5.2. Teste de Força	40
5.2.1. Comparação dos Resultados Obtidos	42
6. Conclusão	46
7. Sugestões para trabalhos futuros	47
BIBLIOGRAFIA:	48
Anexo A	49
Anexo B	58
Anexo C	63
Anexo D	68



Índice de Tabelas

Tabela-1. Parâmetros da geometria-I.....	12
Tabela-2. Parâmetros utilizados na Geometria-II.....	13
Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados	14
Tabela-4. Parâmetros utilizados na Geometria-III	16
Tabela-5. Parâmetro e intervalo analisado para a geometria I.	22
Tabela-6. Parâmetro e intervalo analisado para a geometria III.....	23
Tabela-7. Lista de valores utilizados na construção do modelo da geometria I.....	26
Tabela-8. Lista de valores utilizados na construção do modelo da geometria III.	27
Tabela-9. Soluções encontradas pelo método de otimização.	30
Tabela-10. Valores finais dos parâmetros.	31
Tabela-11. Tabela parâmetro utilizados na análise.	34
Tabela-12. Lista de valores utilizados na construção do modelo de substituição.	34
Tabela-13. Soluções encontradas pelo método de otimização.	38
Tabela-14. Tabela parâmetro utilizados na construção do atuador.	38
Tabela-15. Valores utilizados para I.....	43
Tabela-16. Força de Retenção para $I > 0,2 A$	44



Índice de Gráficos

Gráfico-1 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria I.	18
Gráfico-2 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria II.	19
Gráfico-3 – Força Magnética atuante sobre o imã, para baixos valores de I – Geometria II.	20
Gráfico-4 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria III.	20
Gráfico-5 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria III – $D_L = 10$ mm.	21
Gráfico-6 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de R_D	23
Gráfico-11 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação D_L	24
Gráfico-16 – Módulo de F_{ret} e F_{exp} em função D_L	25
Gráfico-17 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para a geometria I.	28
Gráfico-18 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para a geometria I.	28
Gráfico-19 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para a geometria III.	29
Gráfico-20 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para a geometria III.	30
Gráfico-21 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para o redimensionamento.	37
Gráfico-22 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para o redimensionamento.	37
Gráfico-23 – Força sobre o eixo com $I = 0$ A.	43
Gráfico-32 – Influência de B_r na força de retenção.	44
Gráfico-33 – Força sobre o eixo com $I = 0$ A com $B_r = 0,23$ T.	45
Gráfico 6 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de R_D	58
Gráfico 7 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_B	58
Gráfico 8 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_1	59
Gráfico 9 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_2	59
Gráfico 10 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_E	60
Gráfico 12 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de X	60
Gráfico 13 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_3	61
Gráfico 14 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_B	61
Gráfico 15 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de Y	62
Gráfico-24 – Força sobre o eixo com $I = 0,25$ A.	68
Gráfico-25 – Força sobre o eixo com $I = 0,5$ A.	68
Gráfico-26 – Força sobre o eixo com $I = 0,75$ A.	69
Gráfico-27 – Força sobre o eixo com $I = 1,0$ A.	69
Gráfico-28 – Força sobre o eixo com $I = 1,25$ A.	70
Gráfico-29 – Força sobre o eixo com $I = 1,5$ A.	70
Gráfico-30 – Força sobre o eixo com $I = 1,75$ A.	71
Gráfico-31 – Força sobre o eixo com $I = 2,0$ A.	71



Índice de Figuras

Fig.1 – Imã de Ferrite ($B_r=0,3T$).....	12
Fig.2 – Geometria I.....	13
Fig. 8 – Geometria II.	14
Fig.3 – Linhas de Campo para $p = 2 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$	15
Fig.12 – Geometria III.	17
Fig.13 – Vista em corte do atuador com as dimensões finais.....	32
Fig.14 – Distribuição do campo magnético na armadura do atuador.	35
Fig.15 – Distribuição do campo magnético na armadura do atuador redimensionado. .	36
Fig.15 – Imagem do atuador desmontado.	39
Fig.16 – Imagem do atuador montado.....	39
Fig.17 – Montagem para teste de polaridade.....	40
Fig. 18 – Arranjo experimental utilizado.	41
Fig.19 – Detalhe da região em destaque na Fig. 18.....	41
Fig.20 – Como medir a posição do eixo.	42
Fig.4 – Linhas de campo para $p = 2 \text{ mm}$ e $I = 4,5 \text{ A/mm}^2$	49
Fig.5 – Linhas de campo para $p = 8,22$ e $I = 4,5 \text{ A/mm}^2$	50
Fig.6– Linhas de Campo para $p = 8,22 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$	51
Fig.7 – Linhas de Campo para $p = 16 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$	52
Fig.8– Linhas de Campo para $p = 0 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$	53
Fig.9 – Linhas de Campo para $p = 0 \text{ mm}$ e $I = 3,0 \text{ A/mm}^2$	54
Fig. 10 – Linhas de Campo para $p = 5,28 \text{ mm}$ e $I = 3,0 \text{ A/mm}^2$	55
Fig. 11 – Linhas de Campo para $p = 13,20 \text{ mm}$ e $I = 0,5 \text{ A/mm}^2$	56
Fig.11 – Linhas de Campo para $p = 23,76 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$	57



INTRODUÇÃO:

Os atuadores magnéticos com ímãs permanentes podem ser utilizados para acionar disjuntores [1], com injetores de combustível e sistemas pneumáticos [2]. Quando usado como injetor de combustível ou em sistemas pneumáticos o atuador deve produzir um movimento linear rápido, contudo a força produzida também deve ser levada em consideração [2].

A utilização atuadores magnéticos para acionar disjuntores reduz a manutenção, aumenta a confiabilidade do sistema. O aumento da confiabilidade é devido a substituição do atuador mecânico pelo magnético que requer bem menos manutenção do o mecânico [1]. Estes dispositivos possuem características de construção, operação e manutenção que tem contribuído para o aumento significativo de sua implantação em sistemas elétricos [3] [1], assim como a redução à dependência de sistemas mecânicos para acionar os disjuntores. Pois esses sistemas requerem manutenção periódica mais intensa o que limita a confiabilidade do sistema.

O ímã permanente confere ao atuador dois estados estáveis, portanto o mesmo não necessita de sistemas mecânicos ou alimentação contínua da bobina para manter a posição. A mudança de estado é provocada pela injeção de um pulso de corrente na bobina que provoque uma força sobre a peça móvel no sentido do eixo axial.

O projeto destes dispositivos é conduzido no sentido de atingir os objetivos como: tempo de resposta adequado, força de retenção (F_{ret}) e expulsão (F_{exp}), e curso do movimento. Atingir estes objetivos requer um estudo detalhado da geometria a ser adotada, bem como do tipo de ímã e a orientação de sua magnetização.

O projeto de máquinas elétricas abrange a análise de fenômenos de natureza bastante distinta quais sejam: magnéticos, elétricos, mecânicos e térmicos. Todos estes fatores devem ser considerados conjuntamente para que o resultado final do projeto atenda as especificações de desempenho, principalmente. É um típico problema multidisciplinar de otimização. É possível utilizar programas que façam uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver estes problemas. Contudo o uso do MEF com o objetivo de encontrar a melhor combinação para os parâmetros variáveis do projeto, otimizar, torna-se restrito conforme cresce o número variáveis a serem otimizadas, pois na maioria das vezes o problema requer o auxílio de métodos iterativos de otimização implicando em chamadas repetitivas à função objetivo. Aumenta-se tanto número de cálculos realizados com o MEF e como a necessidade de recursos computacionais também aumenta o tempo de execução da otimização.

Duas abordagens distintas podem ser adotadas para solucionar este problema: utilizar um modelo analítico ou utilizar uma aproximação do comportamento do dispositivo. O modelo analítico é obtido a partir das equações que descrevem os fenômenos presentes no funcionamento do dispositivo. O uso destes modelos permite uma análise mais rápida da função objetivo, pois a mesma é descrita por equações que não requerem grandes recursos para serem resolvidas. As rotinas de otimização podem, então, levantar em pouco tempo um conjunto de dados com as melhores soluções obtidas para otimizar a função objetivo. A aproximação que retrata o comportamento do dispositivo é obtida da seguinte forma:



- Um conjunto de valores para as variáveis do problema é selecionado. Este conjunto deve ser representativo, ou seja, deve conter um número significativo de combinações para as variáveis bem como representar o intervalo de domínio.
- Com o auxílio do MEF são calculadas as grandezas que compõem a função objetivo do problema de otimização neste conjunto.
- Utilizar funções de interpolação para obter os valores das grandezas de interesse nos pontos que se deseja.

Independente do método utilizado para simplificar o cálculo da função objetivo utiliza-se um algoritmo de otimização para levantar o valor da função objetivo em vários pontos do espaço de soluções do problema. Dentre estes pontos são selecionados aqueles de melhor desempenho para constituir as superfícies que serão então utilizadas no MEF para o cálculo mais detalhado desempenho do dispositivo.

OBJETIVOS DO TRABALHO:

Os objetivos deste trabalho são: projetar, com auxílio de ferramentas de otimização; e construir um dispositivo biestável, um atuador magnético.



1. Pesquisa bibliográfica

O uso de métodos de otimização no projeto de dispositivos eletromagnéticos tem sido amplamente estudado, principalmente com o avanço tecnológico da computação. Em [4] é descrito um “benchmark” no qual um motor DC sem escovas é projetado com a ajuda de métodos de otimização. O equacionamento do motor é feito através de expressões analíticas que descrevem fenômenos elétricos, magnéticos e térmicos do motor.

Este mesmo problema é analisado em [5] e [6], porém outros algoritmos de otimização são utilizados para analisar o problema. Os mais utilizados são algoritmos não-determinísticos, ou seja, algoritmos que não utilizam derivadas para solucionar o problema. Esta característica torna-os mais imunes a mínimos locais da função objetivo.

O Particle Swarm Optimization [7] é um método de otimização, pertencente ao conjunto dos algoritmos evolutivos, baseado no comportamento de enxames de insetos na natureza. Nos enxames, se um componente localiza um lugar com comida ou que seja seguro, os demais podem segui-lo caso seja necessário. No método cada membro, denominado partícula, possui velocidade e posição próprias. A posição representa a solução possível do problema e é composta pelos parâmetros de otimização. A velocidade tem como objetivo mudar a posição da partícula. Existem algumas constantes inerentes ao método, cujos valores são fixados no intervalo [1,2], e também fatores determinados por números aleatórios gerados dentro do intervalo [0,1].

A posição e a velocidade das partículas são atualizadas a cada iteração do método, e a cada iteração o número de chamadas da função objetivo depende do tamanho escolhido para a população. O processo de otimização pode ser interrompido quando a posição das partículas não possui variação maior que um valor prescrito anteriormente (ϵ) ou o número máximo de iterações é atingindo.

O Algoritmo Genético [8] é um outro método de otimização pertencente ao conjunto dos algoritmos evolutivos, que são fundamentalmente baseados na evolução biológica. A população inicial é constituída por cromossomos, em que cada um representa uma possível solução do problema, é escolhida aleatoriamente dentro dos limites impostos. A cada iteração ou geração a população é submetida à função objetivo e classificada de acordo com o desempenho de cada cromossomo.

Para formar a população da próxima geração os melhores indivíduos são selecionados para a reprodução utilizando os mecanismos de *crossover* e mutação. O mecanismo de *crossover* possibilita a geração de novos cromossomos e a mutação modifica uma ou mais características do cromossomo que foi selecionado, o que possibilita uma população mais diversificada. O operador de mutação permite ao método passar por mínimos locais da função objetivo.



2. Metodologia

O método de otimização adotado foi o Particle Swarm Optimization (PSO), que é um método de otimização estocástico baseado em população desenvolvido por Dr. Eberhart Dr. Kennedy em 1995. É baseado no comportamento social de pássaros voando em grupo para se alimentar, ou cardume de peixes nadando.

A característica observada nestes grupos de animais utilizada pelo método consiste no fato dos demais membros do grupo seguirem o membro que encontra mais alimento, e sempre que outra posição mais favorável é encontrada por outro membro do grupo os demais buscam esta nova posição. Ou seja, os indivíduos sempre buscam a melhor posição do ambiente, maior quantidade de alimento disponível, usando os demais membros como referência.

Na implementação do método cada indivíduo é chamado de partícula e cada partícula percorre o espaço multidimensional de soluções seguindo a partícula de melhor posição. A posição de cada partícula é dada pelos valores das variáveis de otimização. Como em todo método evolucionário a população inicial é escolhida aleatoriamente no espaço de soluções e a busca da solução ótima é realizada com a atualização das gerações. Contudo o Swarm não possui operadores evolutivos.

A atualização da posição de cada partícula ocorre segundo equação (1), na qual a próxima posição depende da posição anterior da partícula e da sua 'velocidade'. A velocidade é dada pela expressão (2) e depende da melhor posição alcançada pela população e da melhor posição obtida pela partícula. Cada partícula armazena sua melhor posição alcançada. O parâmetro ω representa a dificuldade de modificar a velocidade da partícula, rd_1 e rd_2 são números aleatórios pertencentes ao intervalo $[0,1]$, e c_1 e c_2 são constantes de ajuste do método que variam no intervalo $[1,2]$.

$$x_{i+1} = x_i + v_i \quad (1)$$

$$v_{i+1} = \omega \cdot v_i + c_1 \cdot rd_1(x_{best} - x_i) + c_2 \cdot rd_2(x_g - x_i) \quad (2)$$

O conceito do PSO consiste em variar a velocidade da partícula a cada iteração forçando a exploração de outras regiões do espaço de soluções.



3. Anteprojeto

3.1. Projeto Inicial

Partindo da geometria do ímã a ser utilizado (Fig.-1) dois esboços para uma possível geometria do atuador foram desenvolvidas Fig.-2 e Fig.-3, ambas são axissimétricas em relação ao eixo z. e analisadas com o auxílio do programa Flux [7], que utiliza o MEF para realizar a análise da geometria. O estudo tem por objetivo levantar o comportamento da Força de relutância em função da posição da parte móvel para alguns valores de densidades de correntes aplicadas na bobina.

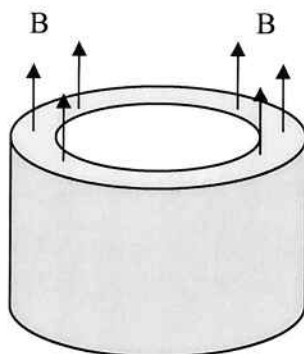


Fig.1 – Ímã de Ferrite ($B_r=0,3T$)

Construção das Geometrias: As geometrias foram desenhadas no programa Flux 9.0.3[10] que utiliza o método dos elementos finitos para cálculo de grandezas elétricas e mecânicas. Para tornar possível uma análise prévia do comportamento das linhas de campo magnético na estrutura foram feitas as seguintes considerações iniciais:

- Ímã: Ferrite; $B_R = 0,3 T$, $\mu_R = 1,05$, $H_I = 24,18 \text{ mm}$, $R_{int-I} = 11,53 \text{ mm}$, $R_{ext-I} = 27,55 \text{ mm}$. As dimensões são de um ímã existente.
- Armadura: Ferro; $\mu_R = 1000$; não-saturável (esta característica será reavaliada posteriormente); sem perdas por correntes Foucault [2].
- As dimensões iniciais são baseadas no tamanho do ímã que será utilizado na construção do protótipo.

Para a geometria I o seguinte conjunto de parâmetros foi utilizado, maiores detalhes podem ser observados na Fig.1:

$R_d \text{ (mm)}$	$L_B \text{ (mm)}$	$H_1 \text{ (mm)}$	$H_2 \text{ (mm)}$	$L_E \text{ (mm)}$	$p \text{ (mm)}$	$R_1 \text{ (mm)}$	$R_2 \text{ (mm)}$
27,55	20,00	40,00	20,00	52,00	2,00	$R_d + L_B$	$R_1 + H_2$

Tabela-1. Parâmetros da geometria-I

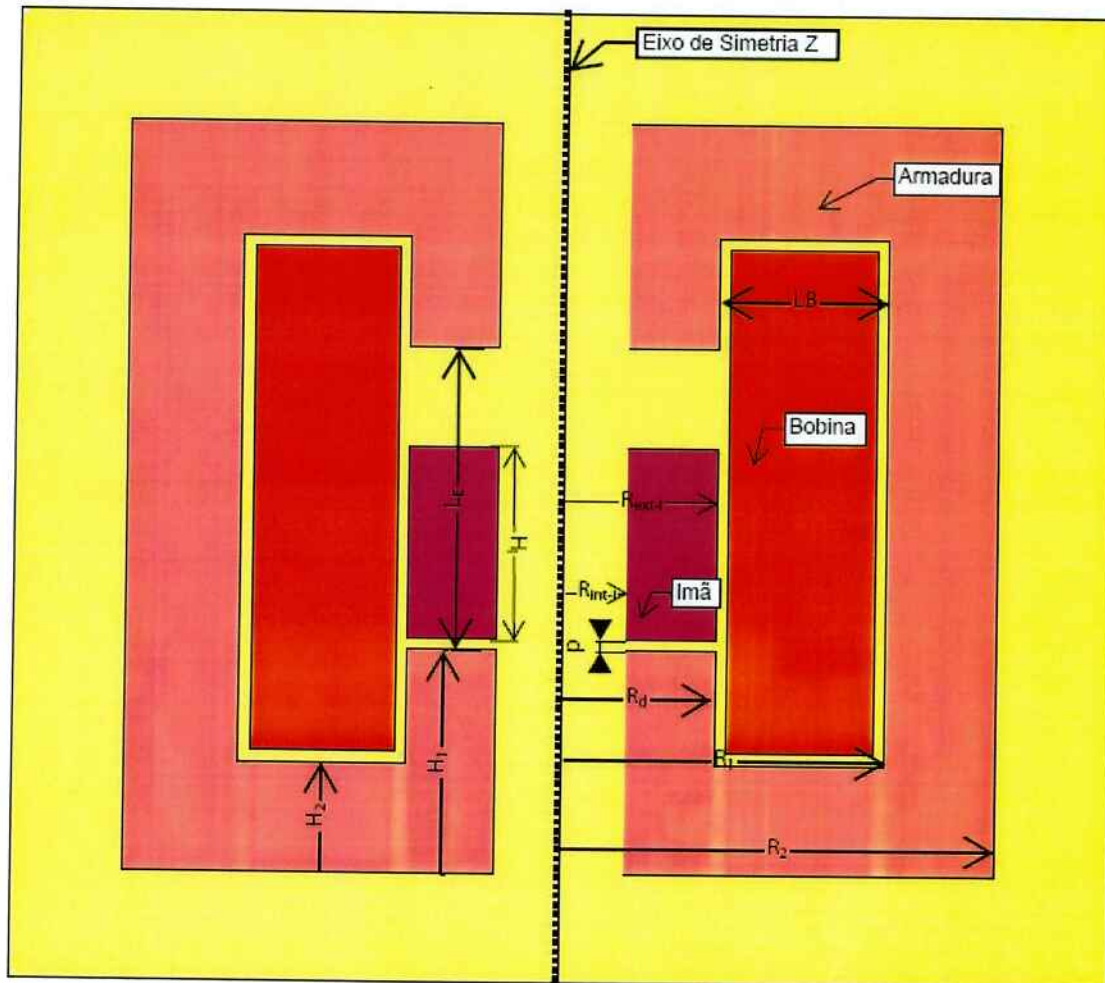


Fig.2 – Geometria I

Para a geometria II os seguintes parâmetros foram utilizados, maiores detalhes na Fig.8:

e (mm)	H _B (mm)	L _B (mm)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	H _{Fe} (mm)	L _E (mm)	p (mm)	R ₁ (mm)	R ₂ * (mm)
2,0	20,00	20,00	24,00	34,00	37,0	122,00	0	49,55	73,55

Tabela-2. Parâmetros utilizados na Geometria-II.

O desenho da geometria parametrizada facilitará a análise da sensibilidade dos parâmetros, ou seja, como a mudança do parâmetro influencia no comportamento do dispositivo. Vale lembrar também que cada cálculo do Flux demora de 30s a 1 min para ser efetuado, portanto não será viável analisar a variação simultânea de todos os parâmetros para muitos valores.

$$* R_2 = R_{ei} + L_B + e + L_I \quad (3)$$

Com $L_I = 24 \text{ mm}$.

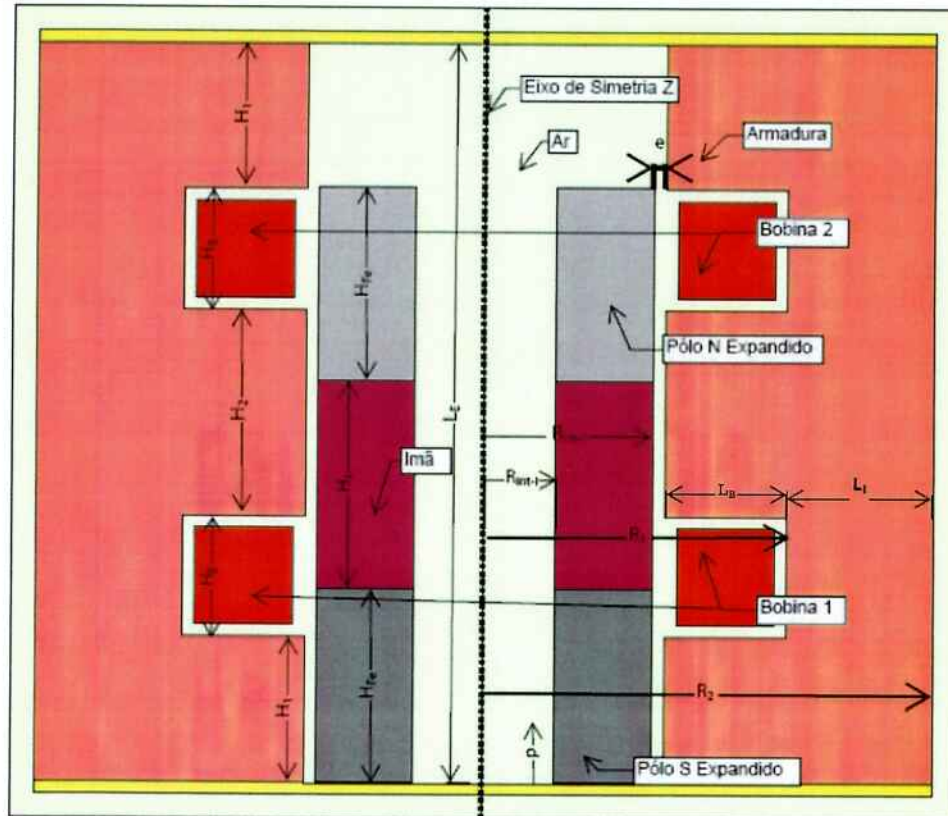


Fig. 8 – Geometria II.

As linhas de campo e os vetores do campo magnético nas regiões de fronteira da geometria podem ser observados na Fig. 3 abaixo, as demais imagens estão no Anexo A. Essas grandezas são fundamentais para analisar a dinâmica da geometria analisada. A Tabela-3 apresenta as combinações utilizadas e o valor da força sobre o ímã na direção do eixo Z. Para a geometria I quando $p = 2 \text{ mm}$ temos o ímã na sua posição estável, pois será necessário adicionar um material para evitar o desgaste do ímã com a comutação.

Fig.	$p \text{ (mm)}$	$I \text{ (A/mm}^2\text{)}$	$F_z \text{ (N)}$	Geometria
3	2,0	0	-44,05	I
4	2,0	4,5	8,35	
5	8,22	4,5	2,67	
6	8,22	0	-6,72	
7	16,0	0	27,44	II
8	0	0	-0,84	
9	0	3,0	39,21	
10	5,28	3,0	34,87	
11	13,20	0,5	7,21	
12	23,76	0	0,81	

Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados

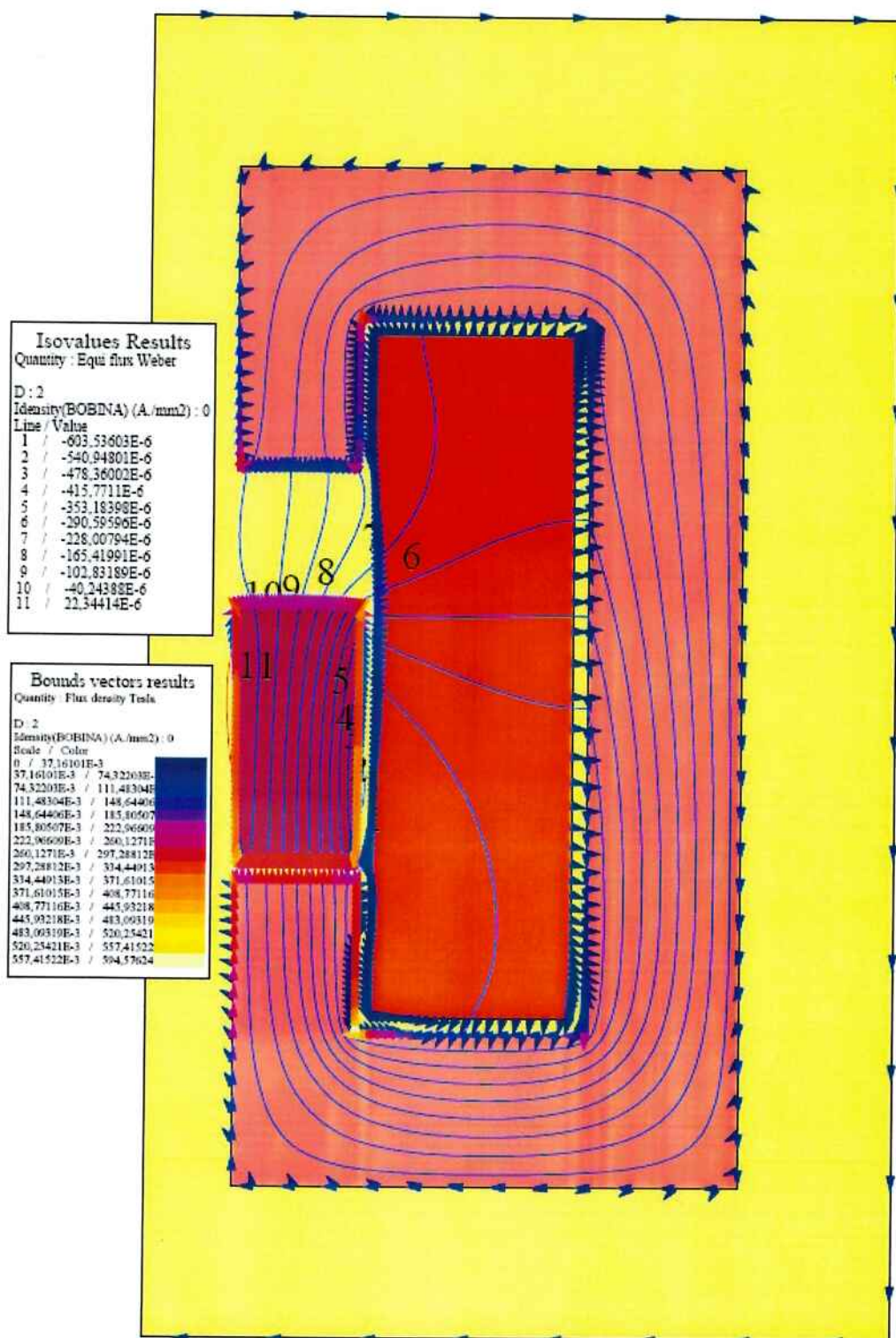


Fig.3 – Linhas de Campo para $p = 2 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$.

Análise preliminar das geometrias

Com os resultados da simulação é possível concluir que a geometria I possui uma boa força de retenção, ou seja, quando em repouso em qualquer das



posições estáveis é preciso aplicar uma força significativa para provocar o movimento. Entretanto será necessária uma densidade de corrente elevada para forçar a mudança de estado com uma força significativa, pois na prática o atuador deve movimentar uma carga mecânica. A geometria II apresenta um comportamento oposto, baixa força de retenção e alta força de expulsão para densidades de corrente relativamente baixas. A geometria I apresenta maior facilidade de construção comparada com a geometria II.

Pensando nestes aspectos surgiu uma terceira geometria Fig.13 que é uma combinação das duas primeiras. Uma característica aproveitada da geometria I é o fato da armadura facear o ímã pelas faces superior ou inferior, isto propicia uma força maior de retenção. Da geometria II temos a presença de duas bobinas operando em série, ou seja, enquanto uma provoca a repulsão na extremidade da armadura com ímã a outra bobina tenta atrair o ímã para a outra posição estável. Também é característica da geometria II a armadura em E, isto facilita a atuação das bobinas.

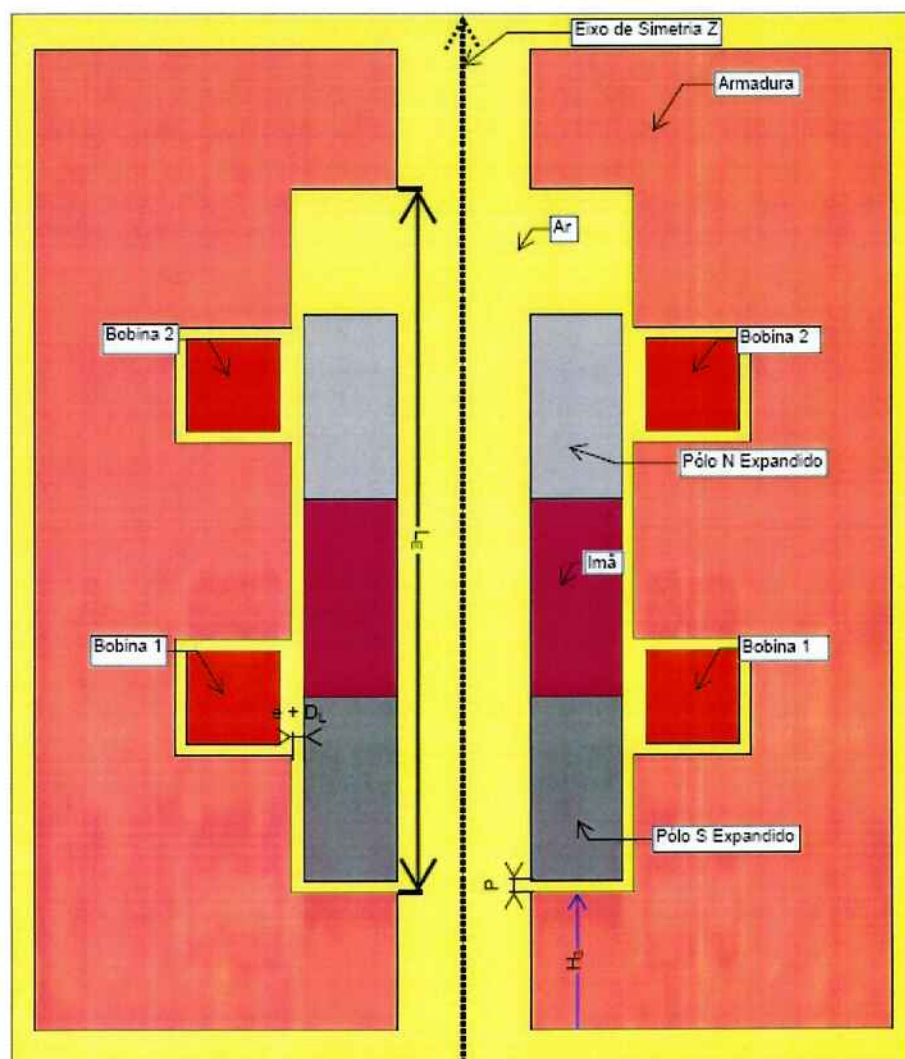
Os parâmetros construtivos da geometria III são semelhantes ao da geometria II com a adição de dois novos D_L e H_3 .

e (mm)	H_B (mm)	L_B (mm)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	H_{Fe} (mm)	L_E (mm)	P (mm)	R_1 (mm)	R_2^* (mm)	H_3 (mm)	D_L (mm)
2,0	20,0	20,0	24,00	34,0	37,03	122,00	2,0	49,55	73,55	24,0	0

Tabela-4. Parâmetros utilizados na Geometria-III.

O parâmetro D_L aumenta o entreferro entre a lateral dos pólos e a armadura nas duas extremidades do E. O aumento em D_L , provavelmente, resultará em aumento da força de retenção, pois a maior parte do fluxo magnético preferirá o caminho de menor relutância, a região inferior do pólo.

* R_2 para esta geometria também é dado pela equação (3), com $L_I=24$ mm.





3.2. Análise das geometrias

Para comparar as geometrias foi calculada a força que atua sobre o imã na direção Z, F_z , para diversos valores de “p” e densidade de corrente “I”. Com os resultados os seguintes gráficos foram levantados. O intervalo de variação para a densidade de corrente $[0,6]$ foi considerado para que a comutação fosse observada em todas as geometrias propostas, pois apenas será considerado o valor máximo de $J = 4 \text{ A/mm}^2$.

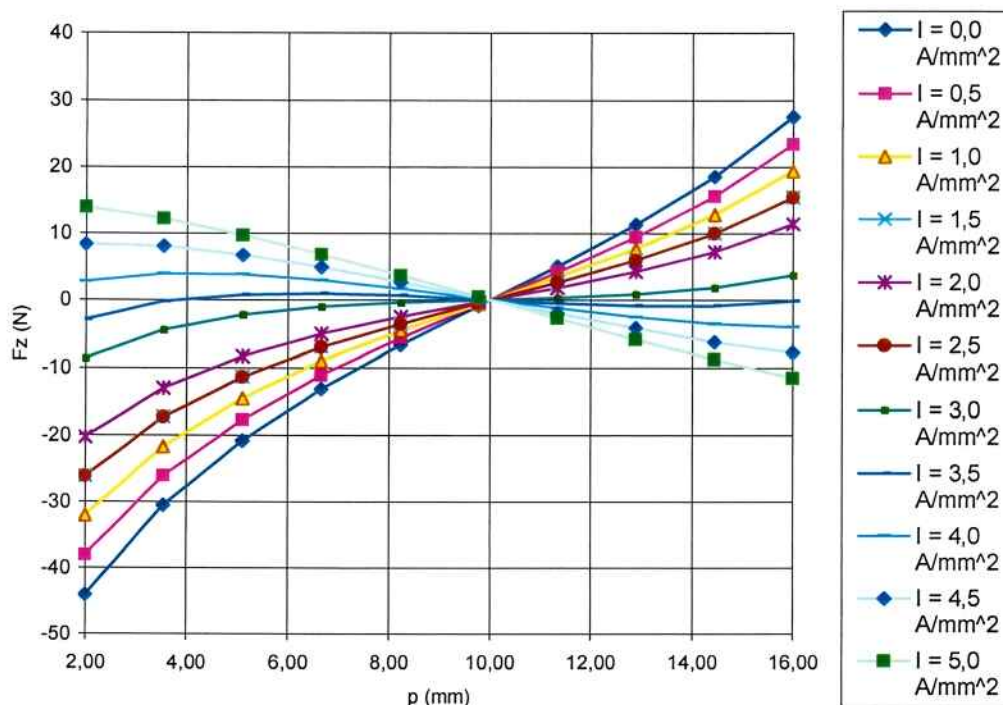


Gráfico-1 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria I.

A geometria I apresenta um valor de F_{ret} superior a 40N, ou seja, em teoria suportaria uma carga de 4 kg na direção favorável à mudança de estado do atuador já a F_{exp} não supera 20N mesmo quando $J = 5 \text{ A/mm}^2$. Este comportamento é devido à geometria adotada, uma vez que, a repulsão provocada pelo campo gerado pela bobina atua em ambas as faces do imã com maior intensidade na face em contato com a armadura. A parcela que atua na outra face do imã provoca uma força no sentido oposto ao movimento e sua contribuição aumenta a medida que o movimento avança.

No gráfico 1 há um ponto em que a força sobre o imã é nula para todos os valores de densidade de corrente, este ponto é um ponto de equilíbrio instável para a parte móvel. Para $J = 0 \text{ A/mm}^2$ este ponto representa que o campo magnético gerado pelo imã encontra a mesma dificuldade para percorrer o entreferro entre o imã e a armadura pelas duas faces.

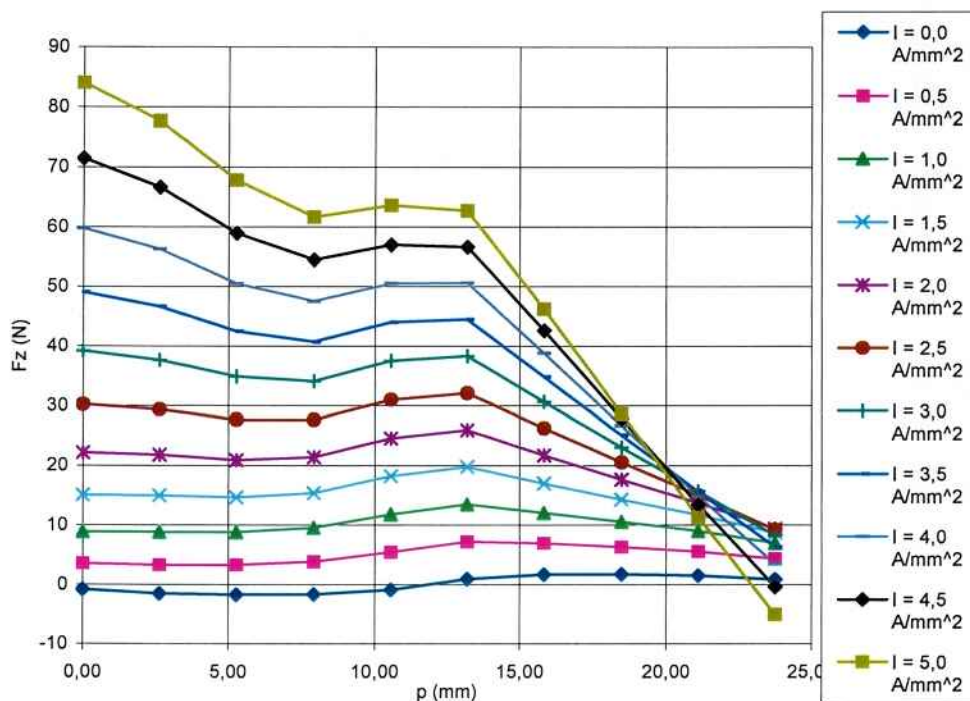


Gráfico-2 – Força Magnética atuante sobre o imã – Geometria II.

Para a geometria II com densidade de corrente nula, é possível observar o gráfico 3 que existe posições para o imã nas quais a força de relutância aumenta forçando o imã a voltar ao estado original. Esta força de relutância atua após o início da comutação resistindo à força provocada pelo impulso de corrente. Como consequência, o pico e o tempo do pulso de corrente deverão ser maiores. Outro aspecto negativo é o valor da força de retenção ser inferior a 2N, ou seja, caso o atuador esteja na posição vertical e a massa do conjunto eixo+carga for superior a 0,2 kg o atuador não se manterá na posição superior.

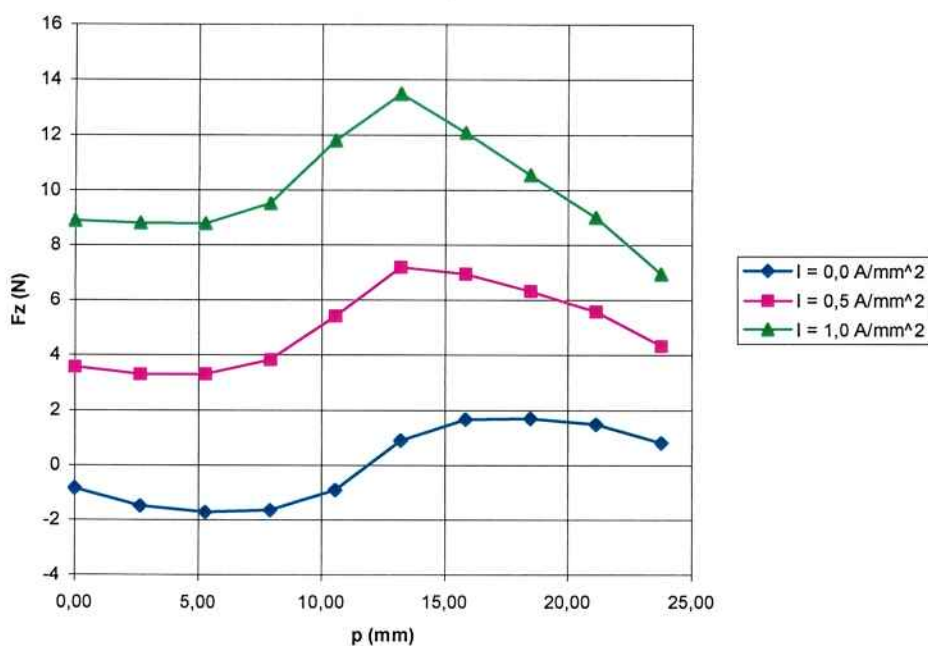


Gráfico-3 – Força Magnética atuante sobre o ímã, para baixos valores de I – Geometria II.

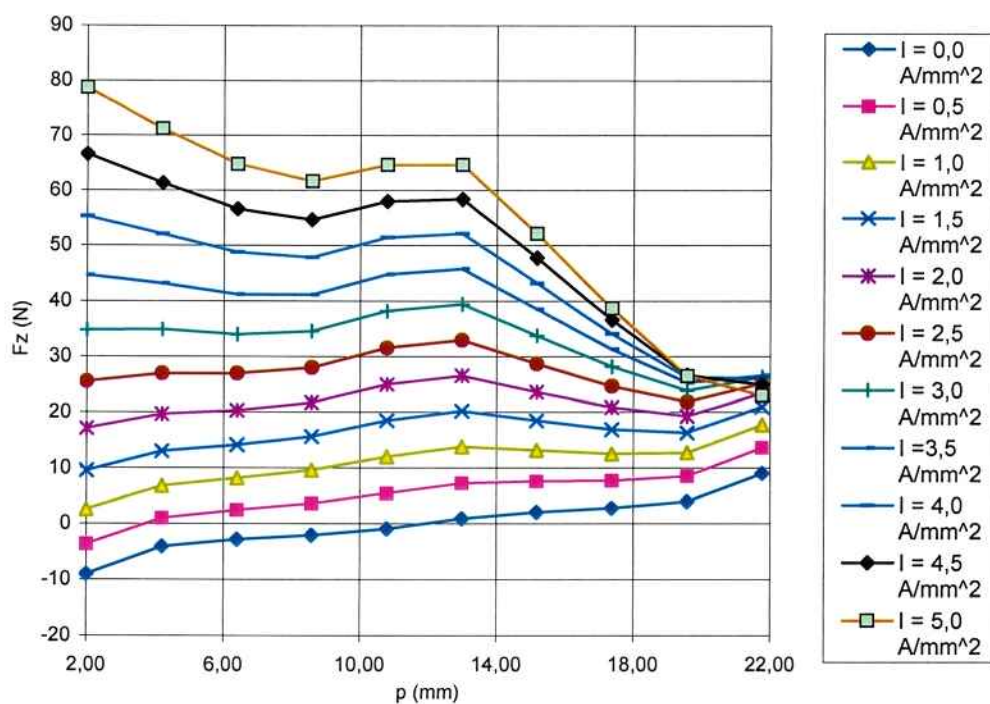


Gráfico-4 – Força Magnética atuante sobre o ímã – Geometria III.

Pelo gráfico 4 é possível observar uma melhora no valor da força de retenção quando adotada a geometria III, com $D_L = 0$ mm, sem alteração significativa no valor da densidade de corrente para comutação, contudo o valor de F_{ret} ainda é abaixo de 10N. Uma tentativa de reduzir este fenômeno é fazer $D_L = 10$ mm, com isso o entreferro lateral aumenta, reduzindo a força de



relutância sobre o ímã após o início da comutação. Esta mudança resulta em um aumento da força de retenção e também da densidade de corrente necessária para provocar a mudança de estado conforme pode ser observado no gráfico 5.

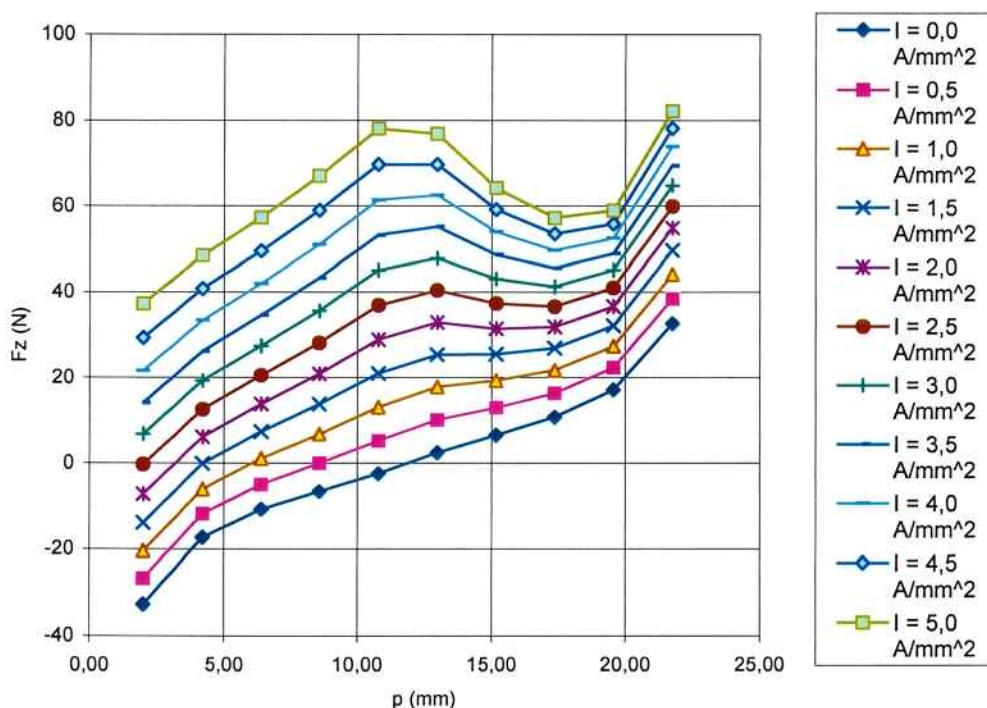


Gráfico-5 – Força Magnética atuante sobre o ímã – Geometria III – $D_L = 10$ mm.

Pelos gráficos é possível concluir que a geometria I apresenta um bom valor para a força de retenção, para diminuir a necessidade de corrente para provocar a expulsão basta aumentar a área destinada a bobina. A geometria III é a mais interessante de se otimizar uma vez que a variação dos parâmetros permite uma variação significativa nas grandezas de interesse.

Pelas razões acima discutidas serão consideradas para a otimização apenas as geometrias I e III para o atuador.



4. Projeto Final

4.1. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade da geometria é realizada variando os parâmetros dados na tabela 5 e na tabela 6, para as geometrias I e III respectivamente, verificando o comportamento da função objetivo. Cada parâmetro influi de maneira diferente na função objetivo e a variação em conjunto de dois parâmetros pode influenciar de outra forma a função objetivo. A variação conjunta de dois parâmetros só foi considerada quando ocorrem alterações na geometria ou variação de outro parâmetro indiretamente. Por se tratar de um estudo comportamental da função objetivo não são considerados os resultados obtidos.

Este estudo de sensibilidade tem por objetivo determinar qual a influência de cada parâmetro nas grandezas de análise, F_{ret} e F_{exp} para o problema proposto, e quais os parâmetros são melhores candidatos a variáveis para serem otimizadas. Os parâmetros candidatos a variáveis de otimização são para os quais as funções F_{ret} e F_{exp} possuem maior dependência ou aqueles cuja variação facilita atender restrições ou resulta em bons valores para a função objetivo.

Geometria I

Na Tabela-5 é possível observar os parâmetros analisados e a faixa de variação utilizada.

Parâmetro	Intervalo
R_D	[19,54;39]
H_1	[21;40]
H_2	[10;30]
L_B	[20;30]
L_E	[54,24;74,24]

Tabela-5. Parâmetro e intervalo analisado para a geometria I.

O gráfico 6 mostra o comportamento da força de retenção (F_{ret}) e da força de expulsão (F_{exp}) em relação à variação de R_D . No Anexo B do gráfico 6 até 10 é possível observar a influência de cada parâmetro na força sobre o ímã, F_{ret} é a força atuante no ímã quando $J = 0 \text{ A/mm}^2$ e F_{exp} a força quando $J > 0$. Esses dados foram obtidos utilizando o método dos elementos finitos.

- R_D – O valor de F_{ret} aumenta com o aumento de R_D até $R_D \cong 25 \text{ mm}$ começando a diminuir gradativamente com o aumento de R_D . O valor de F_{exp} cresce com o aumento de R_D até $R_D \approx 28$ e passa a diminuir mais de maneira mais acelerada com o aumento de R_D , vale lembrar que o valor de F_{exp} deve ser o mais positivo possível. Informações observada no gráfico 6.



- L_B – Tanto F_{ret} e F_{exp} aumentam com o aumento de L_B , porém a variação em F_{ret} não é significativa. Gráfico 7 do Anexo B
- H_1 – O aumento de H_1 provoca um aumento pouco significativo em F_{ret} e aumento significativo de F_{exp} . Gráfico 8 do Anexo B.
- H_2 – O aumento de H_2 não provoca alteração no valor de F_{ret} , contudo diminui o valor de F_{exp} . Gráfico 9 do Anexo B.
- L_E – A variação de L_E influi um pouco mais significativamente no valor de F_{ret} . Gráfico 10 do Anexo B.

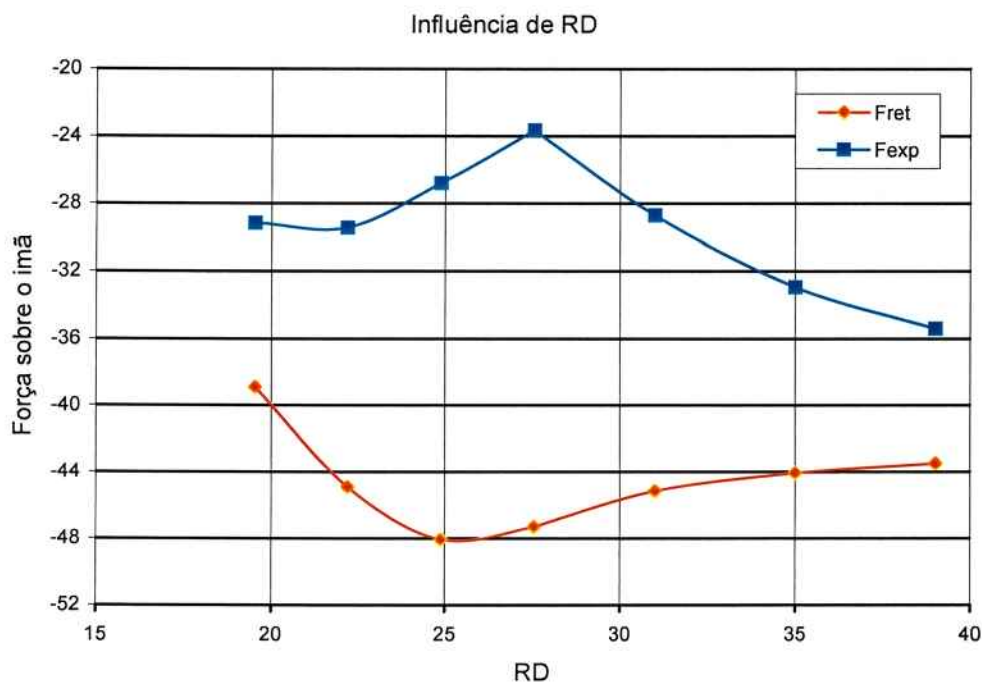


Gráfico-6 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de R_D .

Geometria III

A Tabela-6 apresenta os parâmetros e seus respectivos intervalos de variação considerados.

Parâmetro	Intervalo
X	[0;14]
H ₃	[18;30]
L _B	[20;30]
D _L	[0;18]
Y	[-4;4]

Tabela-6. Parâmetro e intervalo analisado para a geometria III.



O parâmetro X está relacionado a H_1 e H_B segundo as equações (4) e (5), respectivamente. O parâmetro H_1 influi no trajeto das linhas de campo, pois determina o tamanho da área da armadura que faceia lateralmente um dos pólos do imã. Logo, terá influência significativa em F_{ret} e F_{exp} , contudo a distância para excursão da parte móvel será alterada proporcionalmente a H_1 . Ao aumentar o valor de H_B a área da bobina é aumentada assim, para o mesmo valor de J aumenta o valor de F_{exp} , porém a excursão também será afetada. O parâmetro Y analisa a influência na redução simultânea de H_2 e H_{Fe} como apresentado nas equações (6) e (7), pois assim a excursão não é afetada.

$$H_1 = 24 - X \quad (4)$$

$$H_B = 20 + X \quad (5)$$

$$H_2 = 34 - Y \quad (6)$$

$$H_{Fe} = 32 - Y \quad (7)$$

O aumento de X reduz H_1 , (4), e aumenta H_B , (5), desta forma se consegue ao mesmo tempo:

- Aumentar F_{ret} – reduz a área da armadura que faceia lateralmente o pólo do imã;
- Aumentar F_{exp} – aumenta a área da bobina permitindo um maior número de espiras;
- Manter a distancia para excursão da parte móvel constante.

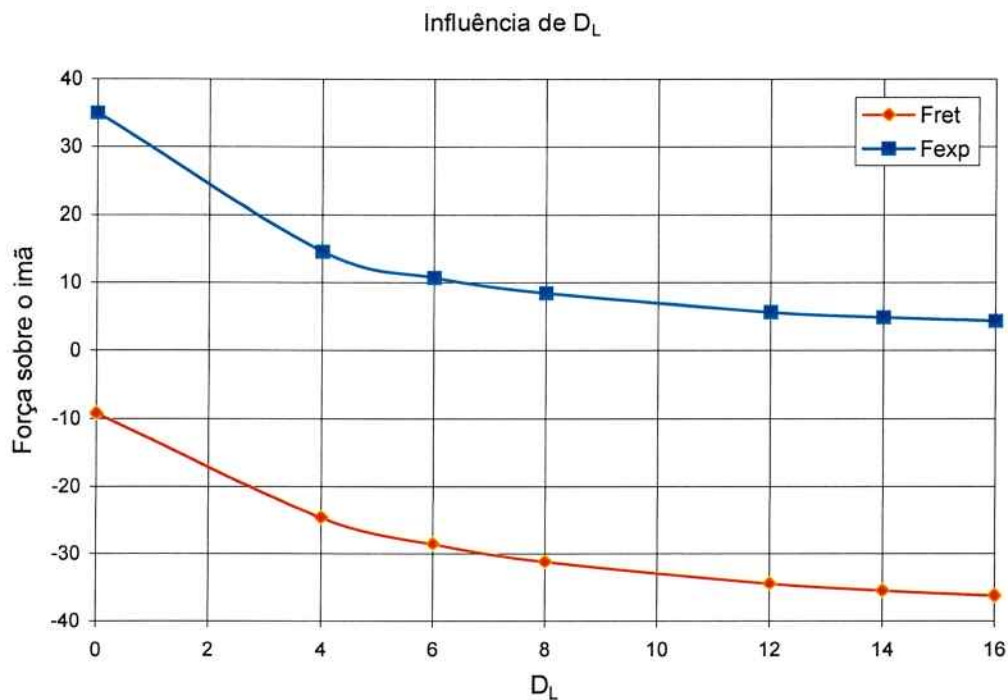


Gráfico-11 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação D_L .



No gráfico 11 é possível observar como a variação do parâmetro D_L influencia F_{ret} e F_{exp} , e nos gráficos de 12 ao 15 do Anexo B a resposta de F_{ret} e F_{exp} aos demais parâmetros da Tabela-6. Analisando estes gráfico conclui-se:

- $D_L \rightarrow$ Ao aumentar D_L provoca o aumento de F_{ret} , entretanto F_{exp} reduz na mesma proporção do aumento de F_{ret} . No gráfico 16, que apresenta a variação do módulo de F_{ret} e F_{exp} dada a variação de D_L , é possível observar melhor este comportamento.

Módulo da força sobre ímã em função de D_L

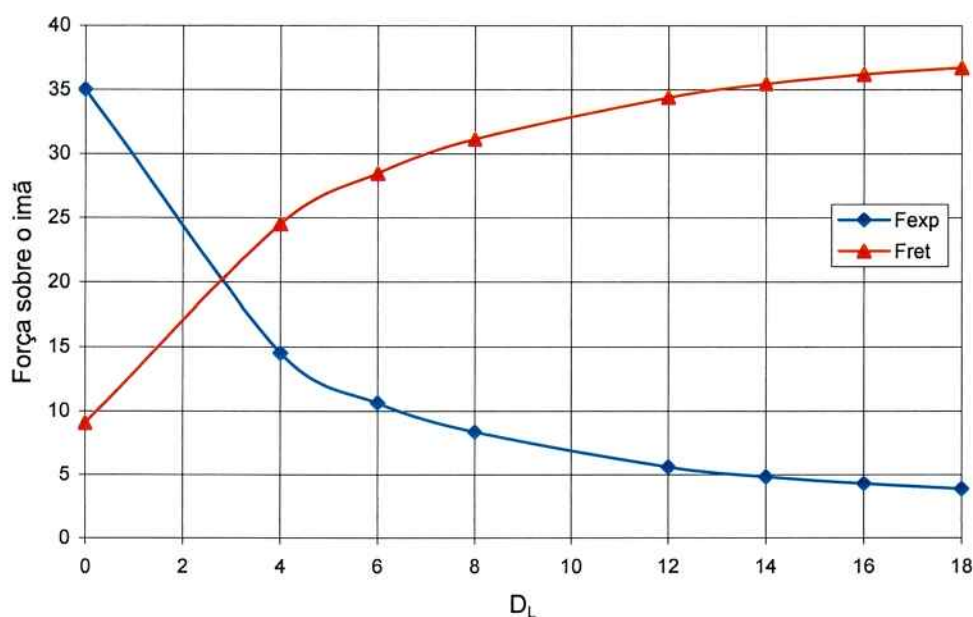


Gráfico-16 – Módulo de F_{ret} e F_{exp} em função D_L .

- $X \rightarrow$ Como pode ser observado no gráfico 12 do Anexo B, F_{ret} aumenta linearmente com o aumento de X . Embora F_{exp} aumente com o aumento de X , a curva F_{exp} vs. X apresenta inicialmente uma maior derivada para $X \in [0,3]$, no intervalo $]3,7]$ a derivada é ligeiramente negativa e no intervalo analisado a derivada volta a ser positiva, porém menor que o valor do intervalo inicial.
- $H_3 \rightarrow$ A influência de H_3 é pouco significativa tanto para F_{ret} quanto para F_{exp} . Gráfico 13 do Anexo B.
- $L_B \rightarrow$ A variação de L_B pouco influi no valor de F_{ret} . F_{exp} aumenta com o aumento de L_B , pois ocorre aumento da área destina à bobina. Gráfico 14 do Anexo B.
- $Y \rightarrow$ Considerando $F_{exp}(Y|_{Y=0}) = F_{exp-0}$, daí $F_{exp}(Y|_{Y \neq 0}) < F_{exp-0}$ sendo que para $Y < 0$ F_{exp} reduz mais rapidamente, contudo a variação não é muito significativa. A variação de F_{ret} devido à variação de Y é pouco significativa. Gráfico 15 do Anexo B.



Baseado nas conclusões expostas acima, acerca da dependência de F_{ret} e F_{exp} em relação aos parâmetros mencionados na Tabela-6, os melhores parâmetros para serem otimizados são: X , D_L e L_B . No próximo item estes parâmetros serão otimizados definindo assim as dimensões finais do dispositivo.

4.2.Otimização

O projeto final consiste na etapa de síntese ou otimização do projeto determinando assim as dimensões finais do dispositivo. Um algoritmo de otimização é utilizado para buscar a combinação das variáveis que fornece a melhor combinação para a força de retenção e expulsão. O algoritmo otimizador selecionado neste caso é o Particle Swarm Optimization (PSO) e o código de implementado pode ser encontrado no Anexo C. O otimizador funcionará em conjunto com um modelo de substituição para o cálculo das forças desejadas evitando o uso do modelo do atuador construído utilizando o Flux, o que tornaria o processo de otimização mais demorado.

Um modelo de substituição é construído através do cálculo dos valores da função desejada para a combinação de diferentes valores das variáveis do problema de maneira a representar adequadamente o espaço da função analisada. Para o caso deste trabalho as funções desejadas são:

- $F_{ret}(R_D, H_I, L_B)$ = força de retenção na geometria I em função de R_D , H_I e L_B .
- $F_{exp}(R_D, H_I, L_B)$ = força de expulsão na geometria I em função de R_D , H_I e L_B .
- $F_{ret}(X, D_L, L_B)$ = força de retenção na geometria III em função de X , D_L e L_B .
- $F_{exp}(X, D_L, L_B)$ = força de expulsão na geometria III em função de X , D_L e L_B .

A escolha dos parâmetros para serem as variáveis do problema teve por base a análise de sensibilidade realizada. A variação de cada parâmetro é apresentada na Tabela-7 e na Tabela-8 para geometria I e III respectivamente.

Parâmetro	Lista de Valores					
	1	2	3	4	5	6
R_D	19,54	23,545	27,55	31,55	35,56	39,56
H_I	21	26,8	32,6	38,40	44,2	50
L_B	20	22	24	26	28	30

Tabela-7. Lista de valores utilizados na construção do modelo da geometria I.



Parâmetro	Lista de Valores						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0	2,5	5	7,5	10	12,5	14
D _L	0	3	6	9	12	15	
L _B	20	22	24	26	28	30	

Tabela-8. Lista de valores utilizados na construção do modelo da geometria III.

O modelo que substitui o Flux para o cálculo da função objetivo utilizado neste trabalho é o Kriging [11] implementado pela rotina fornecida pelo Professor Luiz Lebensztajn. A rotina retorna gera uma função de aproximação para o cálculo de F_{ret} e F_{exp} dado os valores de R_D , H_I e L_B para a geometria I e X, D_L e L_B para a geometria III.

Uma premissa básica que atua também como restrição do problema é $F_{exp} > 0$. Como o PSO é um método de minimização da função objetivo F_{exp} é multiplicado por -1. A função objetivo (8) fica igual a (9), de (7) podemos concluir que tanto F_{ret} quanto F_{exp} contribuem da mesma forma para a função objetivo, possuem o mesmo peso.

$$F_{OBJ} = F_{ret} + (-1 \cdot F_{exp}) \quad (8)$$

$$F_{OBJ} = F_{ret} - F_{exp} \quad (9)$$

Sendo $F_{ret} < 0$, pela orientação adotada, e desejável que $F_{exp} > 0$ a função objetivo será menor que zero, logo o mínimo da função possui o maior valor em módulo.

Otimização da geometria I

Com os valores de para F_{ret} e F_{exp} obtidos para todas as combinações dos parâmetros da geometria I foram levantados os gráficos 17 e 18. Estes gráficos são formados com os pontos que seriam utilizados para construir o modelo de substituição para o atuador.



Força de Expulsão da Geometria I

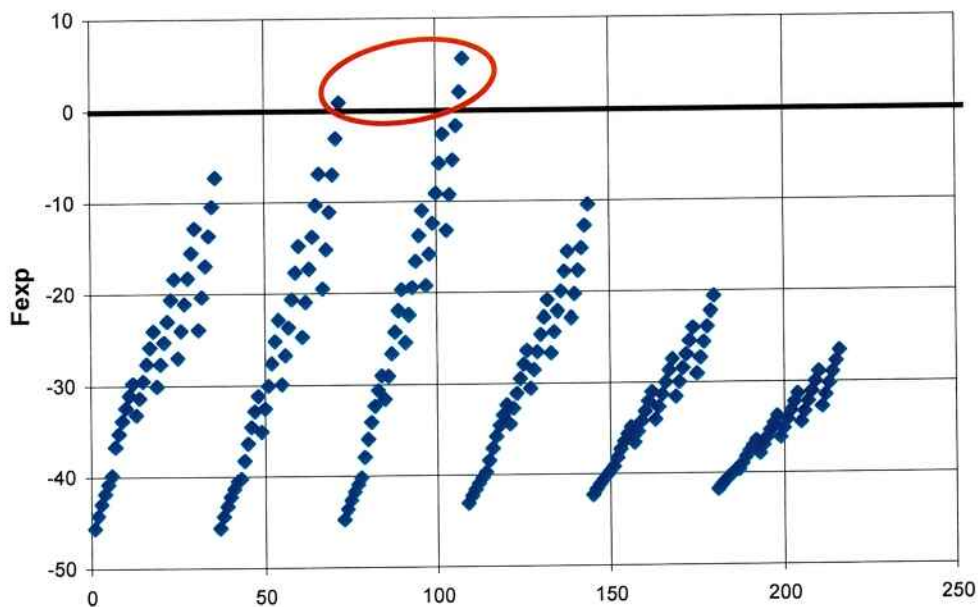


Gráfico-17 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para a geometria I.

Força de retenção da geometria I

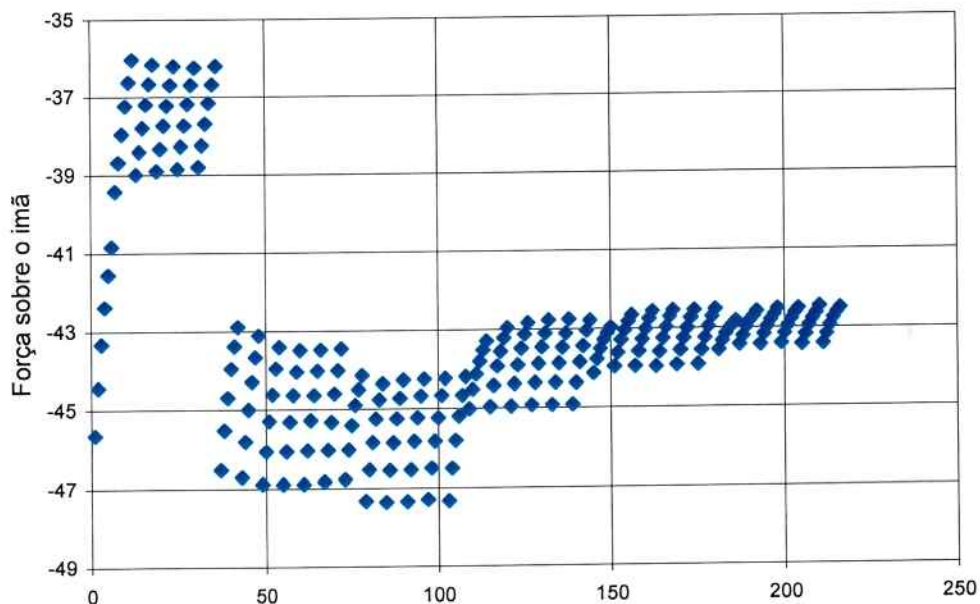


Gráfico-18 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para a geometria I.

Para a função F_{exp} somente os valores acima de zero representam possíveis soluções do problema, pois para $F_{exp} < 0$ não ocorre mudança de estado no dispositivo. É possível observar nos gráfico acima que apenas três soluções



atendem esta restrição e a melhor solução pode ser encontrada apenas por inspeção visual, assim esta geometria será desconsiderada na otimização.

Otimização da geometria III

Para esta geometria a função objetivo é dada pela equação (10), a modificação incorpora a restrição $F_{ret/min} = -32N$. Desta forma a função objetivo é punida, multiplicada por um número menor que 1, quando $|F_{ret}| < 32N$ tornando o valor da função objetivo maior, mais próximo de zero.

$$F_{OBJ} = (F_{ret} - F_{exp}) \cdot \left(\frac{F_{ret}}{F_{ret/min}} \right) \quad (10)$$

Nos gráficos de 19 e 20 é possível observar que existem inúmeras soluções que atendem as restrições do problema, 57,14% atendem $|F_{ret}| < 32N$ e 100% o requisito $F_{exp} > 0$. Também é possível observar que a melhor solução para o problema não é evidente, e como os dados utilizados nestes gráficos são os mesmos utilizados pelo modelo de substituição, fica evidente a necessidade do uso de métodos de otimização para encontrar a melhor solução para o problema.

Força de expulsão na geometria III

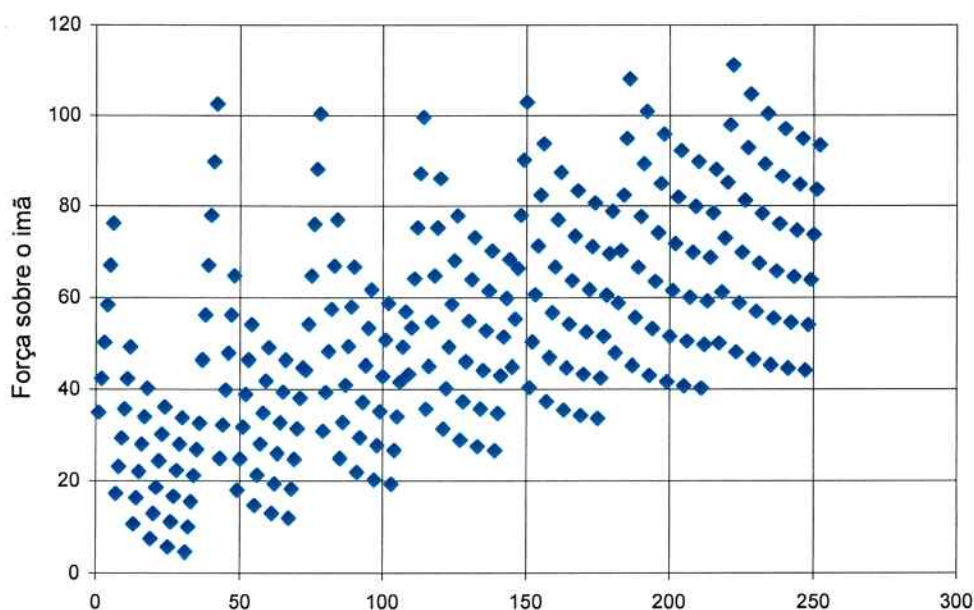


Gráfico-19 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para a geometria III.



Força de retenção na geometria III

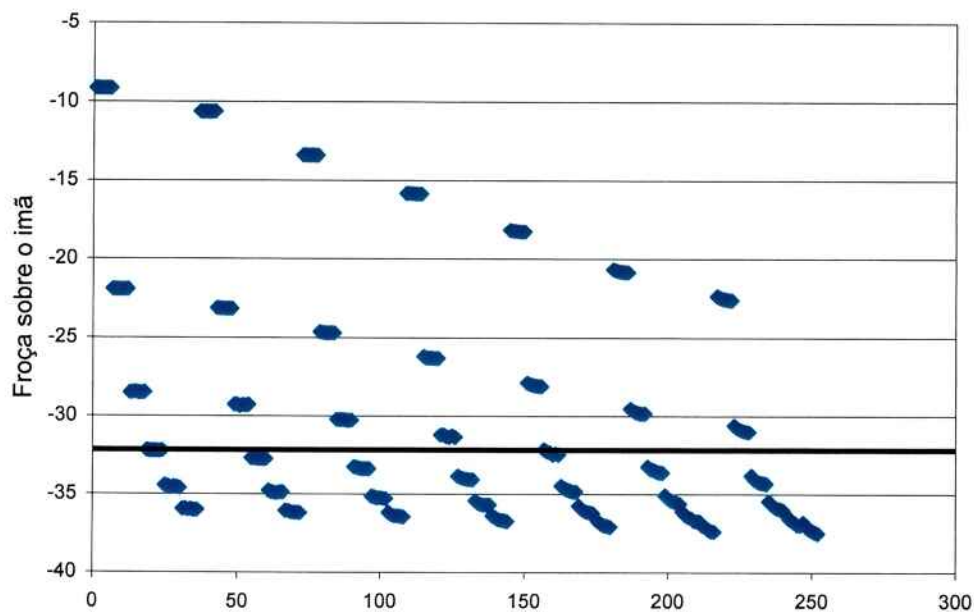


Gráfico-20 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para a geometria III.

A Tabela-9 apresenta um conjunto de 10 soluções diferentes encontradas pelo PSO e os valores de F_{ret} e F_{exp} calculados pela função de aproximação e pelo MEF utilizando o Flux.

Solução	Parâmetro			F_{ret} (N)		F_{exp} (N)	
	X	D_L	L_B	PSO	Flux	PSO	Flux
1	14	11,025	30	-38,005	-36,679	95,646	95,645
2	14	10,557	30	-37,971	-36,574	95,854	95,807
3	14	10,617	30	-37,98	-36,614	95,915	95,755
4	14	10,647	30	-37,984	-36,591	95,895	95,814
5	14	10,572	30	-37,973	-36,579	95,945	95,797
6	14	10,892	30	-38,008	-36,696	95,733	95,716
7	14	10,641	30	-37,984	-36,590	95,899	95,823
8	14	10,667	30	-37,987	-36,596	95,882	95,810
9	14	10,634	30	-37,982	-36,588	95,904	95,828
10	14	10,650	30	-37,984	-36,592	95,882	95,815

Tabela-9. Soluções encontradas pelo método de otimização.



Todas as soluções apresentadas cumprem o requisito de $|F_{ret}| > 32N$ portanto para a escolha da solução final deve ser baseada em outros fatores. Em funcionamento o atuador deverá movimentar uma carga na comutação assim o impulso inicial, provocado por F_{exp} , deverá manter o movimento do conjunto eixo+carga mesmo após o fim do impulso de corrente. Portanto a solução ideal deve possuir o maior valor de F_{exp} , da tabela temos a solução 5 como a melhor solução para o problema. A diferença entre os resultados obtidos pelo PSO em relação ao Flux ocorre porque o PSO utiliza funções de aproximadas para o cálculo de F_{ret} e F_{exp} , contudo mesmo assim a diferença não é significativa, abaixo de 2N de diferença.

Análise da solução final

A figura 13 apresenta a vista em corte do atuador com algumas dimensões do dispositivo. E na Tabela-10, os valores finais para os parâmetros da geometria.

e (mm)	H _B (mm)	L _B (mm)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	H _{Fe} (mm)	L _E (mm)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	H ₃ (mm)	D _L (mm)
2,0	34,00	30,00	10,00	34,00	37,03	122,00	59,55	83,55	24,0	10,57

Tabela-10. Valores finais dos parâmetros.

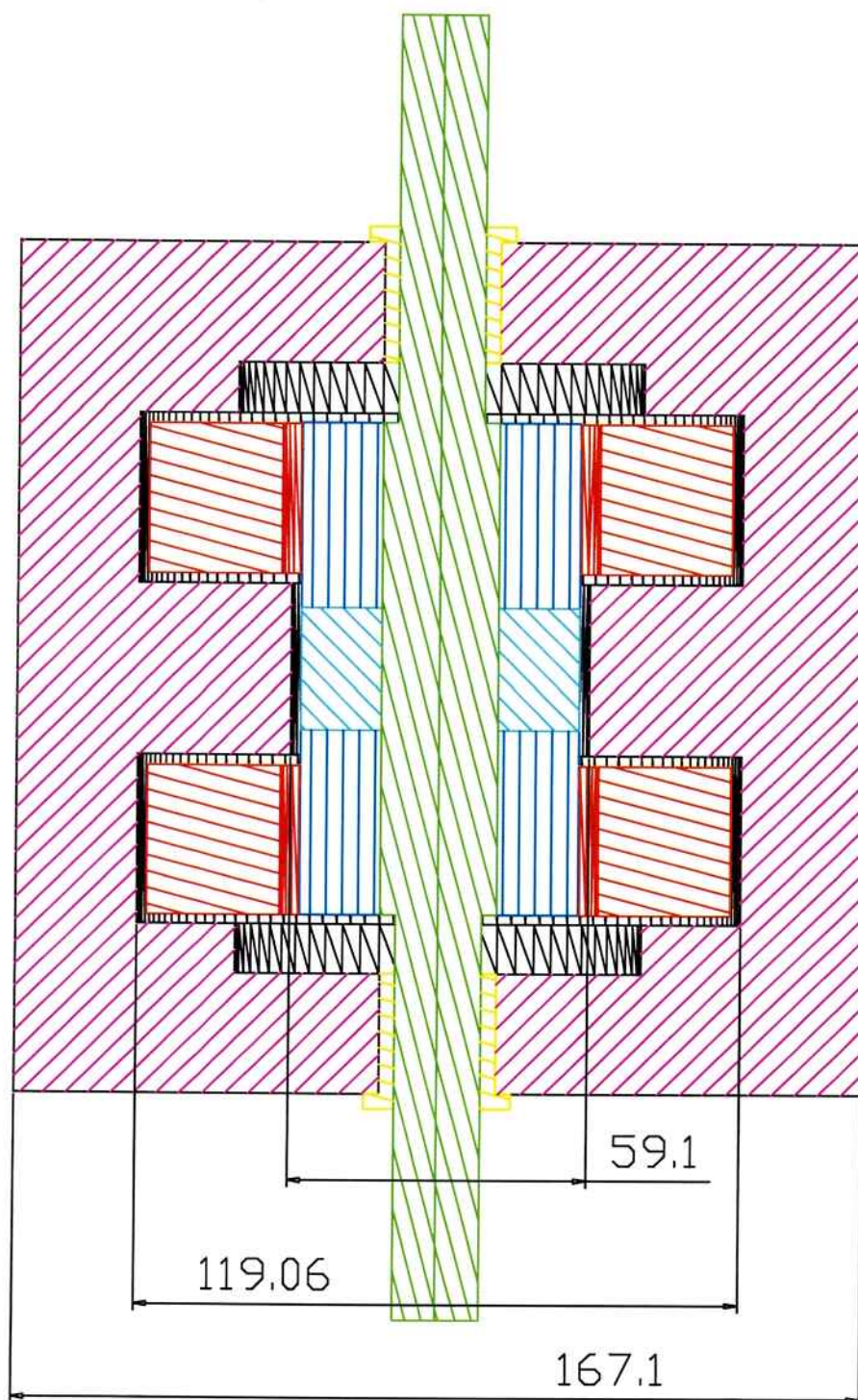


Fig.13 – Vista em corte do atuador com as dimensões finais.

Embora esta seja a solução ótima apresentada pela metodologia de otimização é necessário uma análise mais profunda. A justificativa desta re-análise do projeto reside no fato do atuador ter assumido dimensões que resultarão em uma massa elevada para o conjunto, devido a grande quantidade de ferro, aproximadamente 22 kg apenas considerando a armadura, em magenta na Fig.13.



Nesta análise o valor máximo da corrente será revisto, considerando o modelo térmico da bobina, e o nível da saturação magnética, a partir da intensidade do campo magnético, das partes metálicas para determinar se houve um superdimensionamento do dispositivo.

A máxima corrente admissível na bobina é determinada pela máxima temperatura admissível na bobina. O limite de temperatura é determinado em fator da isolamento e o aquecimento da bobina ocorre por efeito Joule (11). A equação (12) representa a 1ª lei da termodinâmica, ou seja, calor adicionado ou retirado do sistema provoca variação na temperatura do mesmo.

$$Q_B = r \cdot i^2 \cdot t \quad (11)$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (12)$$

A região da bobina, considerando os tempos envolvidos, pode ser considerada um meio adiabático, assim todo calor produzido eleva a temperatura da bobina sem perdas para outros ambientes. Considerado (13) e (14), lembrando que $J = I/S$ e igualando (11) e (12) chegamos a expressão de J em função da densidade, calor específico e resistividade elétrica do cobre (15).

$$r = \rho \cdot \frac{l \cdot N}{A} \quad (13)$$

$$m = l \cdot S \cdot \gamma \cdot N \quad (14)$$

$$J = \sqrt{\frac{\gamma \cdot c \cdot \Delta T}{\rho \cdot t}} \quad (15)$$

Sendo:

- $c \rightarrow$ calor específico do cobre. $c = 399 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.
- $\gamma \rightarrow$ densidade do cobre. $\gamma = 8900 \text{ kg/m}^3$
- $\Delta T \rightarrow$ máxima variação de temperatura admissível na bobina.
 $\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\rho \rightarrow$ resistividade do cobre. $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$.
- $t \rightarrow$ tempo máximo de duração do pulso de corrente. $t = 50 \text{ s}$.

Resolvendo (10), $J = 18,17 \text{ A/mm}^2$. Esse valor é seis vezes maior que o valor adotado anteriormente, conclui-se então que a bobina está superdimensionada. Sendo assim L_B assume um novo intervalo de variação: [10,15] mm sendo que o anterior era igual a [20,30] mm.

Um material magnético saturado deixa de possuir uma elevada permeabilidade magnética (μ) oferecendo uma maior resistência a passagem de fluxo magnético pela região. A saturação do material magnético, ferro, utilizado



ocorre quando o campo magnético ultrapassa 1,4T. Como o novo valor de J bem maior que o considerado anteriormente se faz necessário avaliar a distribuição do campo magnético na armadura do atuador.

Utilizando o MEF para calcular a intensidade da indução magnética na armadura, veja Fig. 14, com as dimensões da Tabela-10 considerando J igual ao novo valor calculado pode-se observar que a intensidade do campo magnético não excede 0,8T na região indicada. O campo magnético possui valores elevados apenas em quinas do dispositivo, esperado devido ao adensamento do fluxo magnético que ocorre nestas regiões. Logo é possível reduzir o valor de alguns parâmetros para tornar o conjunto menor e mais leve.

Com esse objetivo um novo cálculo no MEF foi realizado, desta vez considerando $L_f = 8 \text{ mm}$ e para os demais parâmetros os dados na Tabela-11. Desta simulação resulta a Fig.15, que apresenta a distribuição do campo magnético na armadura.

e (mm)	H_B (mm)	L_B (mm)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	H_{Fe} (mm)	L_E (mm)	R_1 (mm)	R_2 (mm)	H_3 (mm)	D_L (mm)
2,0	34	15,00	10	18,00	29,03	106,00	44,55	52,55	8	5

Tabela-11. Tabela parâmetro utilizados na análise.

Os resultados obtidos para a distribuição do campo magnético no atuador redimensionado provam que é possível reduzir o tamanho do dispositivo sem causar violação das restrições em F_{ret} e F_{exp} como pode ser observado nos gráficos 21 e 22 que mostram os todos os valores de F_{ret} e F_{exp} , respectivamente, que serão utilizados para determinar o novo modelo de substituição.

Os valores considerados para o problema daqui para frente são os apresentados na Tabela-11 com exceção de H_B (5), H_1 (4), L_B e D_L que são variáveis do problema. Um novo processo de otimização foi realizado necessitando do cálculo de novas funções de aproximação, conforme explicado anteriormente. A Tabela-12 apresenta a lista de valores para as variáveis usados para construir as funções de aproximação. O número de cálculos por elementos finitos resulta igual a $5 \cdot 5 \cdot 4 = 100$ para cada força considerada. Cada cálculo não linear dura, aproximadamente 1,5 minutos, o tempo total gasto no cálculo das força pelo método dos elementos finitos implica em 300 minutos ou 5 horas.

Parâmetro	Lista de Valores				
	1	2	3	4	5
X	14	16	18	20	22
D_L	0	1,56	3	4,5	6
L_B	10	12	14	15	--

Tabela-12. Lista de valores utilizados na construção do modelo de substituição.



FINAL

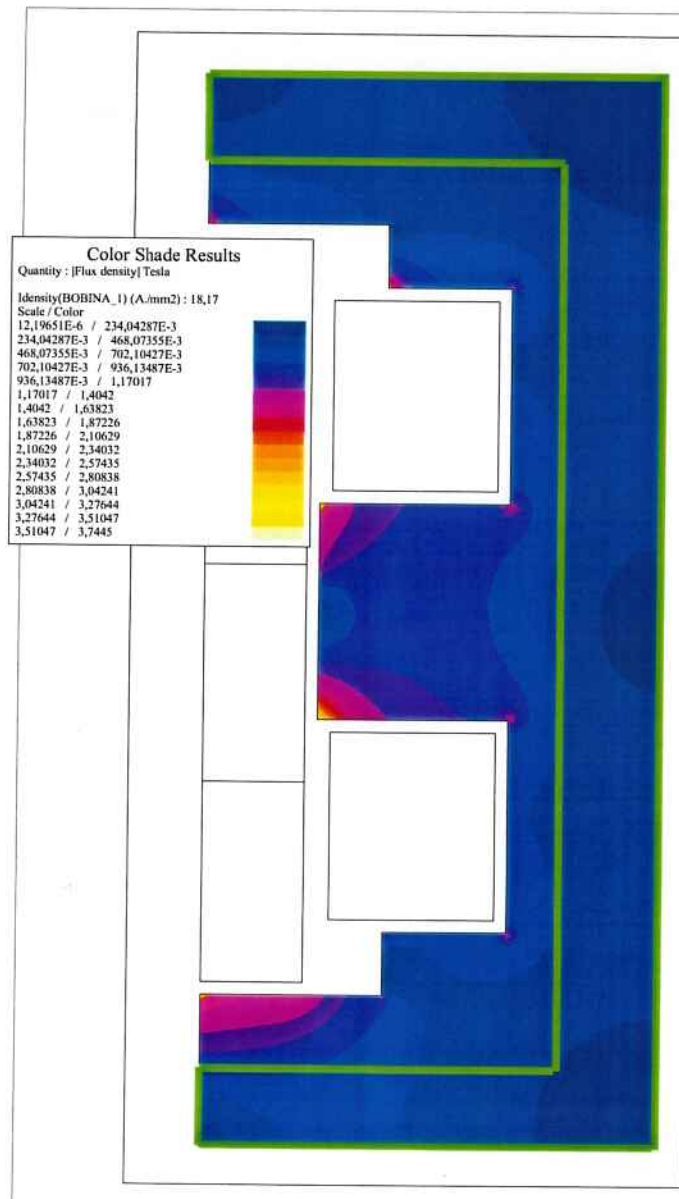


Fig.14 – Distribuição do campo magnético na armadura do atuador.



TESTE

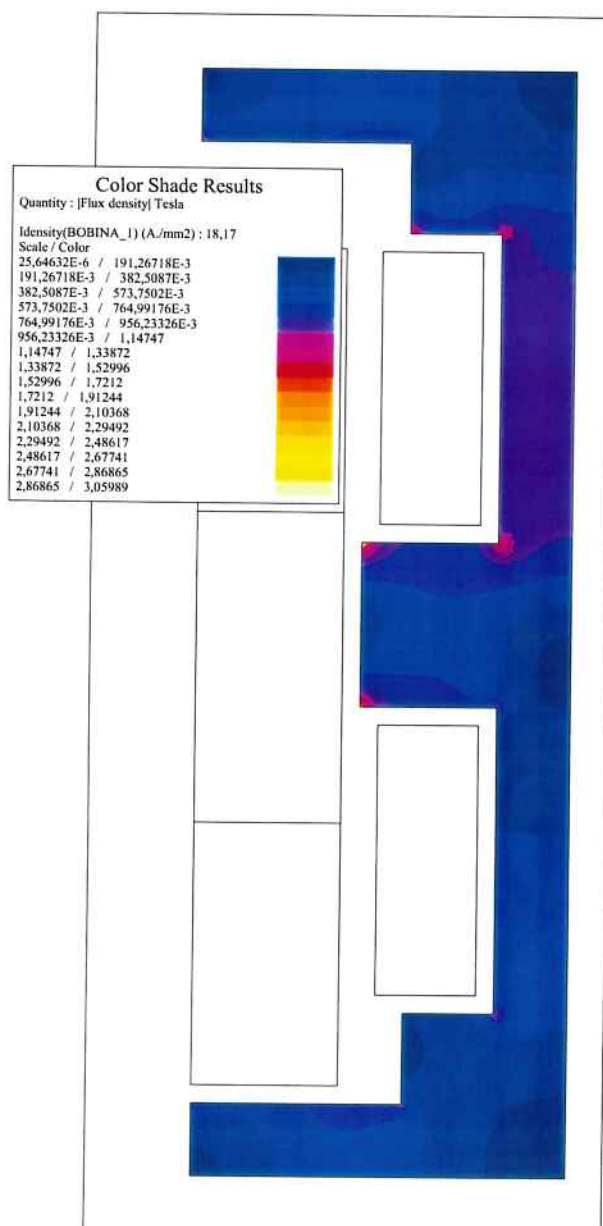


Fig.15 – Distribuição do campo magnético na armadura do atuador redimensionado.

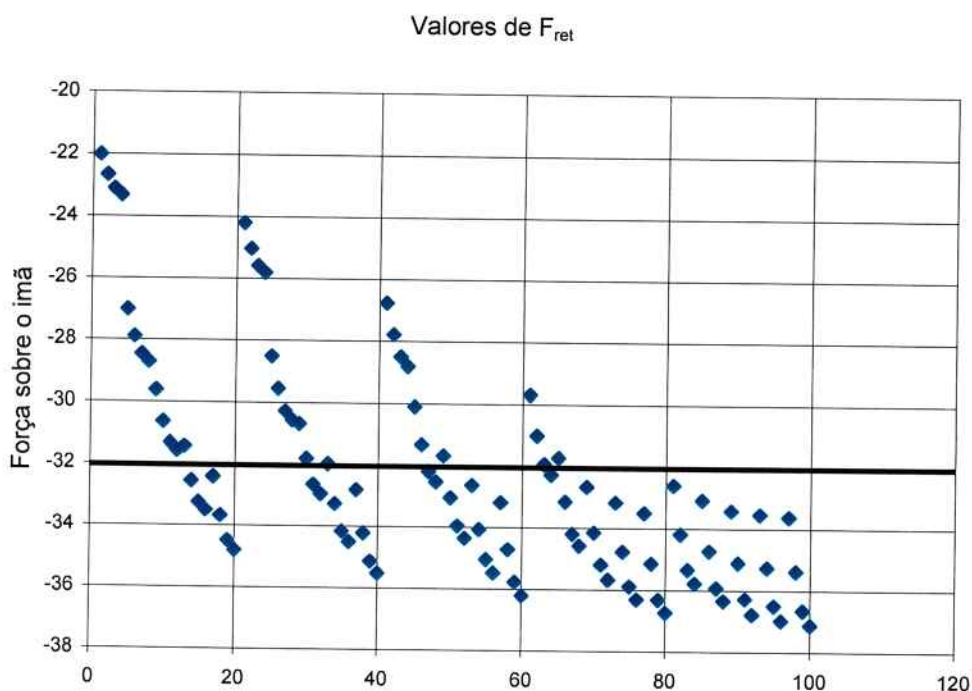


Gráfico-21 – Valores de F_{ret} obtidos pelo MEF para o redimensionamento.

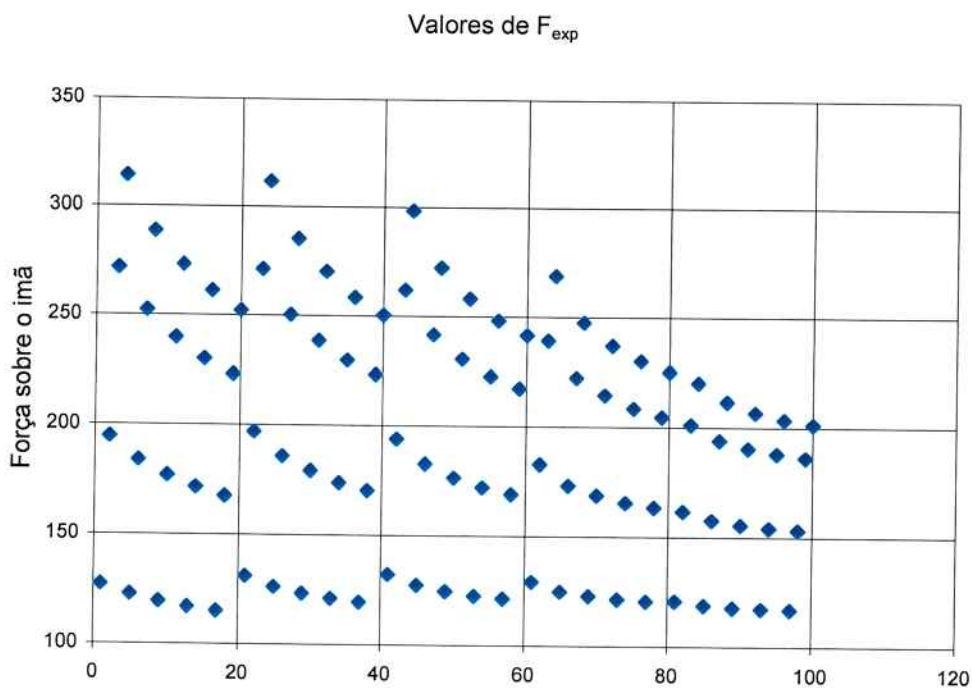


Gráfico-22 – Valores de F_{exp} obtidos pelo MEF para o redimensionamento.

Os resultado da otimização levando em conta estas modificações pode ser observado na Tabela-13 que apresenta os 10 melhores resultados que o PSO calculou. Ainda nesta tabela, também se encontra o valor de F_{ret} e F_{exp} obtidos com o MEF. As soluções são muito próximas uma das outras e existem 3 soluções para



as quais $|F_{ret}| > 35,7N$, soluções 8; 9 e 10, destas a que apresenta o maior valor de F_{exp} é a solução 8. Baseado nestes argumentos a solução 8 é a melhor solução para o problema analisado.

Solução	Parâmetro			F_{ret} (N)		F_{exp} (N)	
	X	D_L	L_B	PSO	Flux	PSO	Flux
1	16,352	6	15	-35,646	-35,614	249,781	249,535
2	16,456	6	15	-35,689	-35,680	249,411	248,240
3	16,461	6	15	-35,691	-35,703	249,393	248,156
4	16,471	6	15	-35,694	-35,704	249,359	248,218
5	16,476	6	15	-35,697	-35,706	249,34	248,208
6	16,477	6	15	-35,697	-35,703	249,339	248,234
7	16,479	6	15	-35,698	-35,718	249,331	248,193
8	16,543	6	15	-35,722	-35,741	249,107	247,962
9	16,548	6	15	-35,723	-35,766	249,089	247,695
10	17,262	5,7	15	-35,873	-35,828	247,083	247,034

Tabela-13. Soluções encontradas pelo método de otimização.

Os valores finais para os parâmetros da geometria que serão utilizados na construção do dispositivo estão na Tabela-14, convém ressaltar que a massa da armadura reduziu para aproximadamente 4 kg. Uma redução de 81,82% na massa da armadura quando comparado com a configuração anterior.

e (mm)	H_B (mm)	L_B (mm)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	H_{Fe} (mm)	L_E (mm)	R_1 (mm)	R_2^* (mm)	H_3 (mm)	D_L (mm)
2,0	36,54	15,00	7,46	18,00	29,03	106,00	44,55	52,55	8	6

Tabela-14. Tabela parâmetro utilizados na construção do atuador.

* R_2 para esta geometria também é dado pela equação (3), com $L_I=8$ mm.

Novamente a diferença entre o resultado do PSO e do Flux não é significativa indicando que a interpolação foi bem sucedida. Considerando uma população de 30 partículas, 100 iterações, 10 chamadas do PSO e tempo de cálculo de cada força 1,5 minutos o tempo total gasto na otimização, utilizando o MEF no cálculo das forças, seria igual a 45.000 minutos ou 750 horas ou 31,25 dias.



5. Testes Experimentais

As dimensões foram passadas para a empresa Equacional que construiu as partes metálicas e bobinas. As bobinas finais apresentam 357 espiras de fio AWG19. Uma imagem, com perspectiva explodida, do atuador construído pode ser vista em Fig.15, e na Fig.16 o atuador montado.

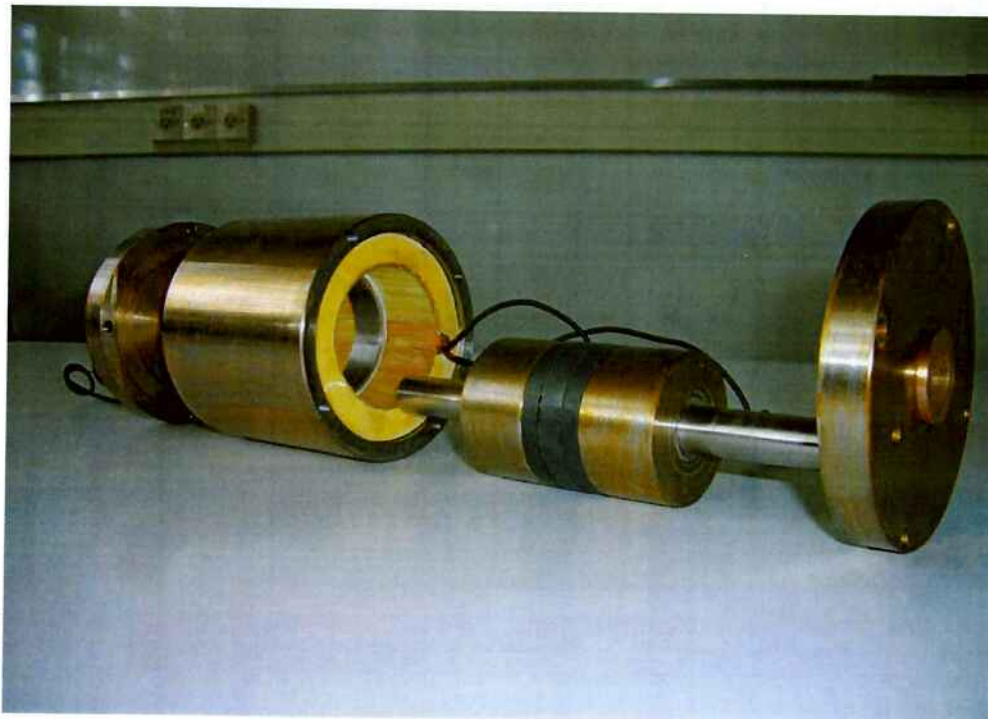


Fig.15 – Imagem do atuador desmontado.



Fig.16 – Imagem do atuador montado.



5.1. Teste de Polaridade da Bobina

Para o correto funcionamento do atuador é necessário determinar qual terminal da bobina deve ser ligado no terminal positivo da fonte provocando a expulsão do eixo, quando o mesmo está estável no lado da bobina alimentada.

A Fig.17 ilustra a montagem utilizada para realização do teste. A corrente na bobina foi aumentada gradativamente até aproximadamente 2 A, como a expulsão não ocorreu, verificou-se a dificuldade de provocar a mudança da posição manualmente, para a direção indicada pela seta no esquema. Quando a ligação esta invertida é necessária a aplicação de uma força maior, comparada à força necessária para mover o eixo quando não há corrente na bobina. Foi verificado que houve maior facilidade para provocar a mudança de estado. Para confirmar a polaridade a montagem foi refeita e o valor da corrente aumentado gradativamente até aproximadamente 3 A, quando ocorreu a comutação. O mesmo teste foi aplicado para a outra bobina, sendo os terminais de cada bobina identificados como positivo, marcado, e negativo, sem marca.

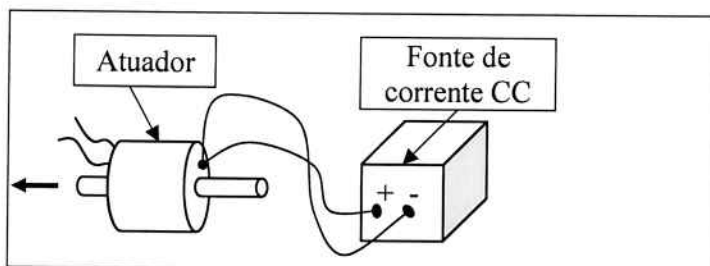


Fig.17 – Montagem para teste de polaridade.

5.2. Teste de Força

A montagem experimental utilizada, Fig.18, permite medir a força atuante sobre o eixo para diversas posições no curso de movimento do eixo. A força é dada pela expressão (16), onde:

- $M \rightarrow$ Massa indicada na balança em g;
- $g \rightarrow$ Gravidade $g = 9,8 \text{ m/s}^2$;
- $P \rightarrow$ Peso próprio do eixo de massa 1588 g. $P = 15,573\text{N}$.

$$F = M \cdot g - P \quad (16)$$

Descrição do experimento

O atuador foi posicionado verticalmente, Fig.18, sobre uma placa de PVC com um furo permitindo a passagem do eixo que possui um parafuso sem cabeça fixado em sua ponta. Esse parafuso permite que uma porca seja inserida pela outra extremidade, a extremidade livre do parafuso é inserida dentro do tubo de cobre que fica apoiado sobre a balança, este esquema de montagem pode ser observado na Fig 19. Os terminais negativos das bobinas foram ligados entre si, e os terminais positivos ligados aos terminais da fonte.

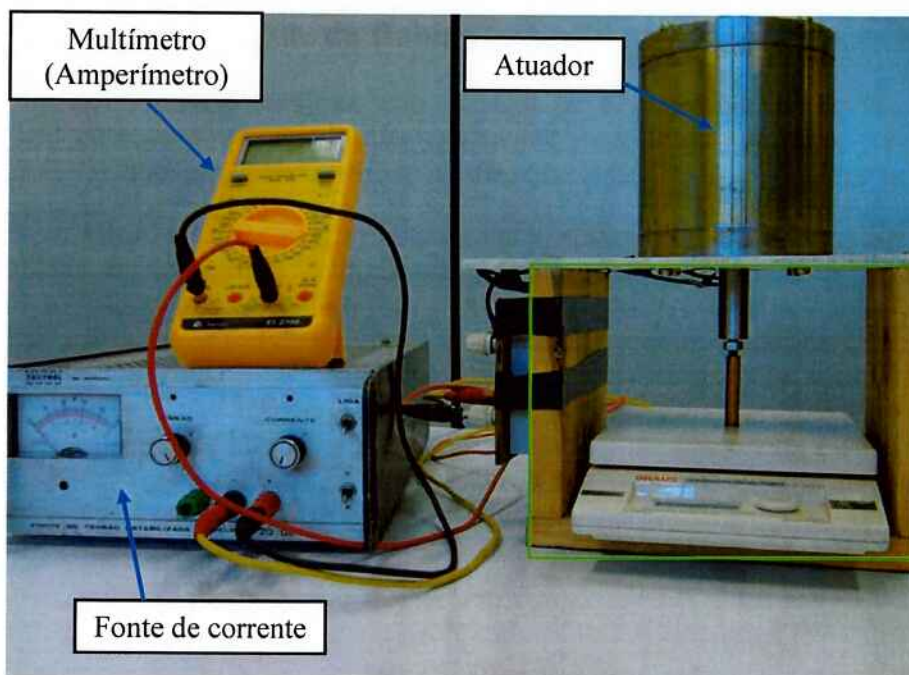


Fig. 18 – Arranjo experimental utilizado.

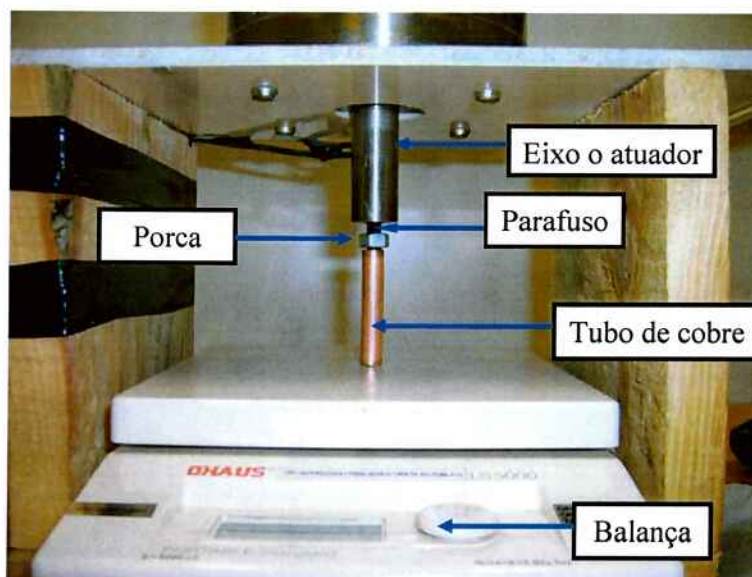


Fig.19 – Detalhe da região em destaque na Fig. 18.

Ao girar a porca no sentido de afastá-la do eixo do atuador, ela pressiona o tubo de cobre forçando o movimento do eixo para cima variando sua posição, a posição 'p' do eixo é obtida com a medição da distância indicada na Fig. 20. A força exercida no tubo é proporcional à massa indicada pela balança, essa força é a mesma que atua no eixo do atuador.

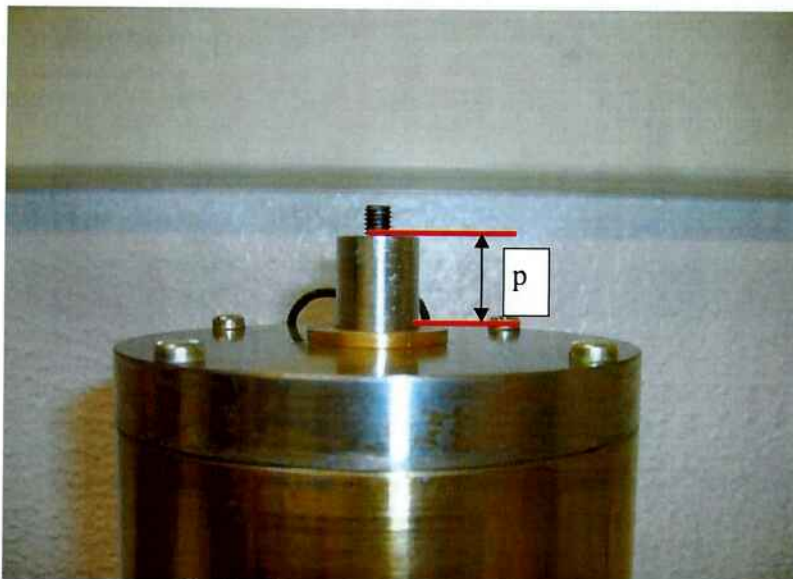


Fig.20 – Como medir a posição do eixo.

Convém ressaltar que o eixo só começa a se movimentar após ser superado um valor inicial de força, que é proporcional a corrente aplicada. E é igual a F_{ret} $I = 0 \text{ A}$. Inicialmente, com o giro da porca, a massa indicada pela balança sobe até atingir um valor máximo, após atingir este valor qualquer giro na porca provoca a redução na massa indicada pela balança. O valor máximo atingido pela massa representa a força necessária para iniciar o movimento do eixo, ou seja, a força de atração entre o eixo e a armadura.

Para $I = 0 \text{ A}$ foi possível obter os valores da força até faltar aproximadamente 2 mm para a excursão máxima permitida, pois após este valor uma perturbação mínima provoca a ida do eixo para a posição estável superior. Como o atuador é simétrico, a força de atração entre armadura e eixo na posição superior é igual a da posição inferior.

Na medida da força com corrente aplicada na bobina a simetria do atuador foi novamente utilizada. Com o eixo na posição estável inferior, a corrente é injetada forçando a expulsão, intervalo de variação de $I \in]0; 2]$, caso o mesmo estivesse na parte superior, a equação (17) fornece o real valor da posição 'p'.

$$p = p_{\text{máx}} - p_{\text{medido}} + p_{\text{min}} \quad (17)$$

Essa metodologia foi adotada para permitir que todo o curso do movimento estivesse representado nas medidas. Se a corrente for injetada no sentido oposto, após um dado valor de 'p' a força de atração supera o peso próprio do eixo atraindo-o para a posição estável superior. O valor de 'p' para o qual este fenômeno ocorre reduz com o aumento da corrente.

5.2.1. Comparação dos Resultados Obtidos

A Tabela 15 apresenta os valores de corrente utilizados no experimento, e qual gráfico apresenta os pontos medidos no experimento e os simulados com o auxílio do MEF no Flux. A comparação entre os



resultados simulados e verificados experimentalmente permite verificar se os objetivos foram atingidos. Os gráficos de 24 a 31 estão no Anexo D.

Valores de I (A)	Gráfico
0	23
0,25	24
0,5	25
0,75	26
1,0	27
1,25	28
1,5	29
1,75	30
2,0	31

Tabela-15. Valores utilizados para I.

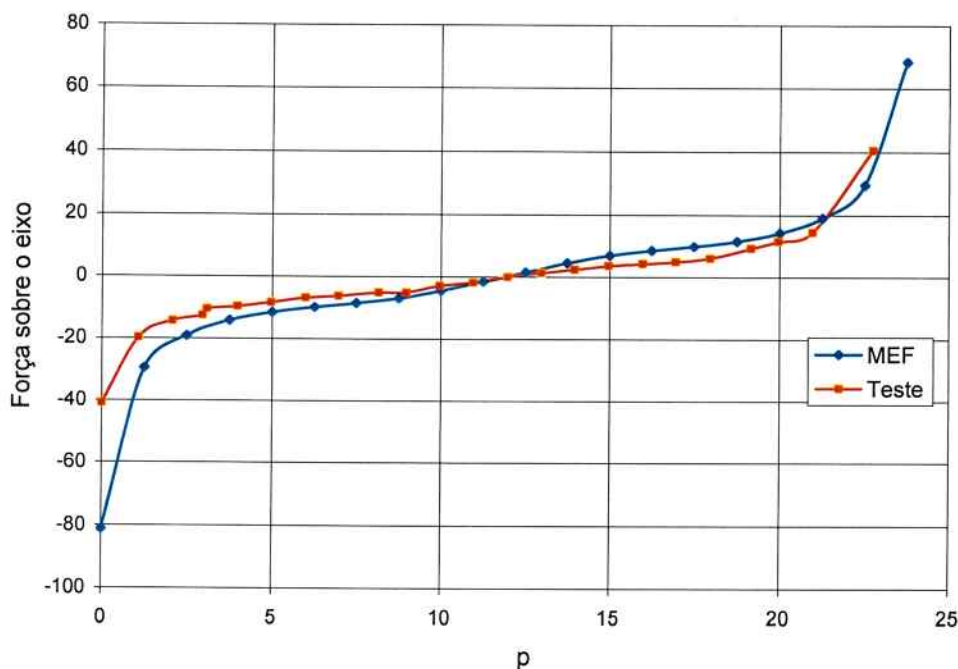


Gráfico-23 – Força sobre o eixo com $I = 0$ A.

É possível observar no gráfico-20 que tanto a curva simulada quanto as experimental apresentam o mesmo comportamento para a variação de 'p'.

A diferença entre as curvas provavelmente está relacionada com o campo remanente, B_r , adotado para o ímã nas simulações ser diferente para o apresentado realmente pelo ímã. Medir o campo remanente de um ímã é um processo complicado, por isso utilizando as simulações no Flux para levantar a curva de F_{ret} vs. B_r , gráfico-32, é possível estimar o valor real de B_r , neste caso $B_r = 0,23$ T. O gráfico-33 apresenta a curva força por posição do eixo considerando $B_r = 0,23$ T, as principais diferenças são



devidas a imprecisões na medida e ao atrito entre as partes que não foi considerado nas simulações.

Para reduzir o atrito foi aplicado óleo lubrificante antes de serem efetuadas as medições. Alguns gráficos estão com pontos a menos, principalmente para o máximo valor de 'p', devido ao limite de massa que a balança consegue indicar.

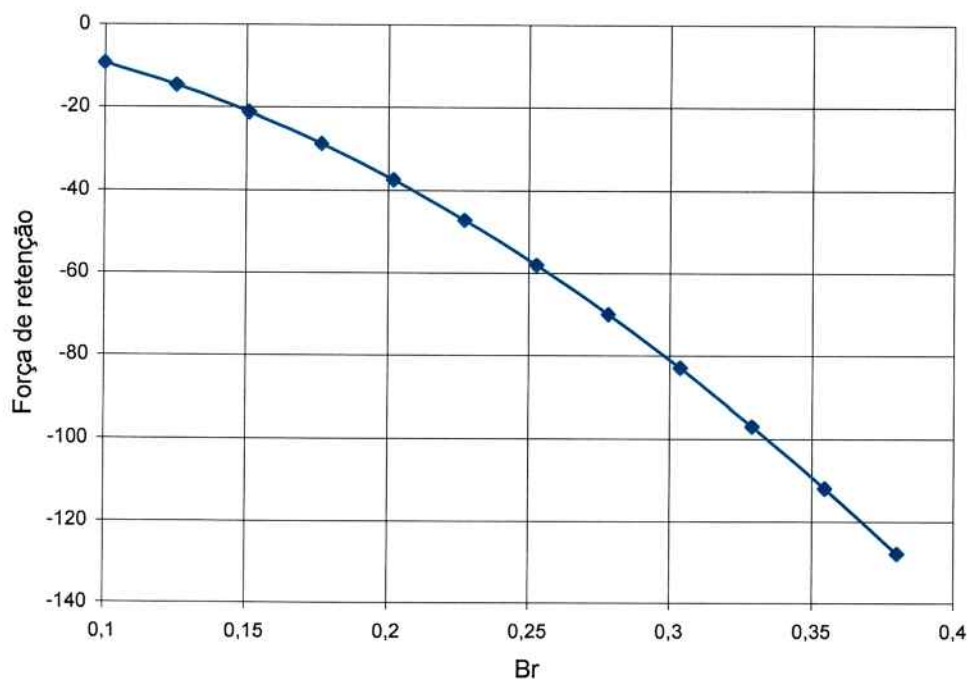


Gráfico-32 – Influência de B_r na força de retenção.

A Tabela-16 apresenta o valor da força de expulsão para valores de corrente entre 2 e 3 A obtidos experimentalmente e através de simulação utilizando o Flux.

Corrente (A)	Força de Retenção (N)	
	Simulado	Medido
2,25	-9,64	9,24
2,5	-3,04	13,67
2,75	3,27	17,18
3	9,29	23,08

Tabela-16. Força de Retenção para $I > 0,2$ A.

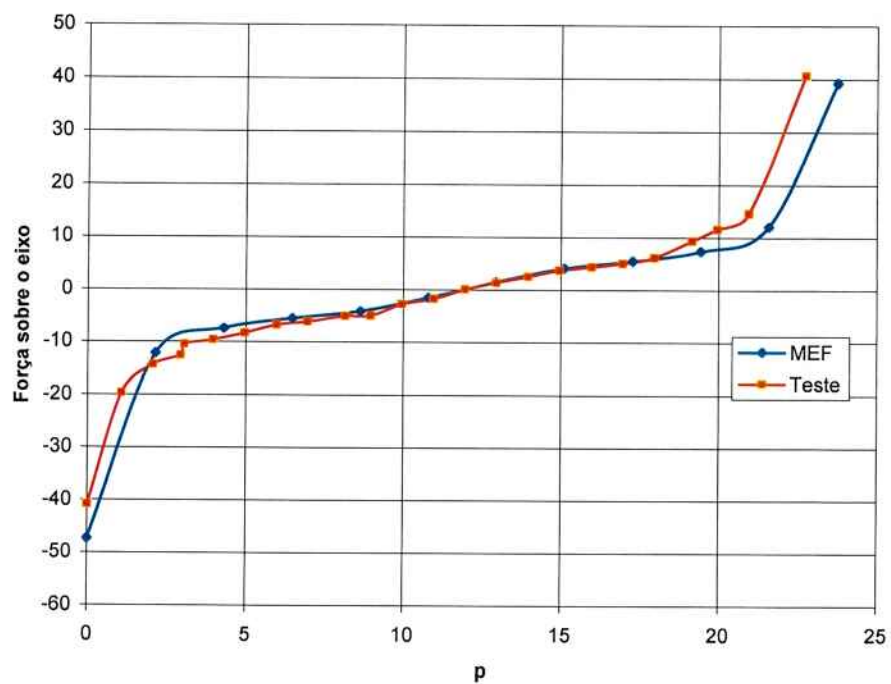


Gráfico-33 – Força sobre o eixo com $I = 0$ A com $B_r = 0,23$ T.



6. Conclusão

O desenvolvimento do atuador pode ser separado em duas fases distintas: Anteprojeto e Síntese. Na etapa de anteprojeto as atividades desenvolvidas estão relacionadas as considerações iniciais do projeto como: geometria adotada, restrições geométricas impostas por componentes já existentes, pré-dimensionamento e pré-avaliação do comportamento do dispositivo determinadas as condições iniciais das variáveis. No caso a determinação de três geometrias para análise determinadas a partir da geometria do imã. A pré-avaliação determinou que apenas duas geometrias deveriam ser consideradas para a etapa seguinte.

A síntese é a etapa de busca da melhor configuração atendendo as restrições de otimização. Uma das atividades desenvolvidas nesta etapa foi a análise de sensibilidade das funções F_{ret} e F_{exp} em relação aos principais parâmetros das geometrias, esse estudo permite determinar quais parâmetros podem ser considerados como variáveis para otimização. A atividade desenvolvida em seguida consiste em calcular o valor das funções de interesse para um conjunto de pontos pertencente ao espaço das soluções possíveis do problema. Esse espaço é formado pelas variáveis de otimização em seus intervalos de variação e pelas restrições do problema. Este conjunto de pontos é utilizado para criar funções de aproximação para facilitar o cálculo das funções em função das variáveis de otimização pelo método de otimização, no caso Particle Swarm Optimization. Finalizando esta etapa a otimização é realizada para encontrar a melhor solução para o problema, com a posterior avaliação mais detalhada da solução encontrada.

A avaliação detalhada da solução final encontrada permitiu rever alguns conceitos adotados inicialmente, pois mostrou a possibilidade de outra solução melhor e com maior economia de material. Então novamente se realizou a otimização do dispositivo resultando em uma nova solução. Com esta nova configuração o atuador se tornou mais leve e compacto.

Os resultados experimentais não coincidem, em valor, com os resultados teóricos, pois o campo remanente do imã suposto inicialmente não condiz com o valor real apresentado pelo imã. Isso ocorreu pois, o imã foi sofrendo desmagnetização ao longo do tempo. Contudo o aspecto das curvas de força por posição são condizentes permitindo concluir que o resultado final apresentado pelo dispositivo real coincide com o projetado.



7. Sugestões para trabalhos futuros

O projeto completo do atuador envolve não somente o atuador, mas também o projeto da fonte de alimentação de suas bobinas. Este item não pertenceu ao escopo deste trabalho.

Outro ponto interessante a ser analisado é considerar o ímã como variável do projeto, ou seja, suas dimensões podem ser alteradas deixando de serem restrições do problema. Desta forma as geometrias podem assumir formas diversas possibilitando soluções mais diversificadas.

Para a otimização pode-se escolher métodos otimizadores multi-objetivos, buscando ao mesmo tempo maximizar F_{ret} e F_{exp} . E utilizar mais de um método para comparar os resultados.



BIBLIOGRAFIA:

- [1] <http://www.br.abb.com/>
- [2] Brauer, J. R., *Magnetic Actuator Models Including Prediction of Nonlinear Eddy Currents and Coupling to Hydraulics and Mechanics*, IEEE
- [3] Aguillar, A. K., Bastos, J. P. A. and Sadowski, N. *Study of a Mono-Coil Bistable Linear Actuator*, MOMAG-2006
- [4] Brisset, S. and Brochet, P. *Analytical model for the optimal design of a brushless DC wheel motor*
- [5] Barbosa, L. Z. and Lebensztajn, L. *Derivative Free Optimization Algorithms in Electrical Machines Design* CEM-2006
- [6] Barbosa, L. Z. and Lebensztajn, L. *Alguns Métodos de Otimização no Projeto de um Motor de Corrente Contínua sem Escovas*, MOMAG-2006
- [7] Kennedy, J. and Eberhart, R. C. *Particle swarm optimization. Proceedings of IEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ. pp. 1942-1948, 1995
- [8] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [9] Cardoso, J. R. *Introdução ao Método dos Elementos Finitos Para Engenheiros Eletricistas*. 1ª Edição, Publicação independente.
- [10] <http://www.cedrat.com/>
- [11] L. Lebensztajn, C.A.R. Marretto, M.C. Costa, J.L. Coulomb, *Kriging: a useful tool for electromagnetic device optimization - IEEE Transactions on Magnetics*, V 40, n.2, March 2004.

Visto do orientador:

Luiz Lebensztajn



Anexo A

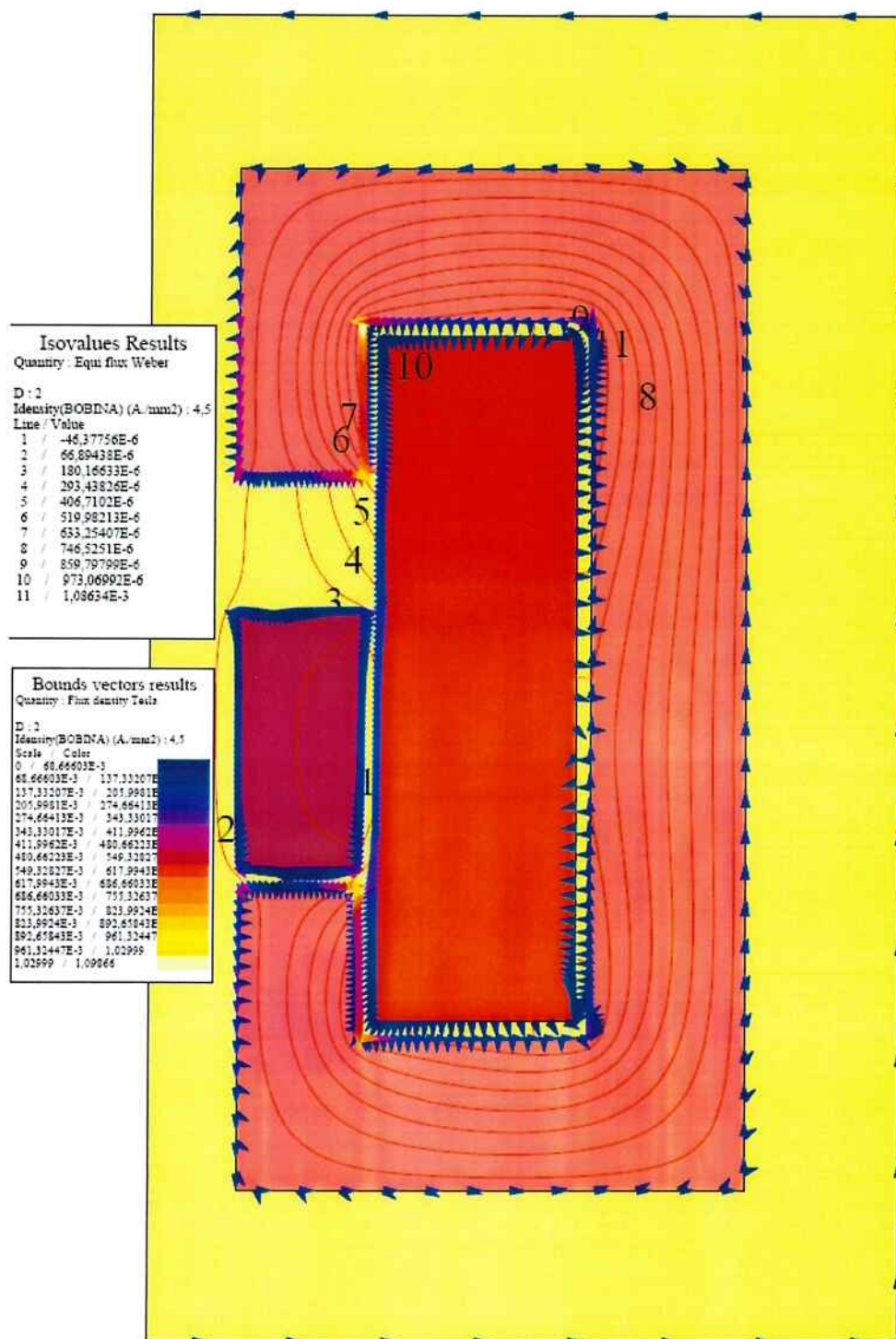


Fig.4 – Linhas de campo para $p = 2 \text{ mm}$ e $I = 4,5 \text{ A/mm}^2$.

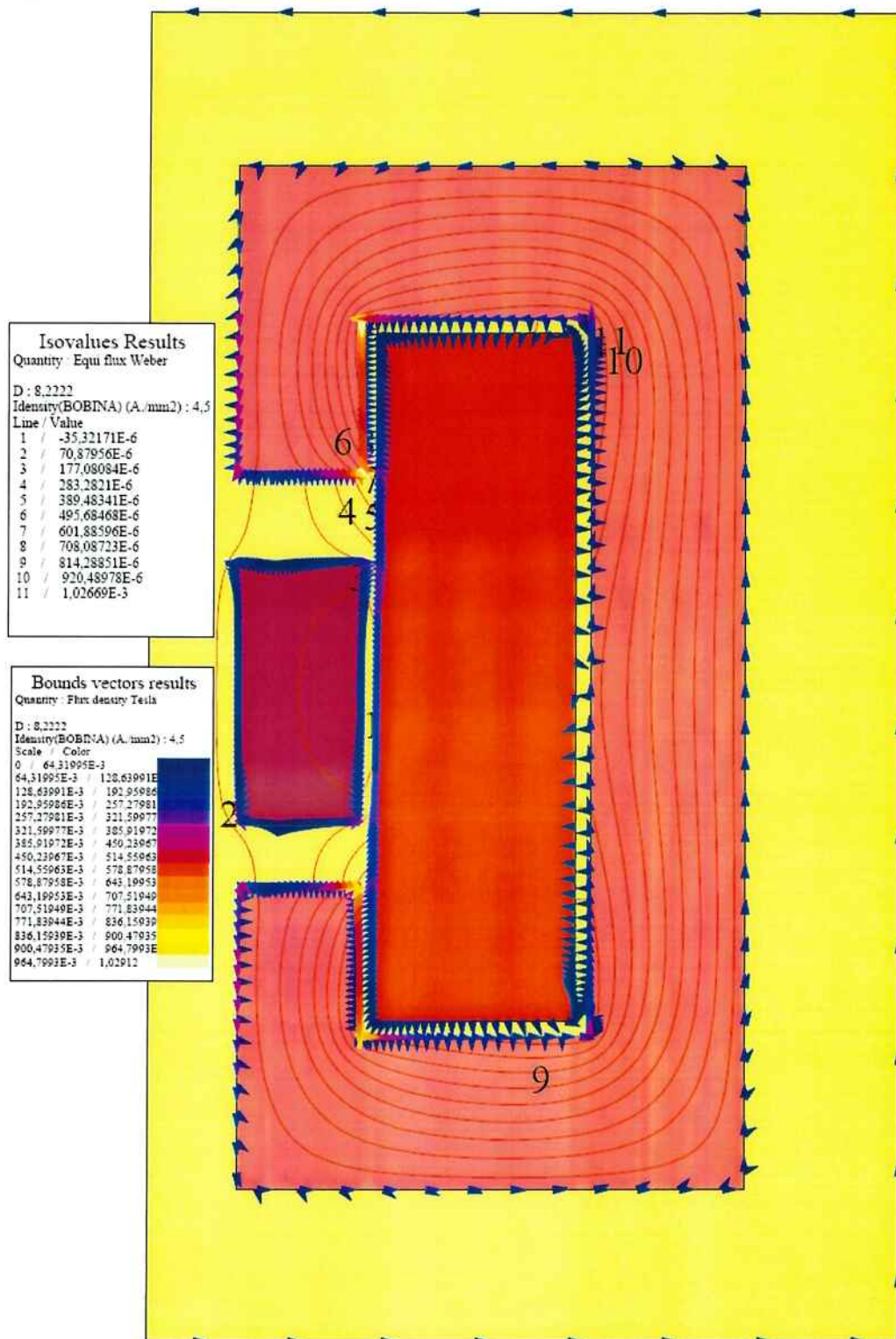


Fig.5 – Linhas de campo para $p = 8,22$ e $I = 4,5$ A/mm².

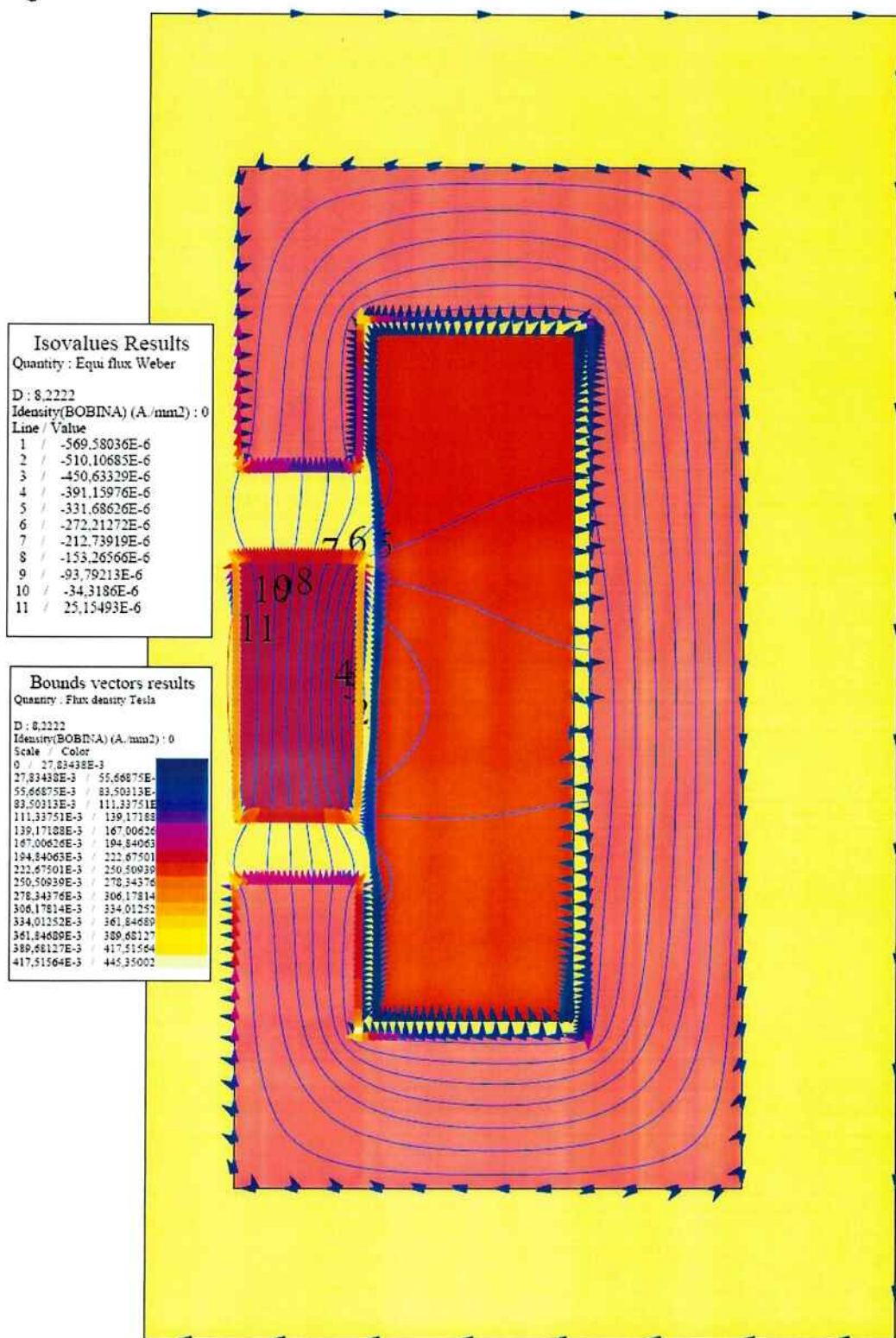


Fig.6- Linhas de Campo para $p = 8,22 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$.

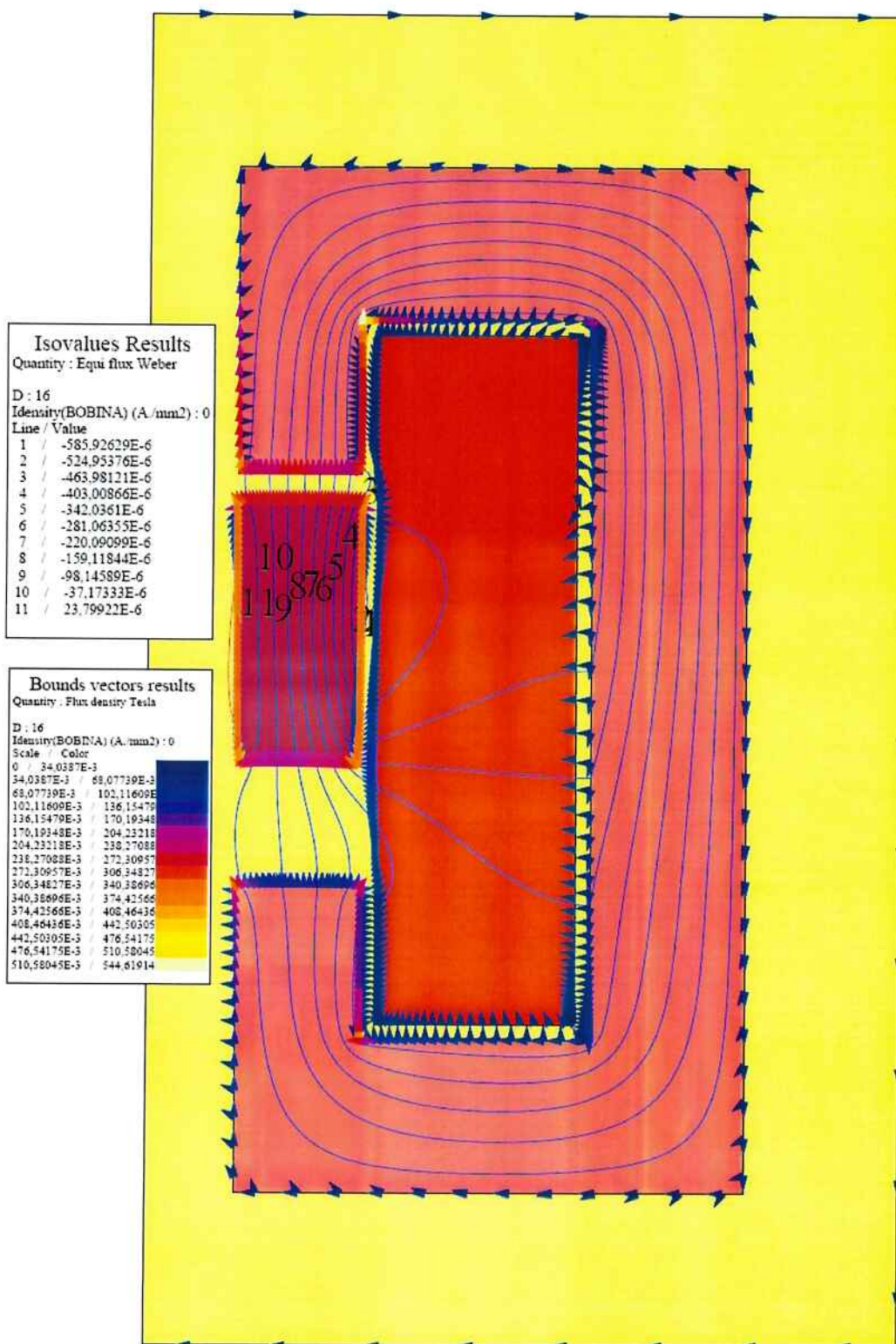


Fig.7 – Linhas de Campo para $p = 16 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$.

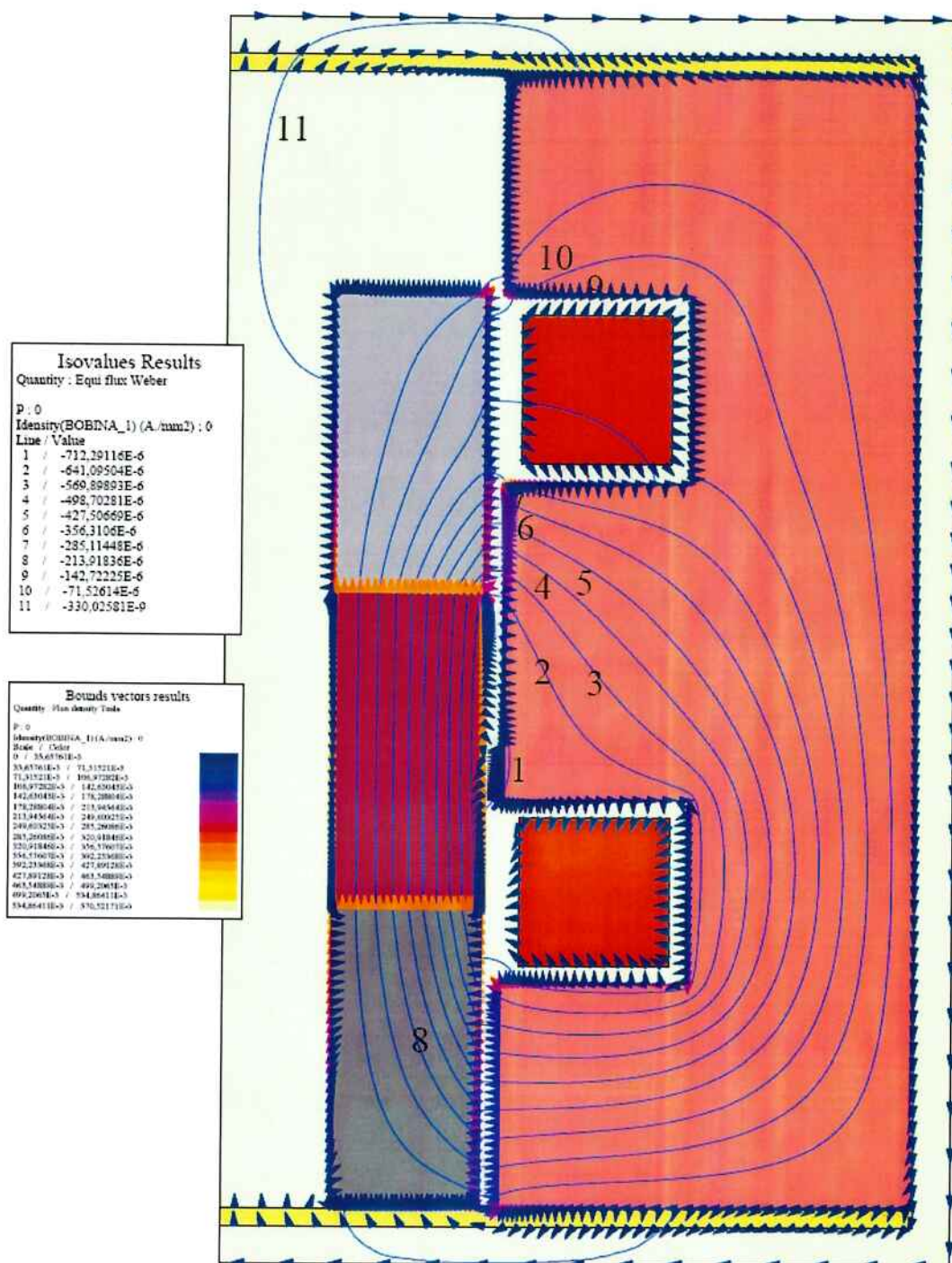


Fig.8- Linhas de Campo para $p = 0$ mm e $I = 0$ A/mm².

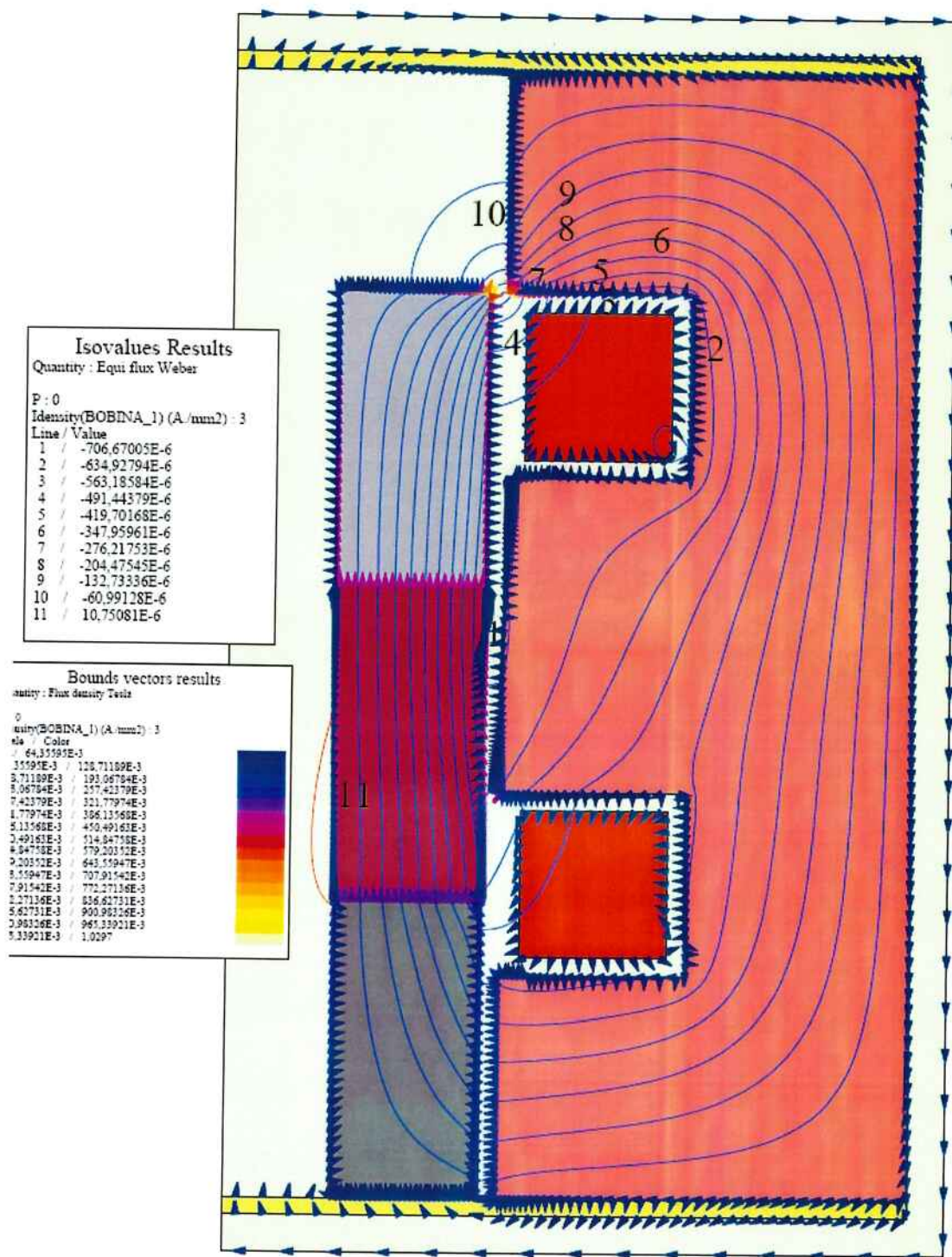


Fig.9 – Linhas de Campo para $p = 0$ mm e $I = 3,0$ A/mm².

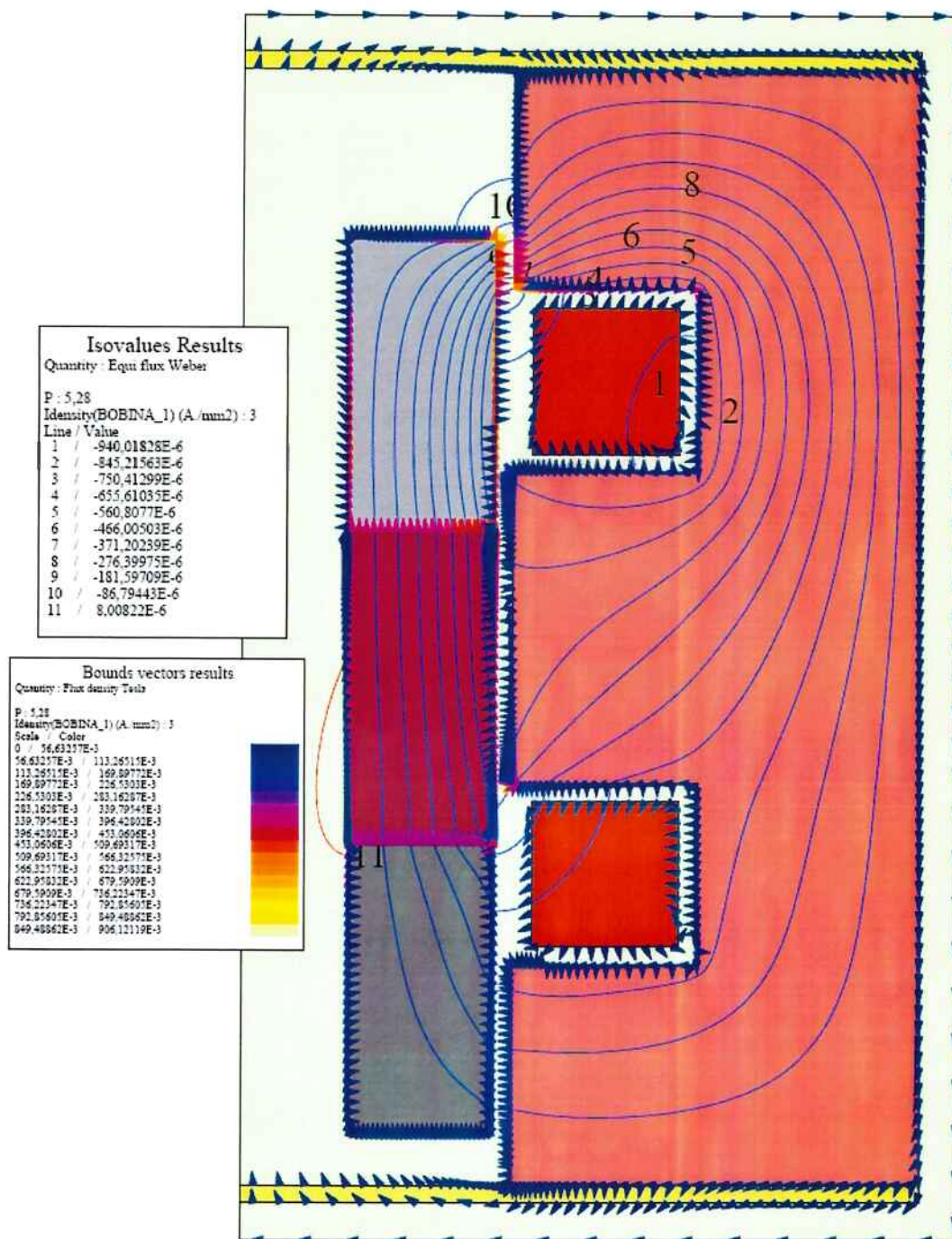


Fig. 10 – Linhas de Campo para $p = 5,28$ mm e $I = 3,0$ A/mm².

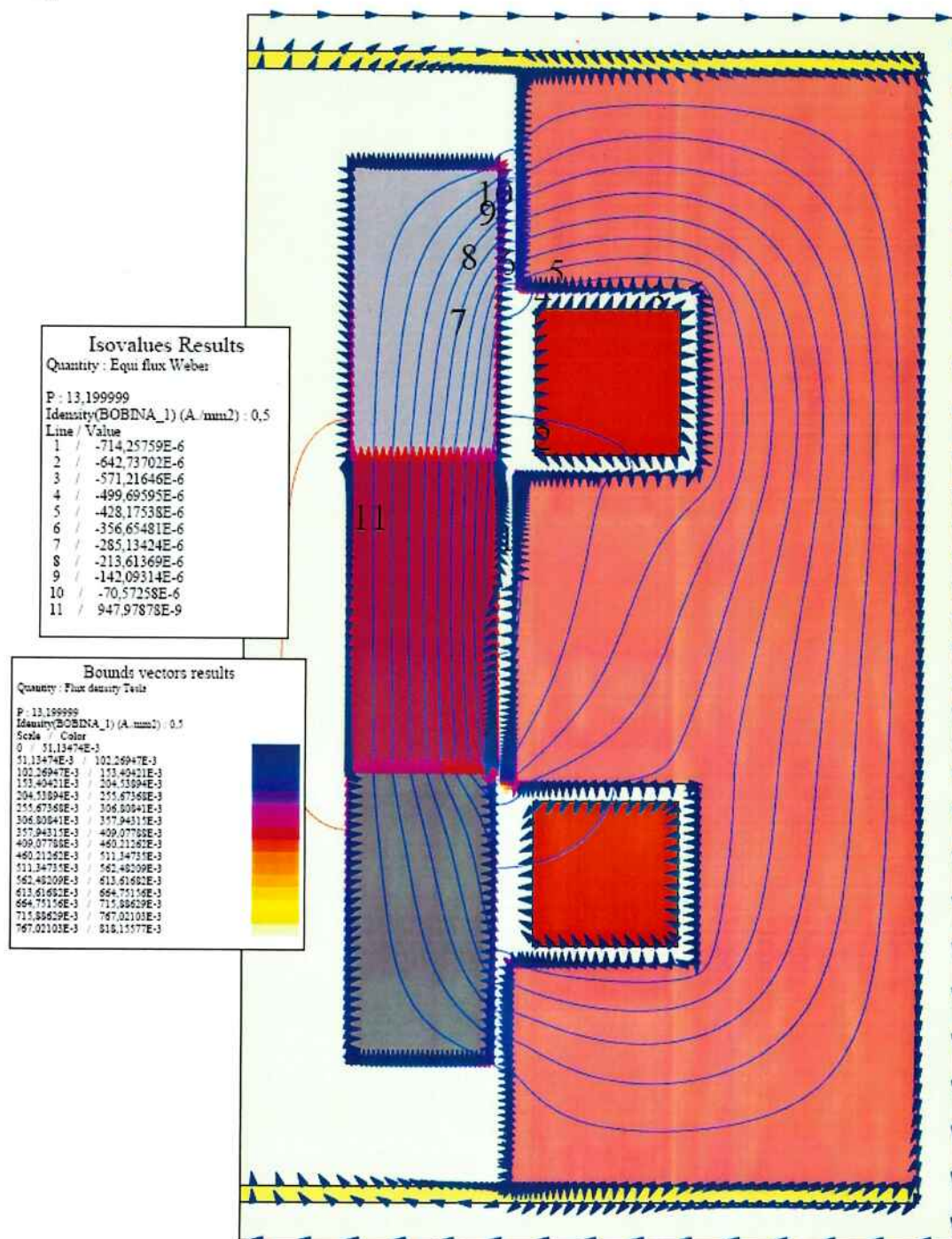


Fig. 11 – Linhas de Campo para $p = 13,20$ mm e $I = 0,5$ A/mm².

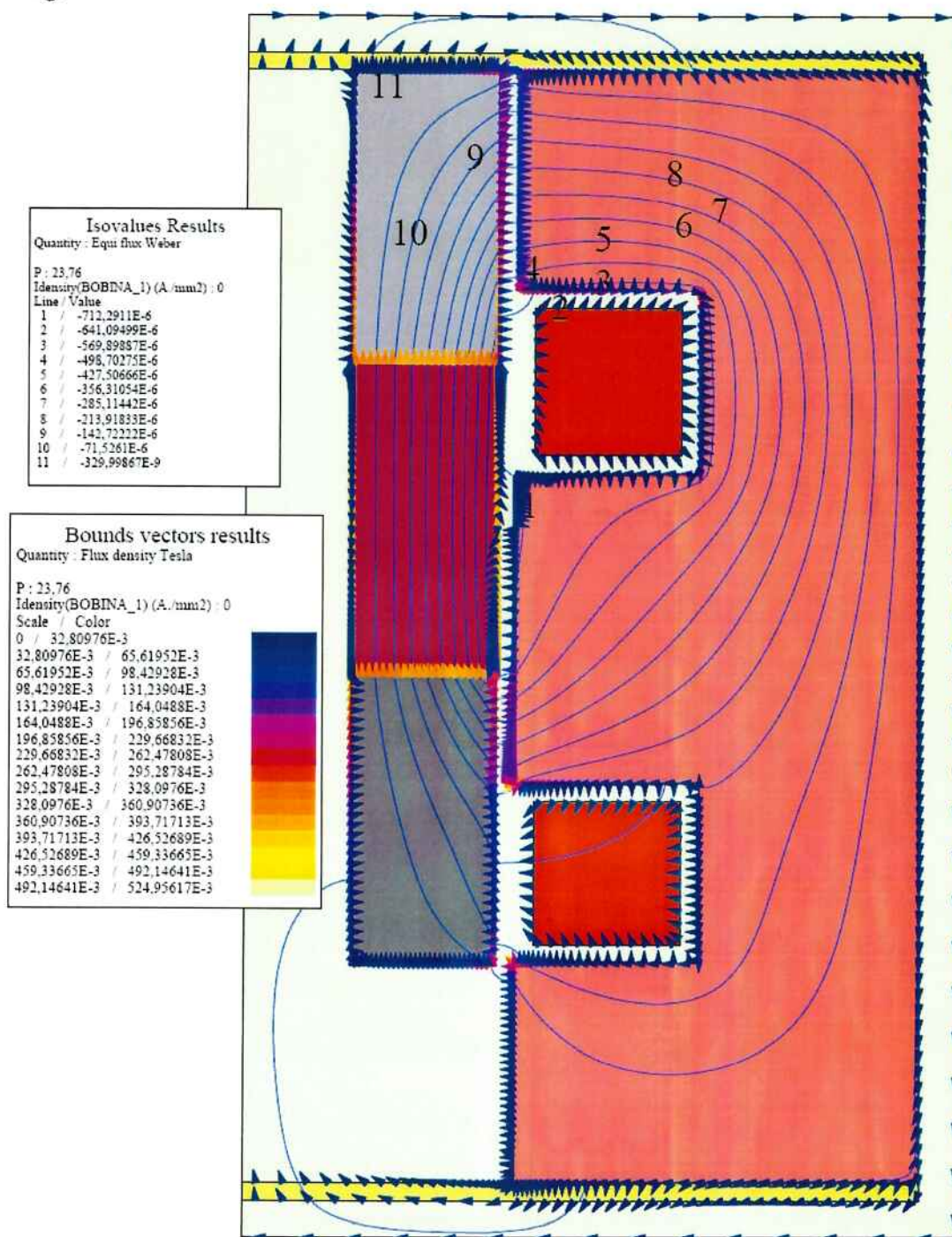


Fig.11 – Linhas de Campo para $p = 23,76 \text{ mm}$ e $I = 0 \text{ A/mm}^2$.



Anexo B

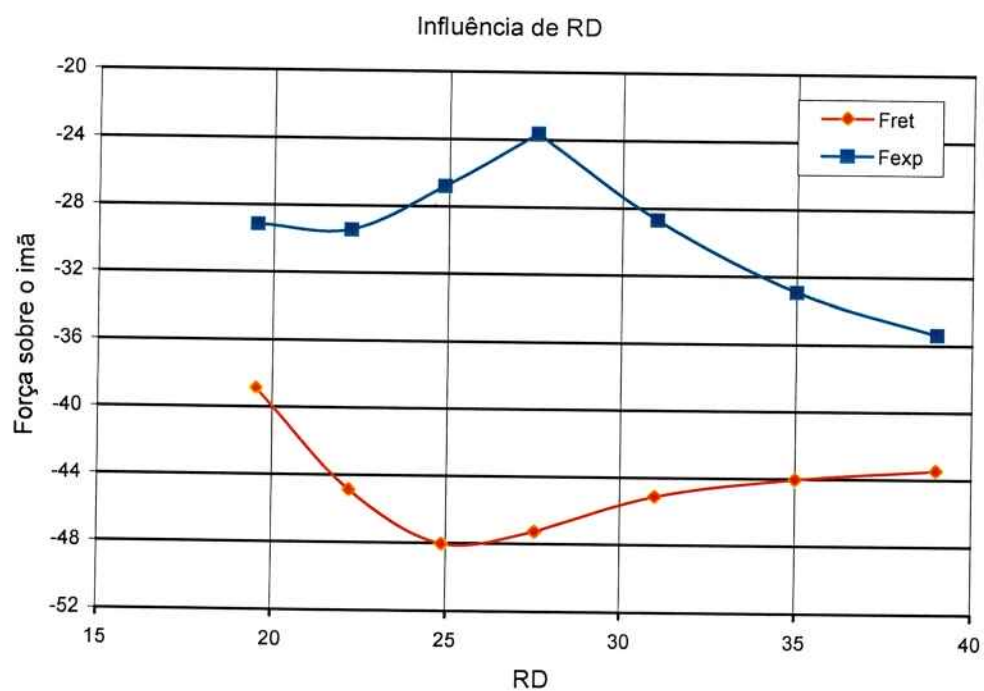


Gráfico 6 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de R_D .

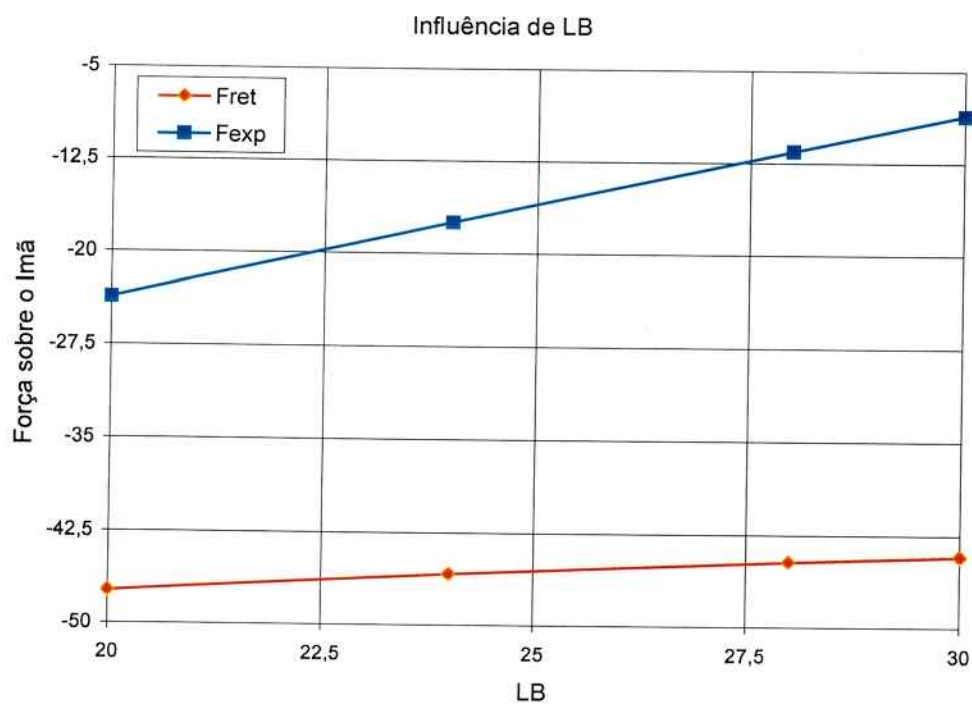


Gráfico 7 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_B .

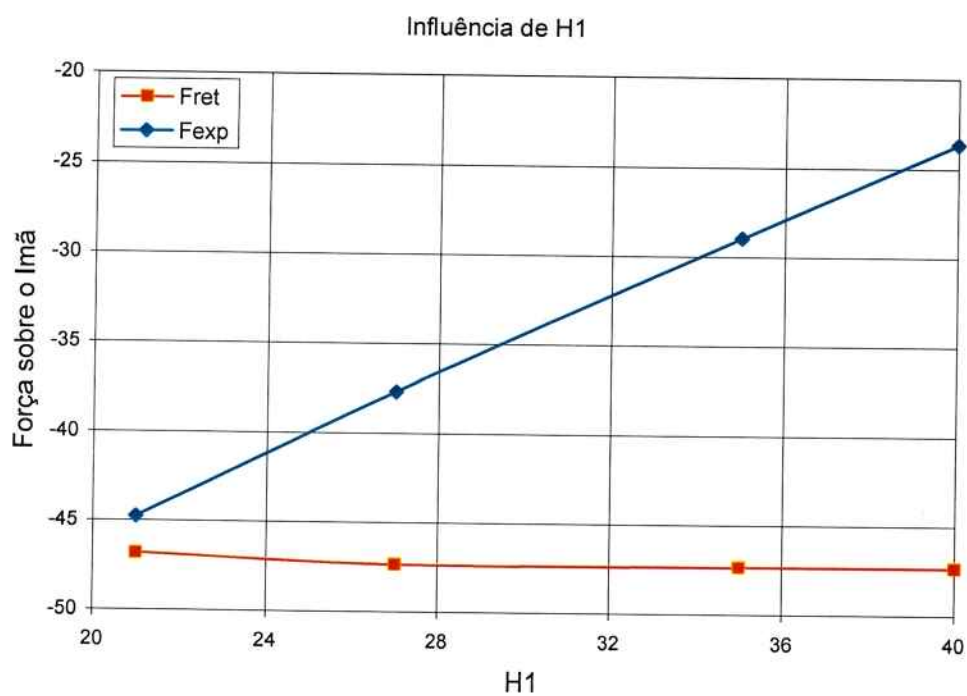


Gráfico 8 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_1 .

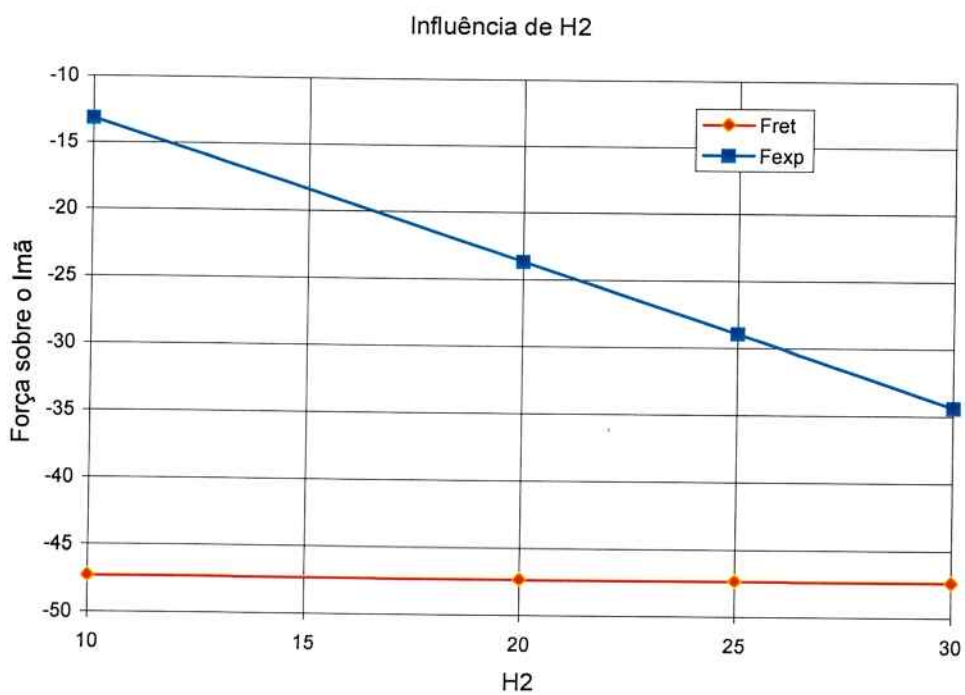


Gráfico 9 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_2 .

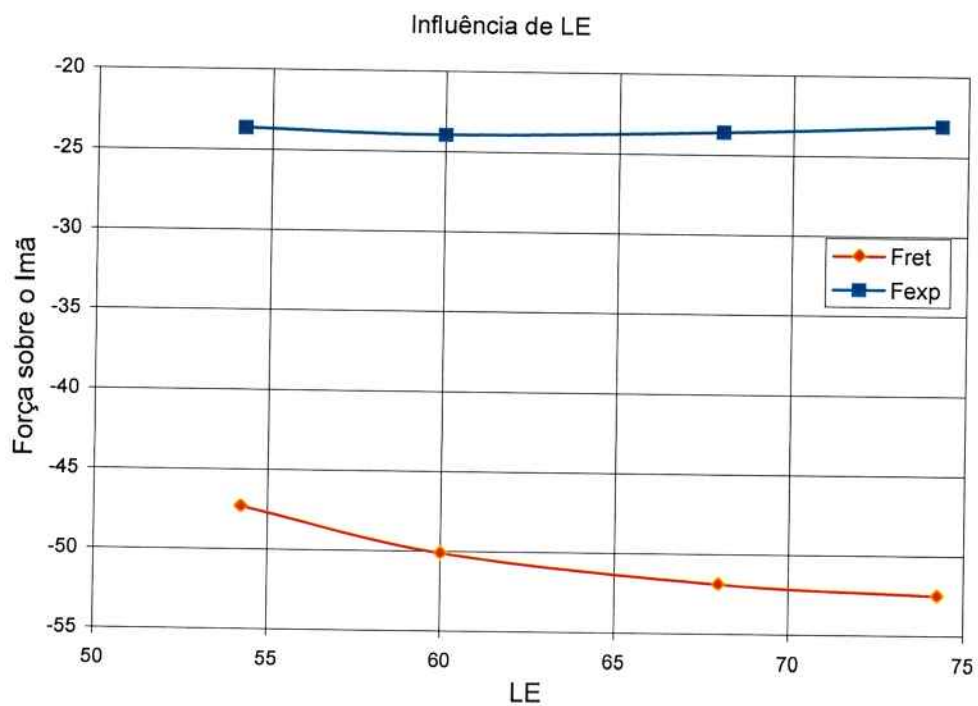


Gráfico 10 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_E .

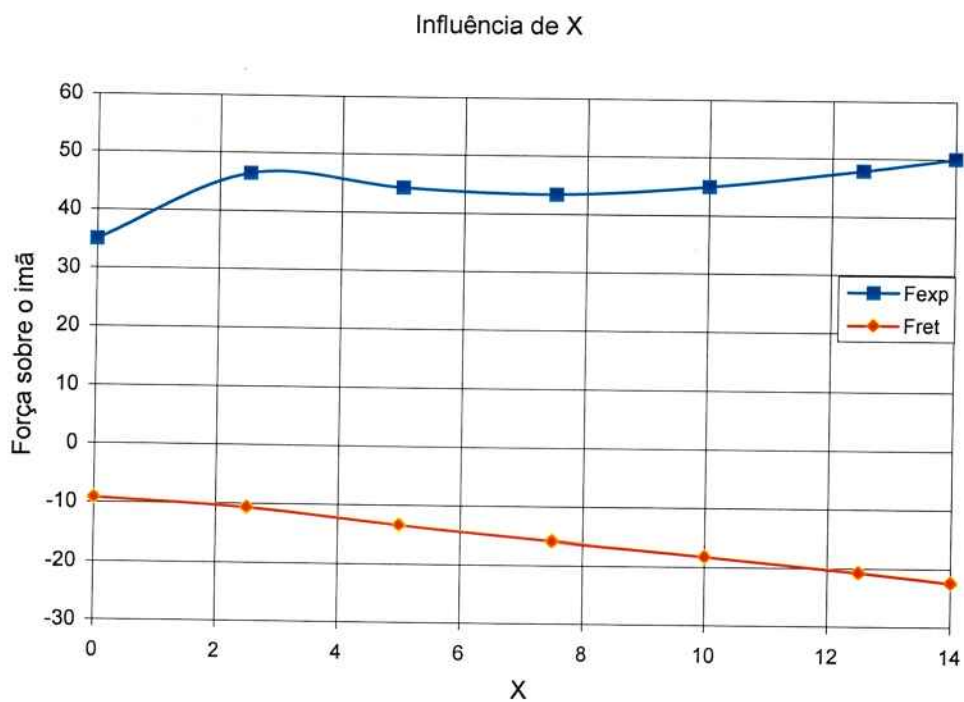


Gráfico 12 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de X .



Influência de H_3

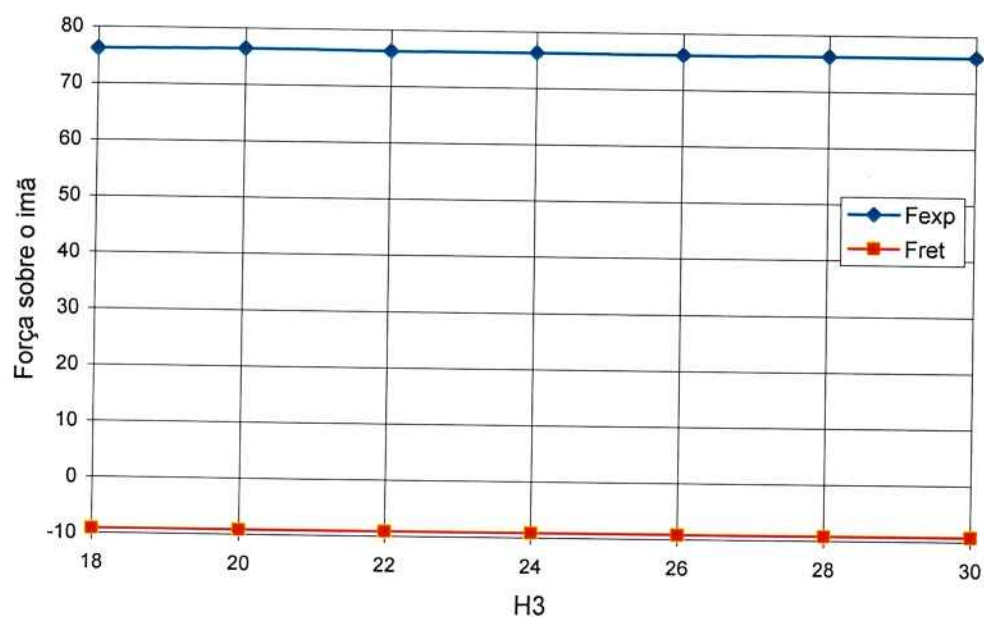


Gráfico 13 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de H_3 .

Influência de L_B

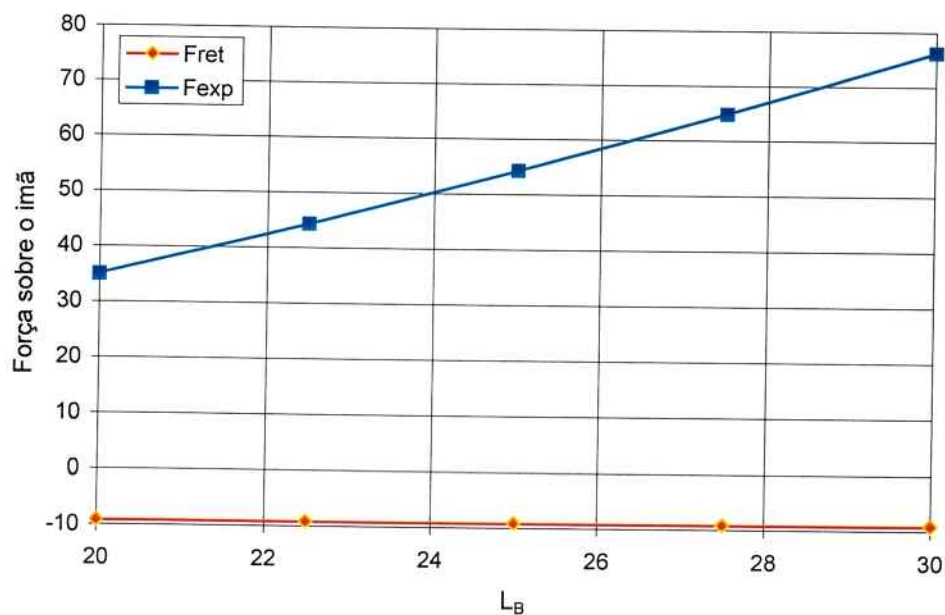


Gráfico 14 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de L_B .

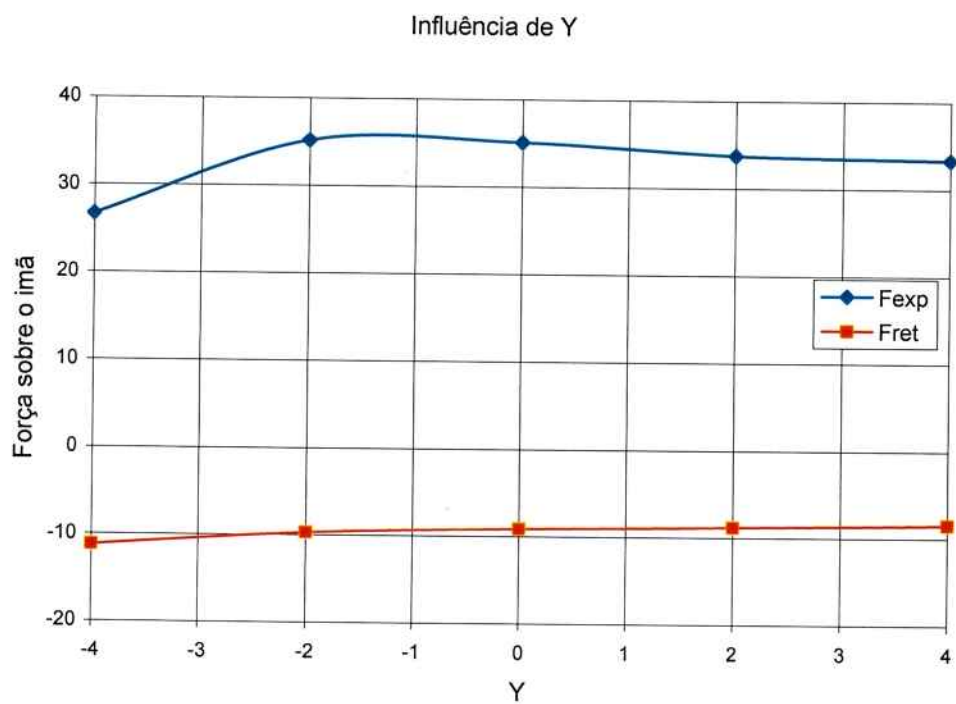


Gráfico 15 – Variação de F_{ret} e F_{exp} em função da variação de Y .



Anexo C

```
%***** Algoritmo de Otimizacao Geometria 3
%*****
%***** Ordem das coordenadas x(Var1, Var2, Var3) *****
%***** (Lb, Dl, X)*****

for kk=1:10

save kk kk

clc
clear
close all
rand('state',sum(100*clock))

% Var1 = Lb --> LB
% Var2 = Dl --> Hl
% Var3 = X --> RD
global Var1 Var2 Var3 N
global Valmin Valmax Va2min Va2max Va3min Va3max
global theta
global x
global y
global beta
global gama;

% Limites para o W que sera calculado a seguir
wmax = 0.9;
wmin = 0.4;

% Numero maximo de iteracoes
itmax = 100;

% Constantes utilizadas pelo metodo
c1 = 1.4;
c2 = 1.4;

% Tamanho da populacao
N = 30;

% Peso que forca a diminuicao das velocidades ao longo das iteracoes
for iter=1:itmax
    W(iter)=wmax-((wmax-wmin)/itmax)*iter;
end

% Parametro Lb - largura da janela da bobina
load Var1;

% Parametro Dl tamanho do entreferro radial para os polos metalicos
% na faces externas do E
load Var2;

% Parametro X nao altera o tamanho do dispositivo:
% (altura da janela da bobina)Hb = 20 + x
% (altura Hl) Hl = 24 - x
load Var3;
```



```
load kk;
if kk > 1
    load best_10_18
end
flag1=0;
% Limites Inferiores
Var1min = min(Var1);
Var2min = min(Var2);
Var3min = min(Var3);

% Limites Superiores
Var1max = max(Var1);
Var2max = max(Var2);
Var3max = max(Var3);

Valmin = (Var1min - Var1min)/(Var1max - Var1min);
Va2min = (Var2min - Var2min)/(Var2max - Var2min);
Va3min = (Var3min - Var3min)/(Var3max - Var3min);

Valmax = (Var1max - Var1min)/(Var1max - Var1min);
Va2max = (Var2max - Var2min)/(Var2max - Var2min);
Va3max = (Var3max - Var3min)/(Var3max - Var3min);

% Gera populacao inicial normalizada
posi(:,1,1) = ((Var1min + (Var1max-Var1min)*(rand(N,1,1)/100)) -
Var1min)/(Var1max - Var1min);
posi(:,2,1) = ((Var2min + (Var2max-Var2min)*(rand(N,1,1)/100)) -
Var2min)/(Var2max - Var2min);
posi(:,3,1) = ((Var3min + (Var3max-Var3min)*(rand(N,1,1)/100)) -
Var3min)/(Var3max - Var3min);
% posi(:,1,1) = ones(N,3,1).*(rand(N,3,1));
% posi(:,1,1) = zeros(N,3,1);

% Velocidade inicial
% Limites para a velocidade inicial
m=0;
nn=1;

Vx = m + (nn-m)*rand(N,3,1);

for pop=1:N
    [func(pop,:,1)]=costfunc(posi(pop,:,1));
end
kk
% Funcao F1 avalia a forza de retencao
F1 = func(:,2,1);
% Funcao F2 avalia a forza de expulsao
F2 = func(:,1,1);
Flmin=-32;

% Funcao objetivo F =
F(:,1,1) = (F1 - F2).*(F1/Flmin);

% A funcao recontre busca se a solucao encontrada nesta iteracao ja
% foi encontrada em outro teste
F(:,1,1) = recontre(F(:,1,1),posi);
if F(:,1,1) == 100
    flag1=1;
```



```
end
% Encontra o menor valor de F
[CC,II] = min(F(:,1,1));

B(1,1,1) = CC;
XX(1,1,1) = II;

% Salva a melhor posicao
pbest(1,:,1) = posi(II,:,1);

% Melhor valor para a funcao
Fbest = B;
Flbest = F1(II,1,1);
F2best = F2(II,1,1);
Fb = F;
% Melhor posicao que cada partícula atingiu
posib = posi;

% Calculo da nova velocidade
Vx(:,1,2) = W(1)*Vx(:,1,1) + c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,1,1)-posi(:,1,1)) + c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,1,1)-posi(:,1,1));
Vx(:,2,2) = W(1)*Vx(:,2,1) + c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,2,1)-posi(:,2,1)) + c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,2,1)-posi(:,2,1));
Vx(:,3,2) = W(1)*Vx(:,3,1) + c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,3,1)-posi(:,3,1)) + c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,3,1)-posi(:,3,1));

% Atualizando as coordenadas
posi(:, :, 2) = posi(:, :, 1) + Vx(:, :, 2);

% Verificando se estão dentro dos limites estabelecidos
[posi(:, :, 2)] = bound(posi(:, :, 2));

for j=2:itmax
    for pop=1:N
        [func(pop, :, j)] = costfunc(posi(pop, :, j));
    end

    F1(:,1,j) = func(:,2,j);
    F2(:,1,j) = func(:,1,j);

    F(:,1,j) = (F1(:,1,j) - F2(:,1,j)).*(F1(:,1,j)/Flmin);

    F(:,1,j) = recontre(F(:,1,j),posi(:, :, j));

    if F(:,1,1) == 100
        if flag1 >= 1
            flag1=flag1+1;
        else
            flag1=1;
        end
    end
end

if flag1 == 3
    return
end
% Analise da iteracao atual
[CC,II] = min(F(:,1,j));

% Atualiza a melhor posicao
```




```
if CC <= Fbest(:,1,j-1)
    Fbest(:,1,j) = CC;
    Flbest(:,1,j) = F1(II,1,j);
    F2best(:,1,j) = F2(II,1,j);
    pbest(1,:,j) = posi(II,:,j);
else
    Fbest(:,1,j) = Fbest(:,1,j-1);
    Flbest(:,1,j) = F1(II,1,j-1);
    F2best(:,1,j) = F2(II,1,j-1);
    pbest(1,:,j) = pbest(1,:,j-1);

end

for i=1:N
    if F(i,1,j) < Fb(i,1,j-1)
        Fb(i,1,j) = F(i,1,j);
        posib(i,:,j) = posi(i,:,j);

    else
        Fb(i,1,j) = Fb(i,1,j-1);
        posib(i,:,j) = posib(i,:,j-1);

    end
end

% Calculo da nova velocidade
Vx(:,1,j+1) = W(j)*Vx(:,1,j) +
c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,1,j)-posi(:,1,j)) +
c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,1,j)-posi(:,1,j));
Vx(:,2,j+1) = W(j)*Vx(:,2,j) +
c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,2,j)-posi(:,2,j)) +
c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,2,j)-posi(:,2,j));
Vx(:,3,j+1) = W(j)*Vx(:,3,j) +
c1*(rand(N,1,1)/100).*(posib(:,3,j)-posi(:,3,j)) +
c2*(rand(N,1,1)/100).*(pbest(1,3,j)-posi(:,3,j));

% Atualizando as coordenadas
posi(:,1,j+1) = posi(:,1,j) + Vx(:,1,j+1);

% Verificando se estao dentro dos limites estabelecidos
[posi(:,1,j+1)] = bound(posi(:,1,j+1));

end

% Salva o melhor resultado obtido para esta chamada do PSO
bestposi(1,:,kk) = pbest(1,:,itmax);
save best_10_18 bestposi;

POSI(:,1,:)=(Varlmax - Varlmin)*posi(:,1,:) + Varlmin;
POSI(:,2,:)=(Var2max - Var2min)*posi(:,2,:) + Var2min;
POSI(:,3,:)=(Var3max - Var3min)*posi(:,3,:) + Var3min;

Sol(1,1,:)=(Varlmax - Varlmin)*pbest(1,1,:) + Varlmin;
Sol(1,2,:)=(Var2max - Var2min)*pbest(1,2,:) + Var2min;
Sol(1,3,:)=(Var3max - Var3min)*pbest(1,3,:) + Var3min;

LB_3 = Sol(1,1,:);
DL_3 = Sol(1,2,:);
X_3 = Sol(1,3,:);
if kk == 10
    LB(:,1) = (Varlmax - Varlmin)*bestposi(1,1,:) + Varlmin;
    DL(:,1) = (Var2max - Var2min)*bestposi(1,2,:) + Var2min;
```



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas PEA/EPUSP

```
X(:,1) = (Var3max - Var3min)*bestposi(1,3,:) + Var3min;  
for gold=1:kk  
    [func(gold,:,1)]=costfunc(bestposi(1,:,gold));  
    F1gold(gold,1)=func(gold,2,1);  
    F2gold(gold,1)=func(gold,1,1);  
end  
end  
end
```



Anexo D

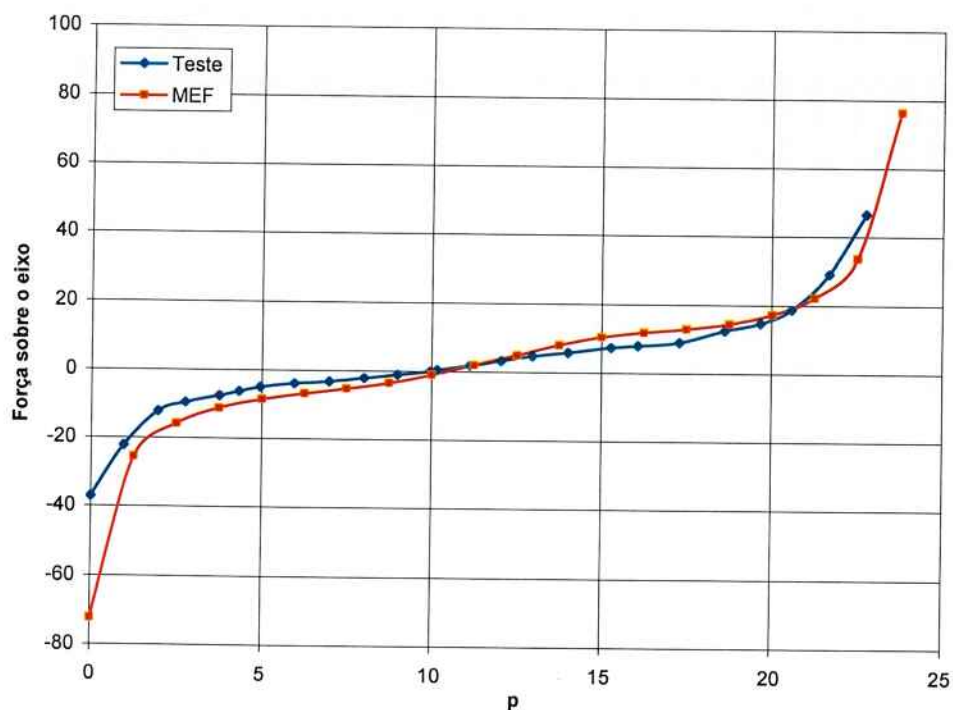


Gráfico-24 – Força sobre o eixo com $I = 0,25 \text{ A}$

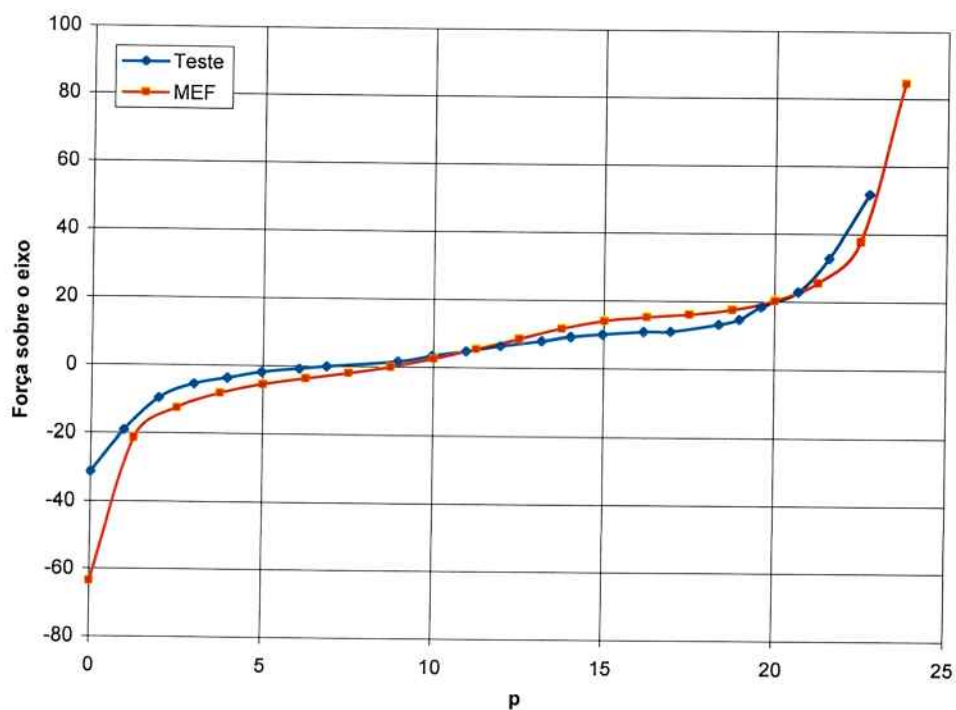


Gráfico-25 – Força sobre o eixo com $I = 0,5 \text{ A}$

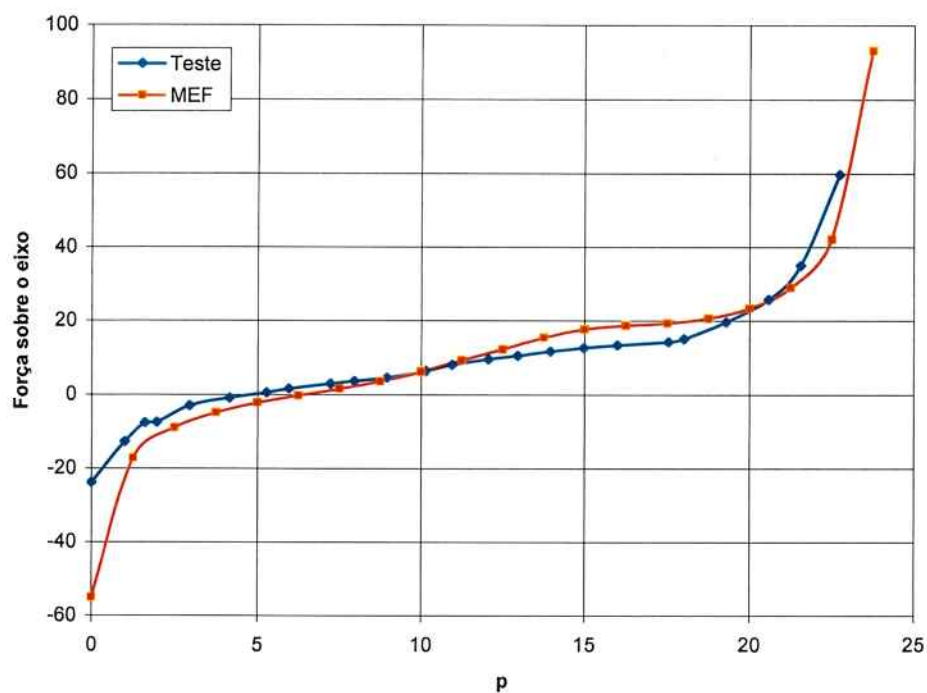


Gráfico-26 – Força sobre o eixo com $I = 0,75$ A

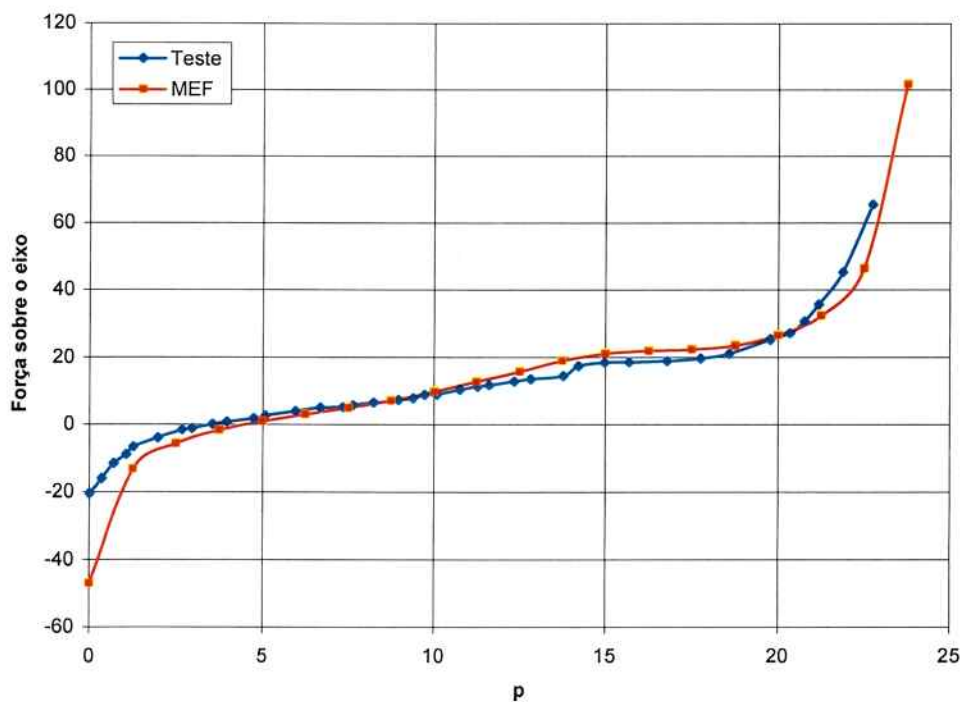


Gráfico-27 – Força sobre o eixo com $I = 1,0$ A

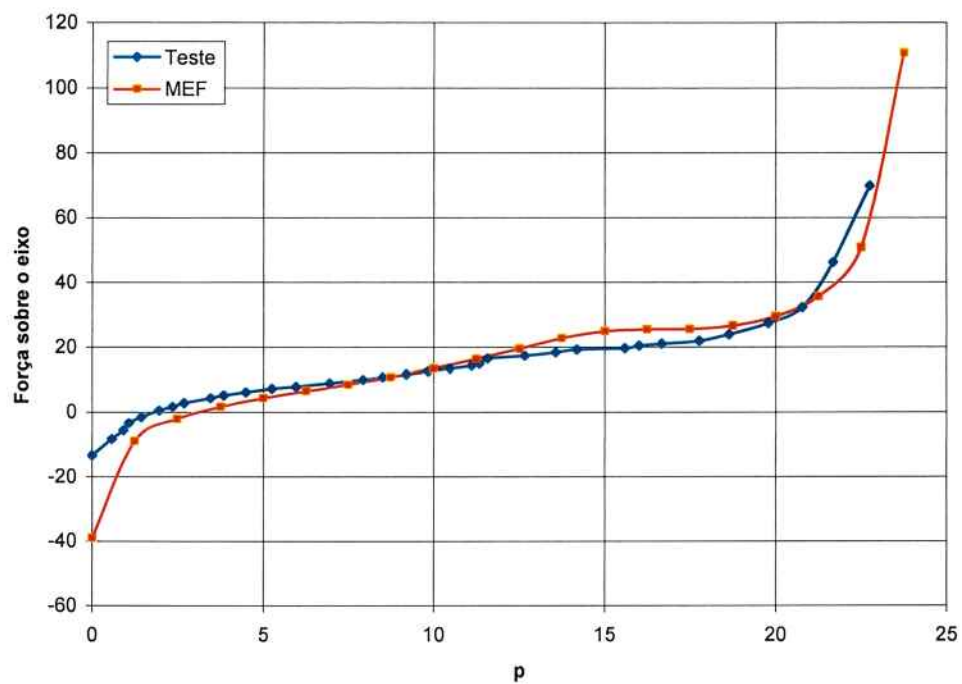


Gráfico-28 – Força sobre o eixo com $I = 1,25$ A

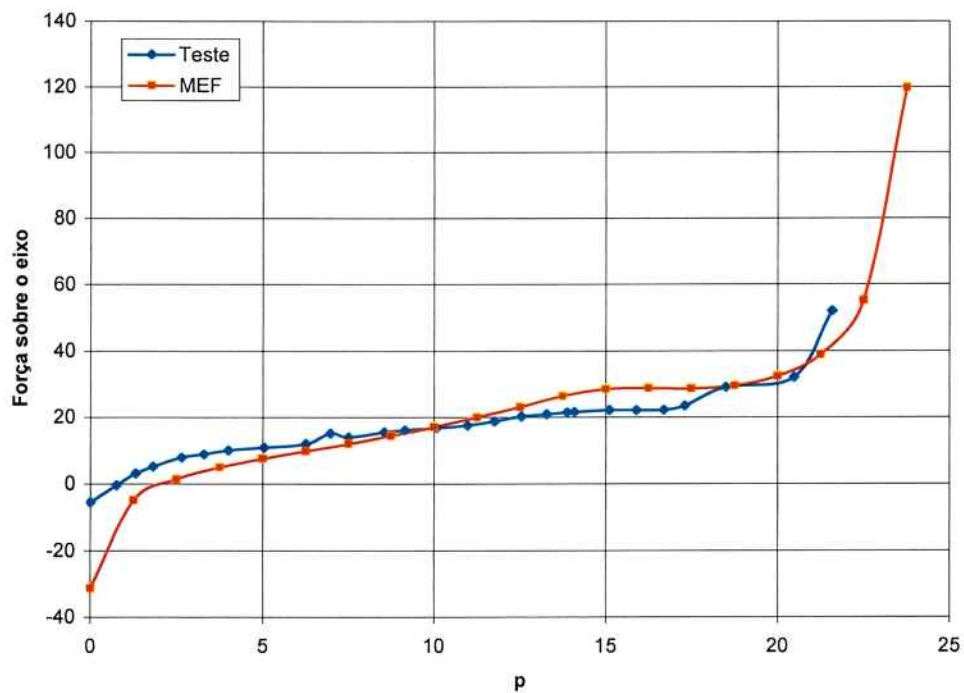


Gráfico-29 – Força sobre o eixo com $I = 1,5$ A

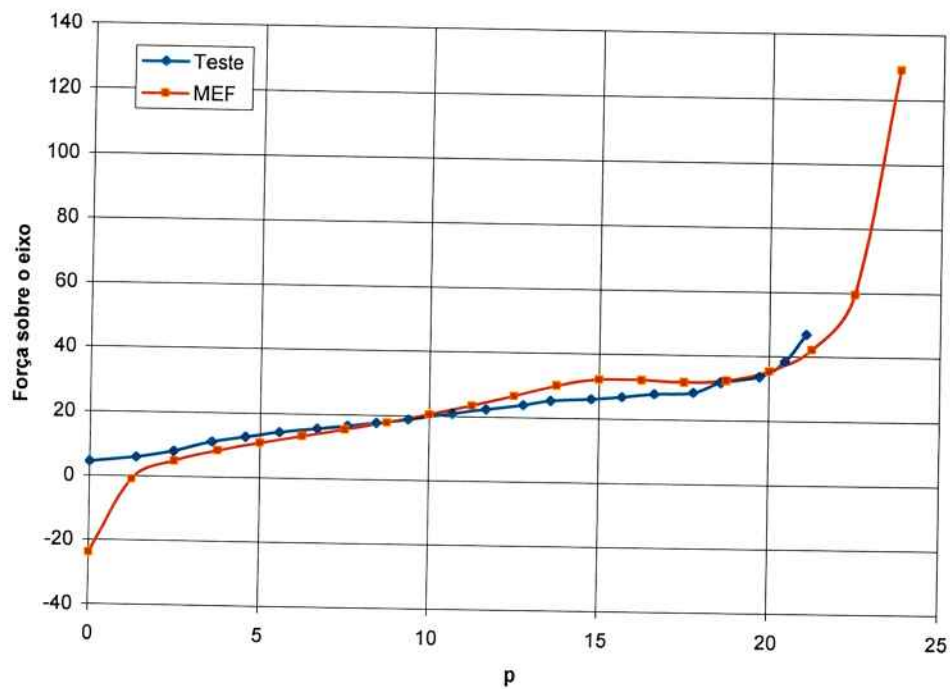


Gráfico-30 – Força sobre o eixo com $I = 1,75 \text{ A}$

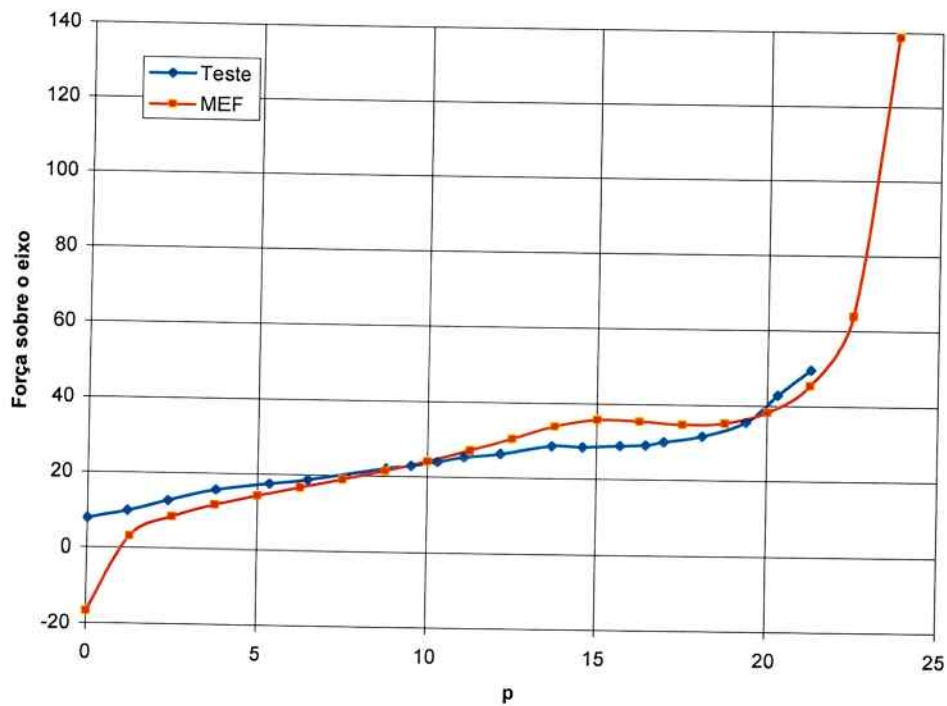


Gráfico-31 – Força sobre o eixo com $I = 2,0 \text{ A}$