

Estudo comparativo de configurações de trilhos utilizados em um
veículo de levitação magnética supercondutora

BRUNO RAMOS SODRÉ

“PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ELETROTÉCNICA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA”

APROVADO POR:

Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.
(Orientador)

Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.
(Orientador)

Antônio Lopes de Souza, Ph.D.

Eduardo Gonçalves David, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, R. J. - BRASIL

AGOSTO 2009

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças para enfrentar esta árdua batalha onde muitas vezes a derrota parecia iminente, porém sempre conseguia forças para sair de qualquer situação de maneira vitoriosa.

A minha família, minha mãe Ana Maria, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões, e meu pai Jair Sodré, que de onde ele está tenho certeza que me ajudou em todos os momentos difíceis da minha vida. Minha namorada e futura esposa, Renata Franco, pela enorme paciência de sempre estar me esperando de braços abertos após longas horas de estudo.

Aos professores que contribuíram para meu amadurecimento tanto profissional como pessoal, em especial ao professor Richard Magdalena Stephan e ao pesquisador Guilherme Gonçalves Sotelo.

Aos meus companheiros de turma, pelo compartilhamento de momentos de alegria e angústia. Em especial Ubaldo Roman, Vitor Lemos, Samara Milla e Bruno França.

Resumo

A propriedade diamagnética dos materiais supercondutores pode ser aproveitada para promover forças de levitação quando estes materiais encontram-se na proximidade de ímãs permanentes. O arranjo destes ímãs em configurações concentradoras de fluxo, formadas com o auxílio de peças de material ferromagnético, mostra-se conveniente para a construção de trilhos para veículos de levitação magnética (MAGLEV).

Este trabalho tem por objetivo determinar a configuração ótima, que apresenta a maior força de levitação, de um modelo de trilho concentrador de fluxo. Para tal, foram utilizados dois softwares de simulação baseados no método dos elementos finitos, com os quais foi possível a determinação da dimensão da barra de ferro central e da altura das barras de ferro das extremidades do modelo. Para a validação do modelo simulado foi montado um protótipo da configuração ótima e assim comparou-se o perfil de campo simulado com o real.

Posteriormente, os ímãs do modelo foram substituídos por eletroímãs de mesma área e assim tentou-se chegar a um equivalente do modelo inicial que produzisse a mesma força de levitação.

SUMÁRIO

Resumo	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1-Motivação.....	1
1.2-Divisão dos capítulos deste trabalho.....	2
1.3-Objetivos deste trabalho	3
Capítulo 2.....	4
Fundamentos Teóricos	4
2.1-Conceitos básicos e um breve histórico sobre supercondutividade	4
2.2- Supercondutores do tipo 1 e 2	5
2.3- Comparações de algumas configurações de trilhos	8
Capítulo 3.....	13
Otimização da força de levitação em um arranjo concentrador de fluxo	13
3.1-Parâmetros utilizados na simulação do trilho	13
3.2-Determinação da configuração ótima.....	15
3.3-Comparação dos resultados de densidade de fluxo simulados com resultados experimentais	18
3.3.1-Procedimentos adotados para a realização das medidas de densidade de campo no modelo experimental.	19
3.3.2-Resultados Obtidos.....	20
Capítulo 4.....	22
Substituição dos ímãs por eletroímãs em um modelo concentrador de fluxo	22
4.1 - Estrutura constituída por dois ímãs permanentes magnetizados na direção horizontal em sentidos contrários.	22
4.2-Estrutura formada por um eletroímã enrolado ao redor do ferro central com $J=18 \text{ A/mm}^2$...	24
4.3- Estrutura formada por dois eletroímãs com fluxos na direção horizontal e em sentidos contrários.	26
4.4-Estrutura formada por um eletroímã enrolado ao redor do ferro central com $J=10 \text{ A/mm}^2$...	27

4.5 – Análise Financeira.....	30
Capítulo 5.....	31
Conclusões e trabalhos futuros	31
5.1-Conclusão.....	31
5.2-Trabalhos Futuros	31
Bibliografia.....	33
Anexo 1	34
Programa desenvolvido no software Comsol para a determinação da força ótima na configuração inicial mostrada na figura 8.	34
Anexo 2.....	38
Programa desenvolvido no software Ansys para a determinação da força ótima na configuração inicial mostrada na figura 8.	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento do campo dentro da esfera supercondutora para $T > T_c$ (estado normal).	6
Figura 2 - Comportamento do campo dentro da esfera supercondutora para $T < T_c$ (estado supercondutor).....	6
Figura 3 - Concentrador de Fluxo.....	9
Figura 4- Arranjo Up-Down.....	9
Figura 5 - Meio Halbach	10
Figura 6 - Halbach	10
Figura 7 - Gráficos de diversas curvas de magnetização.	14
Figura 8 - Curva BxH do aço 1010 utilizado.....	14
Figura 9 - Configuração inicial inserida nos programas Ansys e Comsol.	15
Figura 10 - Comparação da força de levitação utilizando os softwares Ansys e Comsol.	16
Figura 11 - Configuração Ótima encontrada no Comsol para o modelo de trilho adotado.....	17
Figura 12 – Configuração Ótima encontrada no Ansys para o modelo de trilho adotado.....	17
Figura 13- Modelo concentrador de fluxo ótimo determinado pelas simulações.	18
Figura 14 -Gaussímetro utilizado nas medidas de densidade de campo.	19
Figura 15 - Comparação dos perfis de densidade de campo na direção axial, simuladas com o Comsol e medida.	21
Figura 16 - Configuração com ímãs magnetizados em sentidos contrários.	23
Figura 17 - Representação da densidade de campo e linhas de fluxo geradas pelo programa, referentes à figura 17.	23
Figura 18 - Configuração com eletroímã enrolado ao redor do ferro central.	24
Figura 19 - Representação da densidade de campo e linhas de fluxo geradas pelo programa, referentes à figura 19.	25
Figura 20 - Configuração com dois eletroímãs produzindo fluxos na direção horizontal e em sentidos contrários.	26
Figura 21 - Representação da força de levitação em função do tamanho dos eletroímãs.	27
Figura 22 - Representação da força de levitação em função da altura do eletroímã.....	28
Figura 23 - Curvas simuladas no Comsol, que relacionam altura do eletroímã, densidade de corrente e força de levitação da figura 19.....	29
Figura 24 – Curvas, em três dimensões, simuladas no Comsol, que relacionam altura do eletroímã, densidade de corrente e força de levitação da figura 19.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de algumas configurações de trilhos	11
Tabela 2 - Escalas do gaussímetro modelo 5080.	19
Tabela 3 - Resolução do gaussímetro modelo 5080.	20
Tabela 4 - Comparação do custo da configuração formada por ímãs permanentes e eletroímãs.	30

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo serão abordados os seguintes tópicos:

- A motivação para a realização deste trabalho.
- Como estão divididos os capítulos deste trabalho.
- Os principais objetivos a serem alcançados.

1.1-Motivação

As grandes metrópoles brasileiras vêm enfrentando grandes problemas com o aumento do número de veículos automotores particulares, os quais são responsáveis por congestionamentos quilométricos frequentes nestes grandes centros.

Uma solução para tentar amenizar a desordem do trânsito urbano nestas grandes cidades seria o investimento em transportes coletivos, os quais suportam uma grande quantidade de indivíduos, diferentemente de um automóvel particular, onde muitas vezes, este transporta apenas uma pessoa.

Atualmente no Brasil, contamos com os seguintes meios de transportes terrestres coletivos:

- Trens
- Metrô
- Ônibus

Os ônibus não são uma forma de transporte eficiente, pois além de poluírem o meio ambiente estes estão à mercê do trânsito nas rodovias. Os trens já não possuem este último problema apresentado pelos ônibus, porém são responsáveis por altos níveis de ruídos e apresentam elevado valor de implantação. Por fim, os metrô apesar do menor impacto ambiental, devido às linhas subterrâneas, tem custo de implementação ainda maior.

Um interessante meio de transporte em massa são os veículos de levitação magnética, os chamados MAGLEV, os quais apresentam diversas vantagens em relação aos outros meios de transportes já mencionados, tais como [1]:

- São ecologicamente corretos;
- São economicamente corretos, com custo de implantação 1/3 menor que a do metrô;
- Podem atingir velocidades em torno de 400 km/h, pois como não possuem rodas o único atrito a ser vencido é a resistência do ar;
- São extremamente silenciosos.

Assim, o veículo MAGLEV é uma excelente alternativa para o transporte em massa, além de possuir diversas vantagens em relação aos outros meios de transporte.

1.2-Divisão dos capítulos deste trabalho

A divisão dos capítulos deste trabalho será realizada da seguinte maneira:

- No capítulo 2, serão abordados fundamentos teóricos para o bom entendimento deste trabalho, tais como conceitos básicos e um breve histórico sobre supercondutividade, a diferença entre supercondutores do tipo 1 e 2 e os principais arranjos para um trilho utilizado em um veículo de levitação magnética supercondutora.
- No capítulo 3, a partir de uma configuração inicial de trilho constituído de ímãs e ferro, serão investigados arranjos mais promissos destes trilhos, através de programas de simulação baseados no método dos elementos finitos, para a obtenção da maior força de levitação possível, e assim fazer a

comparação dos resultados simulados com medições em protótipos. É importante ressaltar a relevância deste estudo, pois a construção do trilho representa o maior investimento em um projeto de uma linha comercial.

- No capítulo 4, serão estudadas diversas configurações de trilho, onde os ímãs são substituídos por eletroímãs, com a mesma área, e tentar chegar a uma configuração que possua aproximadamente a mesma força de levitação.
- No capítulo 5, será vista a conclusão sobre este trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

1.3-Objetivos deste trabalho

Como objetivos principais deste trabalho, podem ser destacados:

- Validação dos valores de força encontrados nas simulações realizadas no capítulo 2, com as medições do modelo real. Esta validação pode ser feita com dados de densidade de campo magnético, pois $F \propto (B, \nabla B)$ [2].
- Verificar se a substituição de ímãs por eletroímãs é capaz de produzir a mesma força de levitação.
- Verificar a viabilidade de implantar eletroímãs em equipamentos de mudança de via.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão abordados conceitos de fundamental importância para o bom entendimento deste trabalho, tais como:

- Conceitos básicos de supercondutividade.
- Supercondutores do tipo 1 e 2.
- Comparação de algumas configurações de trilhos.

2.1-Conceitos básicos e um breve histórico sobre supercondutividade

Existem três tipos de comportamentos magnéticos dos materiais presentes na natureza [3], estes são:

- Ferromagnetismo – Em um material ferromagnético desmagnetizado, seus domínios magnéticos estão orientados aleatoriamente, de forma que seus efeitos se cancelam. Entretanto, se estes domínios são alinhados por um campo magnético externo, por exemplo, um conjunto de ímãs, o material se torna magnético e é fortemente atraído pelos ímãs. O alinhamento de todos os domínios em uma direção provoca um efeito aditivo, o qual pode ou não permanecer após a retirada deste campo externo. O exemplo mais comum de um material ferromagnético é o aço.
- Diamagnetismo – São materiais que quando expostos a um campo magnético externo, o movimento de seus elétrons é alterado, desta forma criando uma corrente que circula externamente na superfície do material, em consequência há o surgimento de um campo magnético em sentido contrário ao do campo externo.

- Paramagnéticos – São materiais que quando expostos a um campo magnético externo são fracamente atraídos por este campo. Um exemplo de material paramagnético é o alumínio.

Os materiais supercondutores são classificados como diamagnéticos, pois quando encontram-se abaixo de uma determinada temperatura, conhecida como temperatura crítica (T_c), e na presença de um campo magnético externo, estes repelem todas as linhas de fluxo produzidas pelo campo externo, assim originando uma força de repulsão entre a fonte de campo e o material supercondutor, que pode ser também denominada força de levitação. Será visto na próxima seção que este tipo de supercondutor é classificado como supercondutor tipo 1.

Em um breve histórico sobre a supercondutividade, podemos destacar o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, que foi responsável pela descoberta deste fenômeno em 1911. Ele observou que, para temperaturas muito baixas, menores que 4,2 K, a resistividade do mercúrio caía para zero rapidamente. Durante 75 anos após essa descoberta, o valor máximo de T_c conseguido era da ordem de 20 K. Este fato implicava que a supercondutividade só era alcançada usando-se o hélio líquido, o qual é muito caro, cuja temperatura de ebulição é de 4,2 K. Porém, em 1986, Alex Muller e Johann Bednorz descobriram um óxido de bário, lantânio e cobre com T_c da ordem de 40 K, desta forma encorajando novas descobertas de materiais com altas temperaturas críticas.

Já em 1987, foi fabricado um óxido complexo com ítrio, bário e cobre, os chamados $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, com valor de T_c de 92 K, que é maior que 77 K, que corresponde ao ponto de ebulição do nitrogênio, um gás barato e que não apresenta riscos. A descoberta deste óxido foi de fundamental importância para que as pesquisas em supercondutividade pudessem avançar de maneira notória.

2.2- Supercondutores do tipo 1 e 2

Para exemplificar um comportamento magnético dos supercondutores, considere uma esfera homogênea de um material supercondutor em um campo magnético externo B_0 , para uma temperatura maior que T_c . Esta situação pode ser vista na figura 1, onde o campo

magnético externo é fornecido por 2 ímãs permanentes. Como $T > T_c$, o material encontra-se em sua fase normal, e não na fase supercondutora. Agora, diminuindo a temperatura até que a esfera atinja seu estado supercondutor, obtém-se a situação que pode ser observada na figura 2.

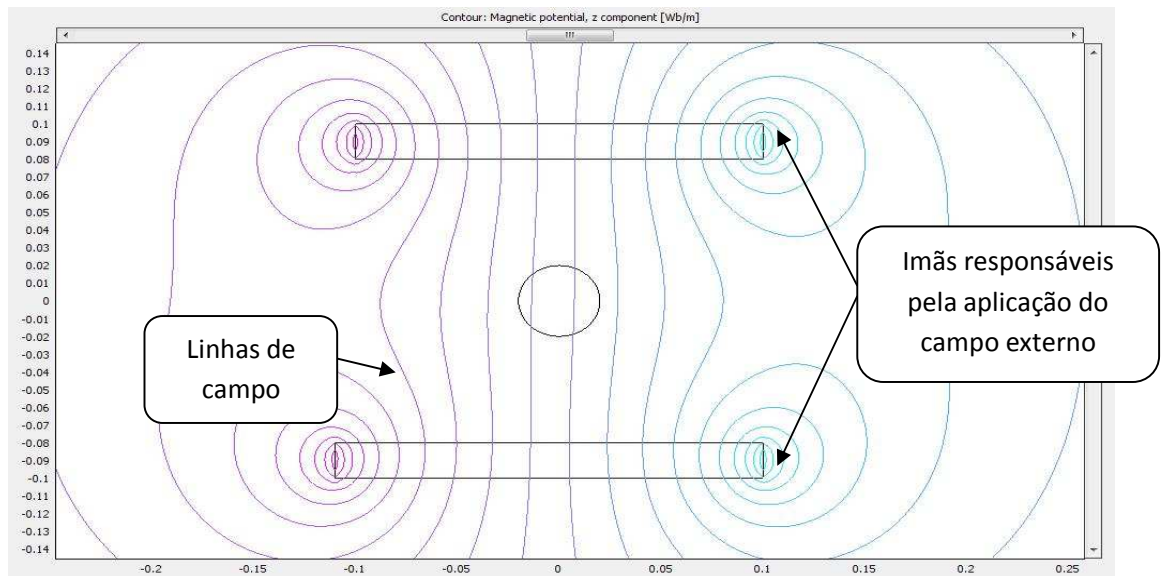


FIGURA 1 - COMPORTAMENTO DO CAMPO DENTRO DA ESFERA SUPERCONDUTORA PARA $T > T_c$ (ESTADO NORMAL).

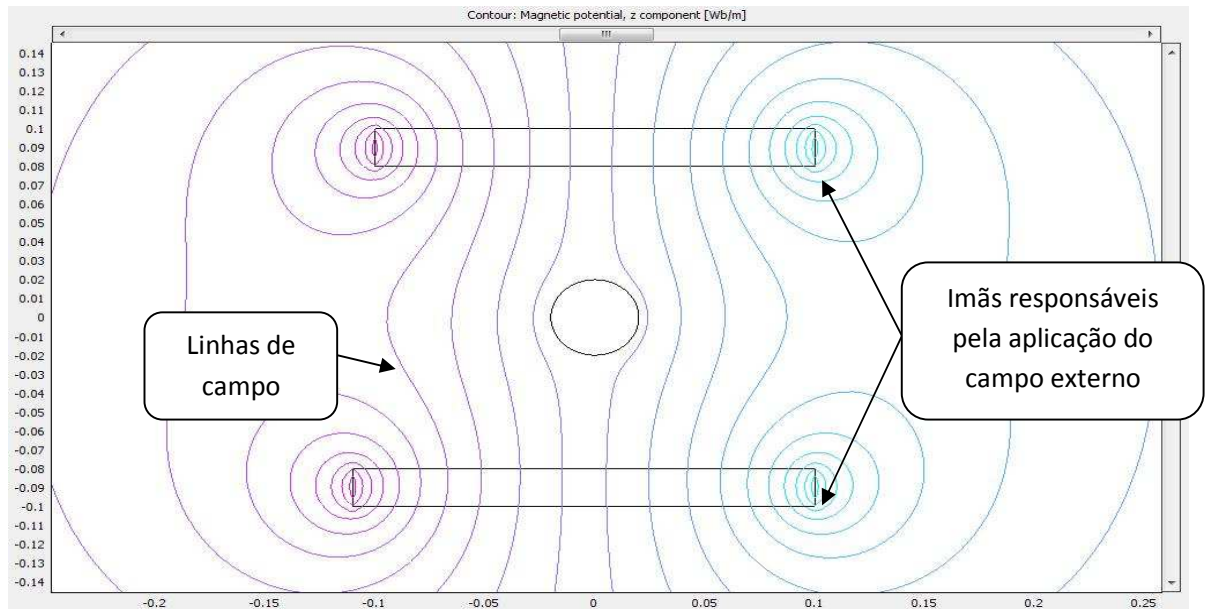


FIGURA 2 - COMPORTAMENTO DO CAMPO DENTRO DA ESFERA SUPERCONDUTORA PARA $T < T_c$ (ESTADO SUPERCONDUTOR).

É possível observar na figura 1 que as linhas de campo penetram totalmente na esfera, desta forma o campo em seu interior é praticamente igual ao campo externo B_0 . Quando a temperatura do material é reduzida até este atingir o estado supercondutor, constata-se que as linhas de campo tornam-se distorcidas e que o campo dentro da esfera é nulo. Finalmente, quando o campo externo é removido, mantendo o material na fase supercondutora, o campo dentro da esfera continua a ser nulo.

Desta forma, conclui-se que durante a transição para a fase supercondutora na presença do campo externo, todo o fluxo magnético é expelido do volume da esfera supercondutora. Essa expulsão de fluxo é denominada efeito *Meissner* [4].

O comportamento descrito anteriormente aplica-se aos supercondutores do tipo 1, os quais apresentam somente o estado Meissner. Nesse estado não pode haver penetração de fluxo magnético, então surgem correntes que blindam o material, as quais são suficientes até H_c , para valores maiores que H_c o material transaciona para o estado normal. Já os supercondutores do tipo 2 apresentam dois valores de campos magnéticos críticos H_{c1} e H_{c2} . Quando são submetidos a um campo magnético externo, possuem as seguintes características:

- Quando há um campo inferior a H_{c1} o supercondutor irá expulsar todo o fluxo presente em seu interior (efeito *Meissner*).
- Quando há um campo entre H_{c1} e H_{c2} , começa a haver penetração de fluxo no supercondutor originando o chamado *estado misto*. Neste estado há regiões supercondutoras e regiões normais na amostra, devido à presença de um campo magnético externo nas regiões normais há correntes circulando, o que indica que existe um fluxo magnético, diferente de zero, no interior destas regiões.
- Para um campo maior que H_{c2} o supercondutor transita para seu estado normal.

Neste trabalho, por simplicidade, os supercondutores serão modelados como materiais do tipo 1, os quais não representam a situação real, pois são materiais sem interesse prático. Entretanto, a modelagem adotada permite obter o limitante superior da força de levitação, que a torna uma ferramenta prática no projeto dos trilhos magnéticos.

2.3- Comparações de algumas configurações de trilhos

Esta seção irá apresentar algumas configurações de trilhos magnéticos, as quais podem ser implementadas na construção de um veículo de levitação magnética supercondutora.

Serão abordadas as seguintes configurações:

- Concentrador de Fluxo;
- Arranjo Up-Down;
- Arranjo Meio Halbach
- Arranjo Halbach.

Primeiramente, o concentrador de fluxo é composto por dois ímãs permanentes magnetizados na direção horizontal em sentidos opostos e por 3 barras de ferro de altura igual a dos ímãs, sendo uma na região central dos ímãs e as outras duas nas extremidades. A figura 3 representa esta configuração.

O arranjo Up-Down é formado por dois ímãs magnetizados na direção vertical em sentidos contrários, além de uma barra de ferro na base dos ímãs. Esta configuração pode ser vista na figura 4.

Na figura 5, pode-se observar o arranjo Meio Halbach, que é semelhante ao concentrador de fluxo, porém o tamanho das barras de ferro não é o mesmo.

Finalmente, o arranjo Halbach é composto por três ímãs magnetizados de acordo com a figura 6.

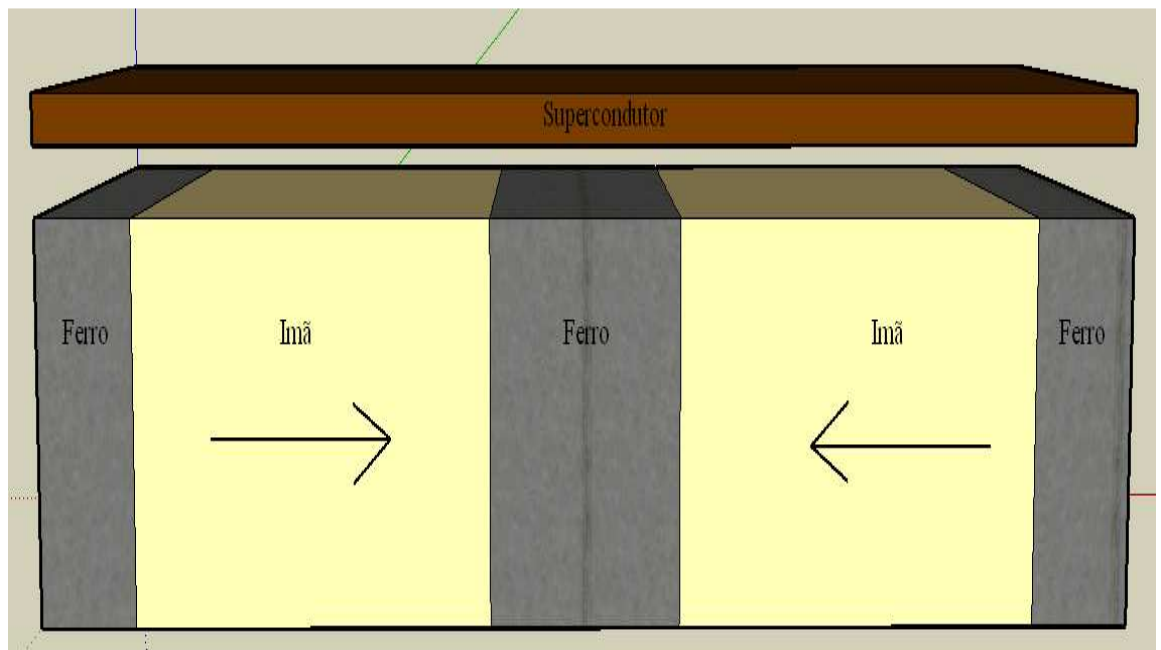


FIGURA 3 - CONCENTRADOR DE FLUXO

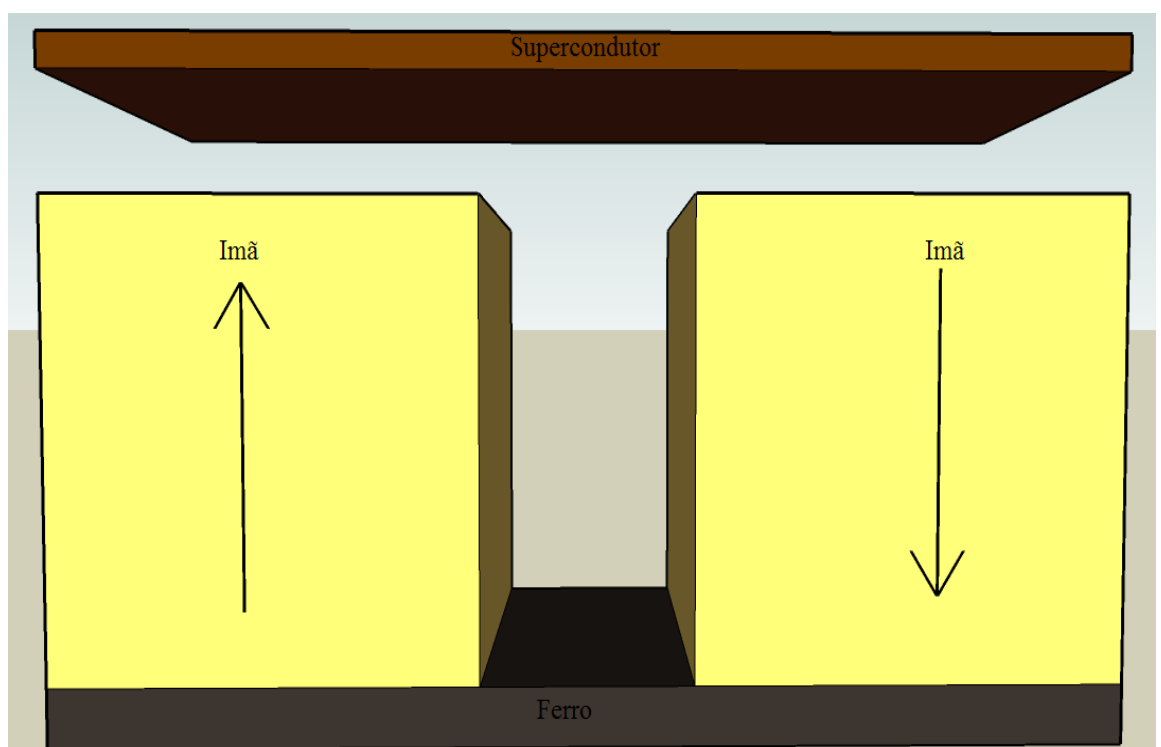


FIGURA 4- ARRANJO UP-DOWN.

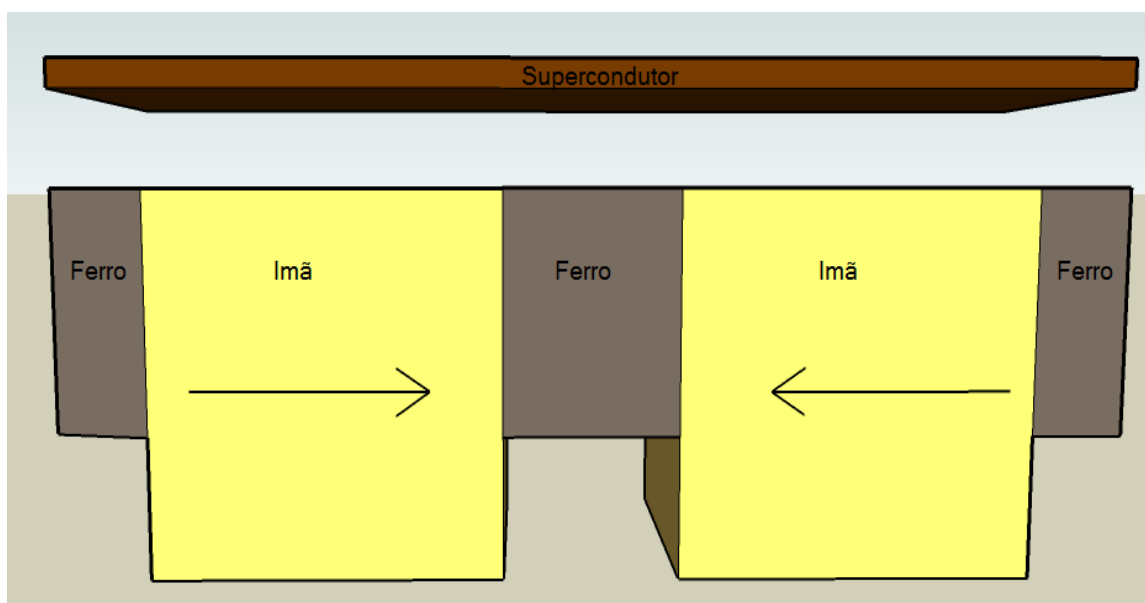


FIGURA 5 - MEIO HALBACH

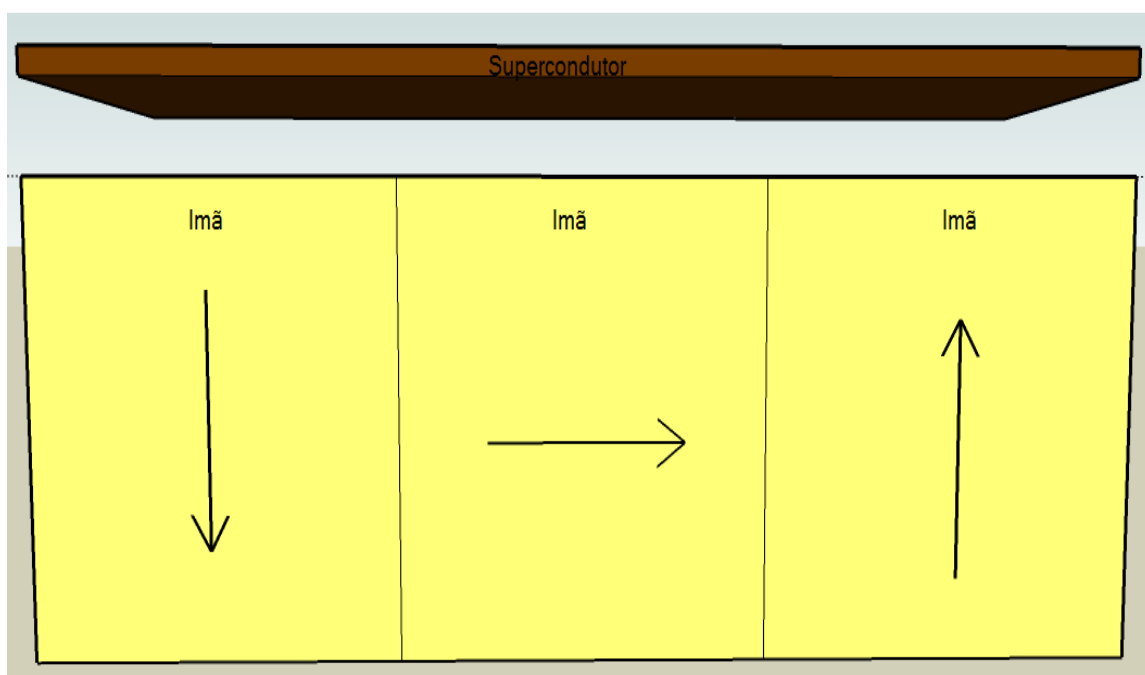


FIGURA 6 - HALBACH

A decisão da configuração a ser implementada, foi tomada com base nas vantagens e desvantagens de cada arranjo, as quais podem ser vistas na tabela 1.

TABELA 1- COMPARAÇÃO DE ALGUMAS CONFIGURAÇÕES DE TRILHOS

Arranjo	Vantagens	Desvantagens
Concentrador de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> • Torna o campo mais homogêneo, devido à presença do ferro entre os imãs. Este tem o papel de fazer uma homogeneização das linhas de campo. • Montagem com complexidade intermediária, porém o LASUP já dispõe de tecnologia para sua implementação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dispersão parcial do fluxo magnético para a parte de baixo da geometria.
Up-Down	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil montagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor densidade de força. • Variação do campo magnético ao longo do trilho, isto porque não há a presença do ferro para homogeneizar as linhas de campo, podendo causar o efeito conhecido como arraste de fluxo no supercondutor.
Hallbach	<ul style="list-style-type: none"> • Maior densidade de força. • Menor dispersão de fluxo magnético. 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem extremamente complexa. • Arraste de fluxo.

Analisando a tabela 1, foi decidido que a melhor configuração a ser implementada pelo presente trabalho é o arranjo concentrador de fluxo. Então, nos próximos capítulos, apenas será estudada esta configuração.

Capítulo 3

Otimização da força de levitação em um arranjo concentrador de fluxo

Este capítulo apresenta os parâmetros utilizados para simulação do arranjo concentrador de fluxo. A partir de uma configuração inicial, procura-se otimizá-la para a obtenção da maior força de levitação. Posteriormente, será determinado, através de simulações, o perfil de densidade de campo magnético na direção axial desta configuração ótima para finalmente validar este modelo simulado com ensaios realizados no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP).

3.1-Parâmetros utilizados na simulação do trilho

Os programas Ansys e Comsol, que utilizam o método dos elementos finitos, foram utilizados para a simulação do trilho, onde a definição de cada material do modelo simulado foi feita da seguinte maneira:

- Os ímãs utilizados foram de Nd-Fe-B(35M), os quais apresentam $B_r = 1,176$ T (campo remanente) e $H_c = 918$ KA/m (força coercitiva). Estes valores se comparados a outros ímãs são elevados, como pode ser visto na figura 7.
- O material ferromagnético escolhido foi o aço SAE-1010. Como este é um material não linear, ou seja, o valor de μ_r (permeabilidade relativa) não é constante, foi inserida uma curva que relaciona B versus H (ou curva BH) para este material. Esta pode ser vista na figura 8.
- O supercondutor foi tratado como um supercondutor ideal, ou seja, um diamagneto perfeito, assim seu valor de μ_r foi de 10^{-11} . É importante ressaltar que quando

calcula-se a força de levitação em um supercondutor ideal, não obtemos o valor real desta força e sim um valor superestimado.

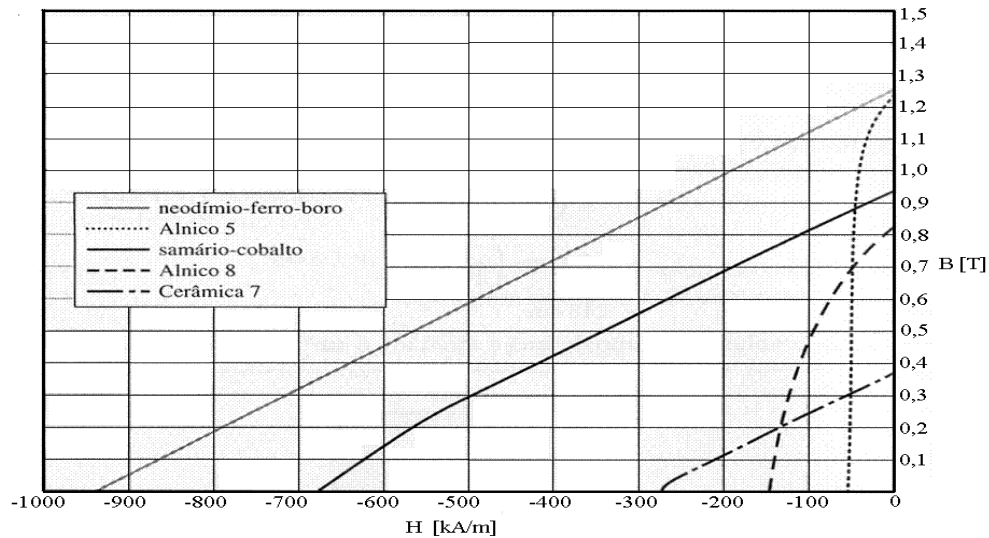


FIGURA 7 - GRÁFICOS DE DIVERSAS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO¹.

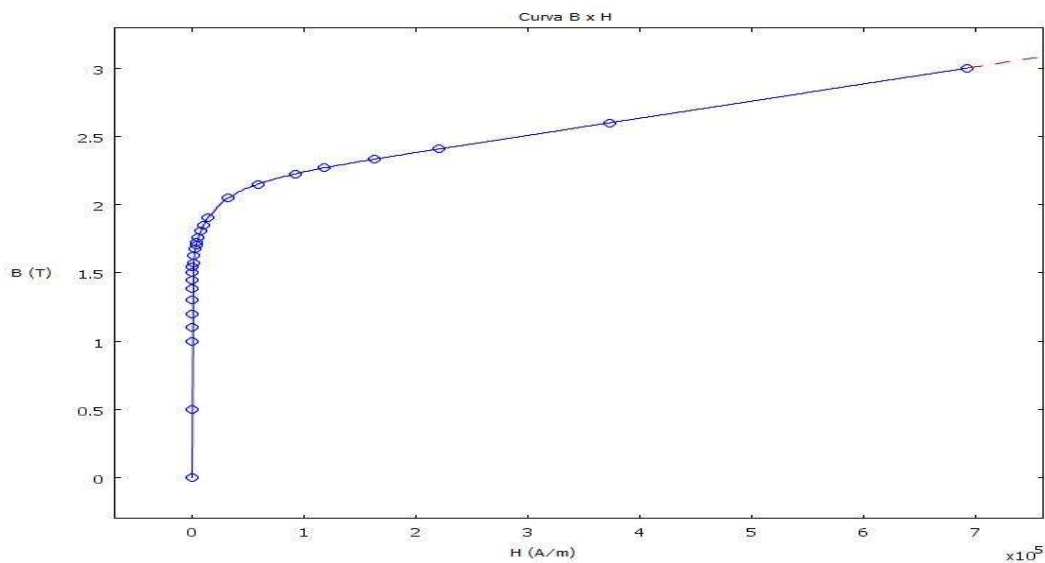


FIGURA 8 - CURVA BXH DO AÇO 1010 UTILIZADO.

Usando ambos os programas de elementos finitos, simulou-se a configuração de trilho concentrador de fluxo mostrada na figura 9. Esta configuração é constituída de 2 blocos de ímãs de Nd-Fe-B com dimensões fixas de 50mm x 50mm, 1 bloco supercondutor

¹ O valor do campo remanente do ímã de Nd-Fe-B da figura 6 apresenta um valor diferente do utilizado no projeto, o qual foi de 1,176T.

de dimensões 180mm x 13mm e por fim barras de aço SAE-1010, onde o comprimento e a altura destas são parâmetros a serem variados na simulação. Pode-se descrever esses parâmetros como:

- X_{fe} – Representa a largura da barra de aço central do modelo e
- P – Representa o quanto de aço será retirado da base da barra.

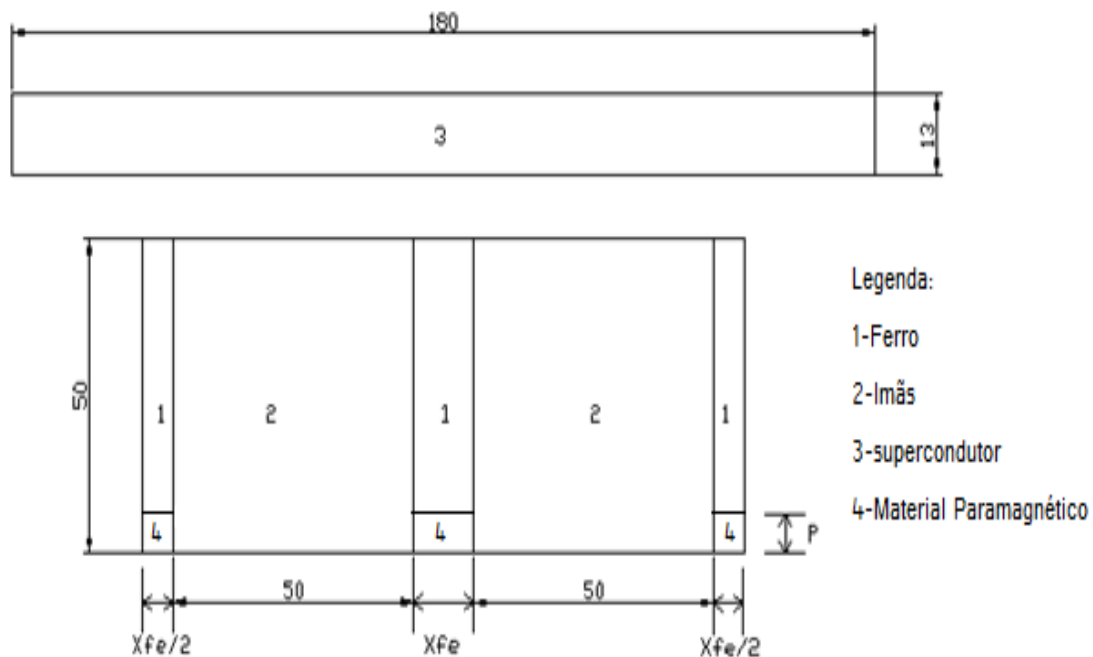


FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO INICIAL INSERIDA NOS PROGRAMAS ANSYS E COMSOL.

Assim, foram criados *scripts* em ambos os programas, os quais podem ser vistos nos anexos 1 e 2. Estes funcionavam basicamente em dois *loops*, um externo e um interno, os quais eram responsáveis por variar X_{fe} de 5 mm até 20 mm e P de 2 mm até 35 mm. E assim, a força de levitação era calculada em cada ponto [5-6].

3.2-Determinação da configuração ótima

Por meio dos resultados obtidos usando a abordagem apresentada na seção anterior, foram feitos dois gráficos relacionando X_{fe} x P x F_y (Força de Levitação) para cada um dos programas. Esses resultados podem ser vistos na figura 10.

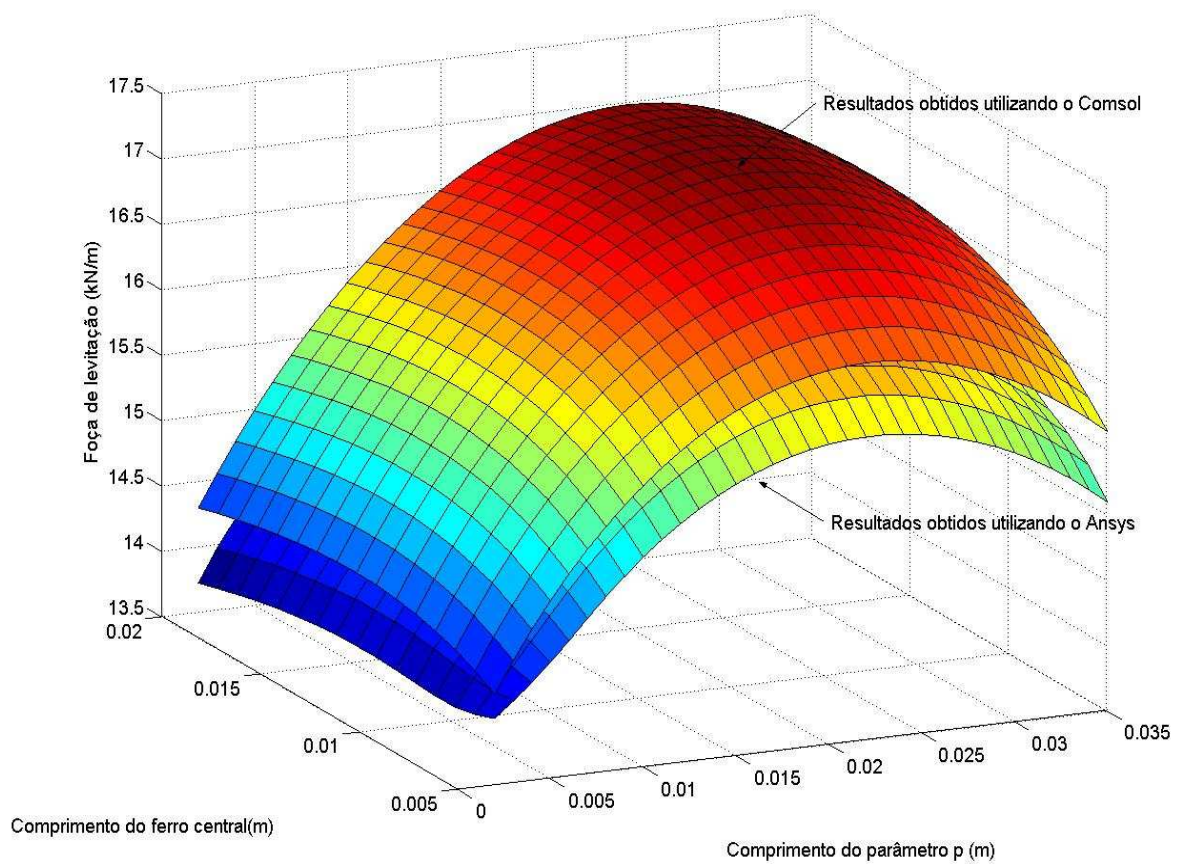


FIGURA 10 - COMPARAÇÃO DA FORÇA DE LEVITAÇÃO UTILIZANDO OS SOFTWARES ANSYS E COMSOL.

A partir da análise da figura 10, chegou-se às seguintes dimensões ótimas (já adaptadas para valores comerciais), para o trilho:

- $X_{fe} = 1 / 2''$ e
- $P = 1''$.

Pode-se observar que os dois gráficos da figura 10 se comportam da mesma maneira, a não ser por uma pequena variação quase constante da força de levitação. As figuras 11 e 12 mostram as configurações ótimas encontradas durante as simulações no Comsol e Ansys respectivamente.

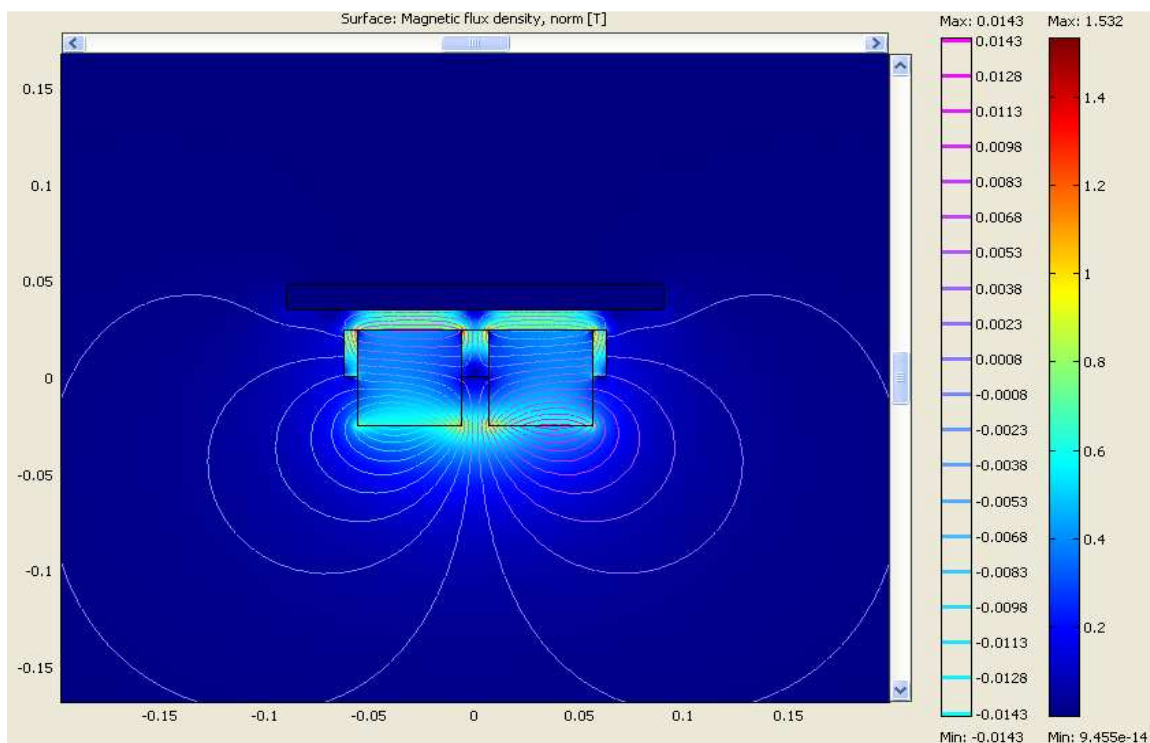


FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO ÓTIMA ENCONTRADA NO COMSOL PARA O MODELO DE TRILHO ADOTADO.

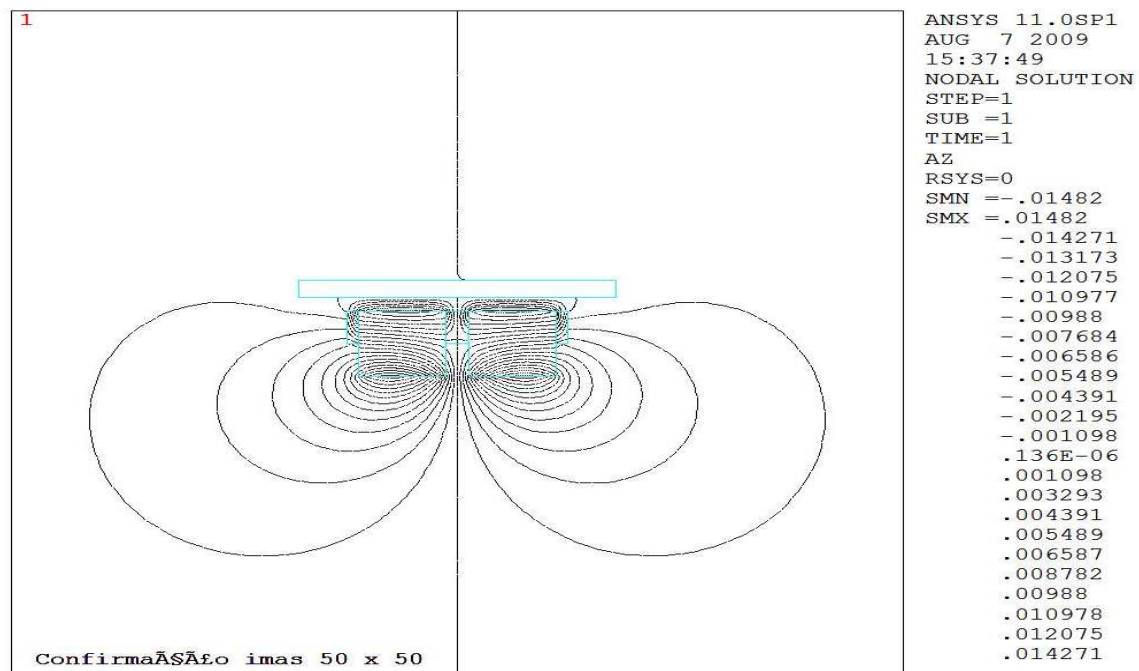


FIGURA 12 – CONFIGURAÇÃO ÓTIMA ENCONTRADA NO ANSYS PARA O MODELO DE TRILHO ADOTADO.

3.3-Comparação dos resultados de densidade de fluxo simulados com resultados experimentais

Com as dimensões ótimas para o aço do trilho magnético, já determinadas pelas simulações, foi realizada a montagem deste protótipo, que pode ser visto na figura 13. Para a validação destas simulações, foram realizadas comparações entre as mesmas, para diferentes alturas, de densidade de campo magnético (B_y) na direção axial, com medidas realizadas no trilho.



FIGURA 13- MODELO CONCENTRADOR DE FLUXO ÓTIMO DETERMINADO PELAS SIMULAÇÕES.

3.3.1-Procedimentos adotados para a realização das medidas de densidade de campo no modelo experimental.

As medidas de densidade de campo na direção axial do trilho apresentado na figura 13 foram realizadas manualmente com o auxílio de um gaussímetro modelo 5080, da marca F.W.BELL, mostrado na figura 14.



FIGURA 14 -GAUSSÍMETRO UTILIZADO NAS MEDIDAS DE DENSIDADE DE CAMPO.

Este conta com as seguintes especificações:

I. Especificações do gaussímetro

TABELA 2 - ESCALAS DO GAUSSIMETRO MODELO 5080.

ESCALAS	
GAUSS	TESLA
300 G	30 mT
3 kG	300 mT
30 kG	3 T

TABELA 3 - RESOLUCAO DO GAUSSÍMETRO MODELO 5080.

RESOLUÇÃO	
GAUSS	TESLA
0,1 G	0,01 mT
1 G	0,1 mT
10 G	1 mT

Acurácia (para leituras no display, já incluindo a ponteira)

Modo dc: ± 1 % da leitura, ± 3 casas

Varição de acurácia com a temperatura (sem incluir a ponteira): $\pm 0,02$ % / °C

II. Especificações da ponteira de prova

Número do modelo: STD58-0404

Escala de densidade de fluxo: 0 à 3T (ou 0 à 30kG)

Varição da acurácia com a temperatura : $-0,05$ % / °C

Varição da medida com a temperatura: $\pm 30\mu T$ / °C

Para a medição de densidade de campo no modelo foram adotados os seguintes procedimentos:

1. Com o auxílio de um papel milimetrado foi estabelecida na metade do imã uma referência para iniciarmos as medições.
2. As medidas foram realizadas na face do modelo com um passo de 1,5 mm a partir da referência até as duas extremidades.
3. Os passos 1 e 2 foram repetidos para as alturas de 4mm, 8mm e 12mm, onde estas medições só foram possíveis com a utilização de placas, com as alturas mencionadas, de um material não magnético denominado G-10.

3.3.2-Resultados Obtidos

Após realizar essas medidas, a figura 16 mostra a comparação dos perfis de densidade de campo na direção axial para o modelo real e o simulado. Assim, pode-se concluir que o perfil de campo medido ficou muito próximo ao simulado, desta forma validando as simulações do trilha utilizado neste trabalho.

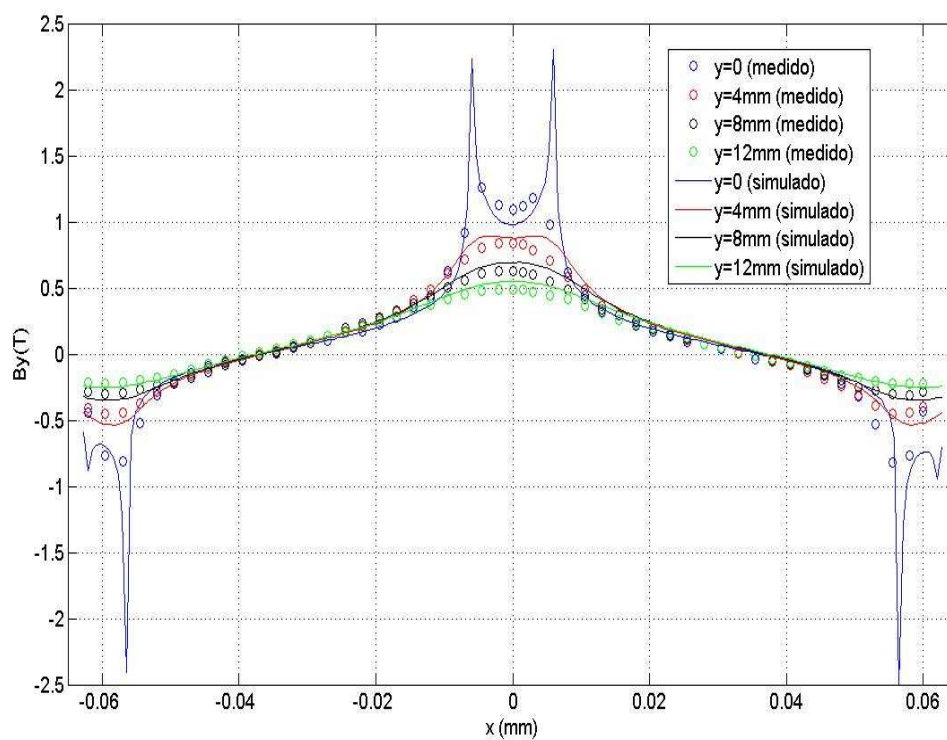


FIGURA 15 - COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE DENSIDADE DE CAMPO NA DIREÇÃO AXIAL, SIMULADAS COM O COMSOL E MEDIDA.

Capítulo 4

Substituição dos imãs por eletroímãs em um modelo concentrador de fluxo

O presente capítulo irá descrever um estudo comparativo entre a configuração de trilho formada por imãs permanentes implementada e um trilho composto por um eletroímã. Este estudo é justificado devido ao custo dos imãs permanentes.

4.1 - Estrutura constituída por dois imãs permanentes magnetizados na direção horizontal em sentidos contrários.

Primeiramente, foi montada no software Comsol a configuração mostrada na figura 17, constituída de:

- Três barras de aço SAE-1010, sendo dois destes de dimensões 8 mm x 50 mm e um 16 mm x 50mm.
- Dois imãs magnetizados na direção horizontal em sentidos contrários de dimensões 50 mm x 50mm.
- Um supercondutor de dimensões 180 mm x 13 mm.

Assim, para esta configuração de trilho foi encontrada uma força de levitação de aproximadamente:

$$F_y = 13,86 \text{ kN/m}$$

A densidade de campo magnético e as linhas de fluxo na estrutura podem ser vistas na figura 18.

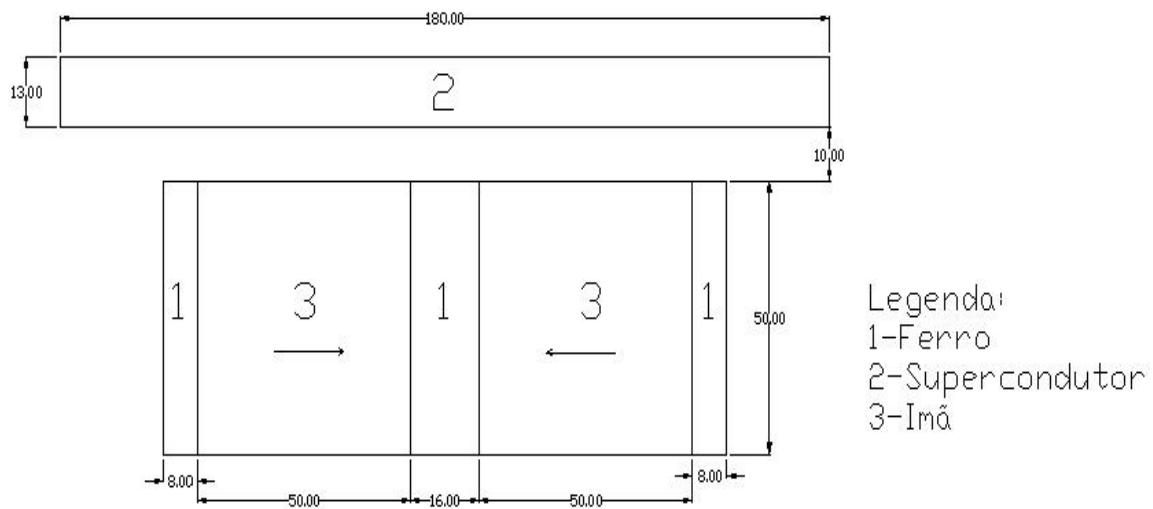


FIGURA 16 - CONFIGURAÇÃO COM IMÃS MAGNETIZADOS EM SENTIDOS CONTRÁRIOS.

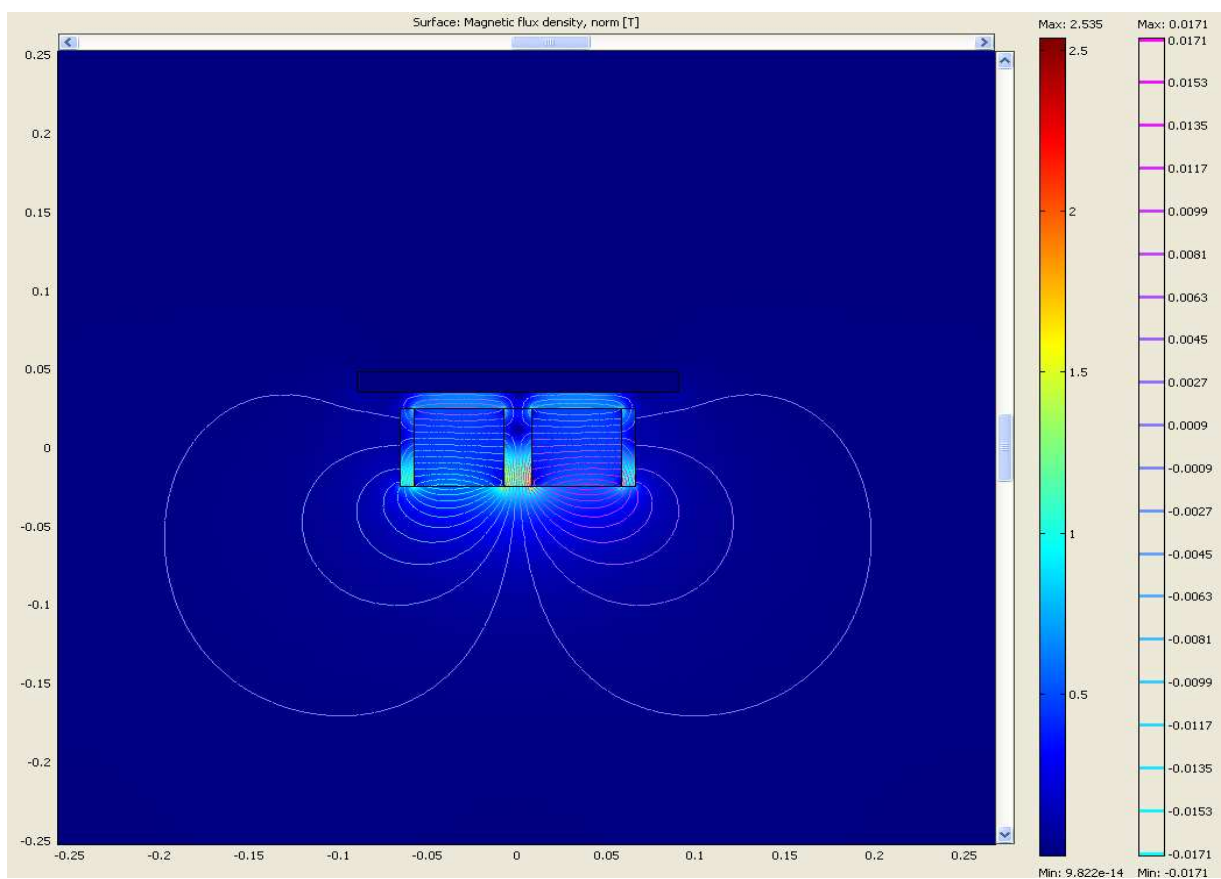
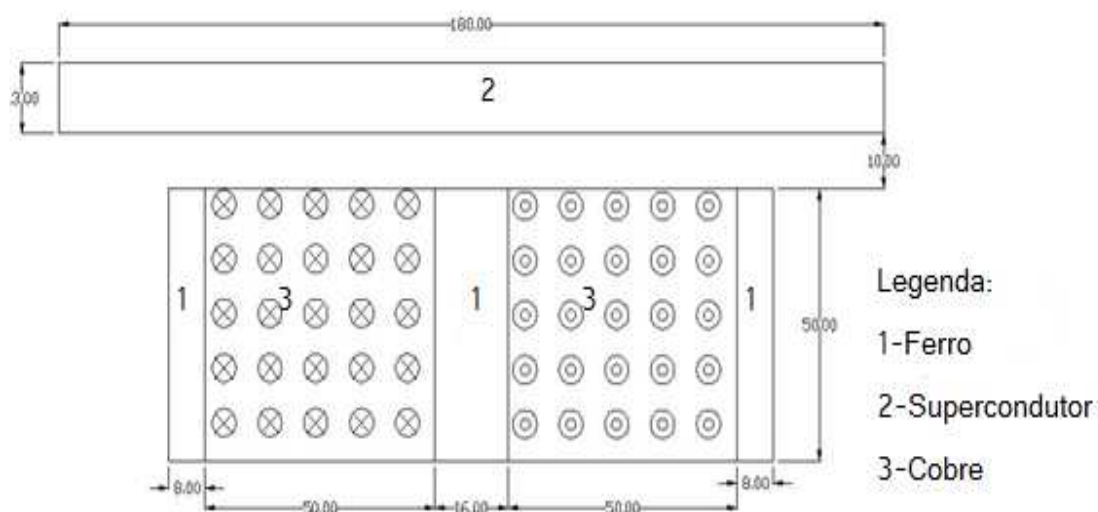


FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DA DENSIDADE DE CAMPO E LINHAS DE FLUXO GERADAS PELO PROGRAMA, REFERENTES À FIGURA 17.

4.2-Estrutura formada por um eletroímã enrolado ao redor do ferro central com $J=18 \text{ A/mm}^2$

- Três barras de aço 1010, sendo dois destes de dimensões 8 mm x 50 mm e um 16 mm x 50mm.
- Um eletroímã enrolado ao redor do ferro central. A área na qual o eletroímã é enrolado é a mesma da figura 17, ou seja, um quadrado com dimensões 50 mm x 50 mm.
- Um supercondutor de dimensões 180 mm x 13 mm.



² Este valor já está incluído o valor de importação de cerca de 30%.

Para efeito de comparação, esta configuração foi montada no programa de simulação e foi aplicada uma densidade de corrente na bobina, a qual gerava uma força de levitação próxima da obtida na seção 4.1 ($F_y = 13,86 \text{ kN/m}$). Assim, para uma densidade de corrente de 18 A/mm^2 , chegou-se a uma força de levitação de:

$$F_y = 13,14 \text{ kN/m}$$

A partir do resultado acima chegou-se a um equivalente bem próximo daqueles obtidos com os ímãs permanentes, com a vantagem da utilização de condutores ao invés de ímãs permanentes. A configuração gerada pelo programa pode ser vista na figura 20. É importante observar que esta densidade de corrente é 4,5 vezes maior que a corrente máxima sem ventilação para o cobre, porém o trilho seria ligado de forma intermitente apenas por alguns segundos na passagem do veículo MagLev.

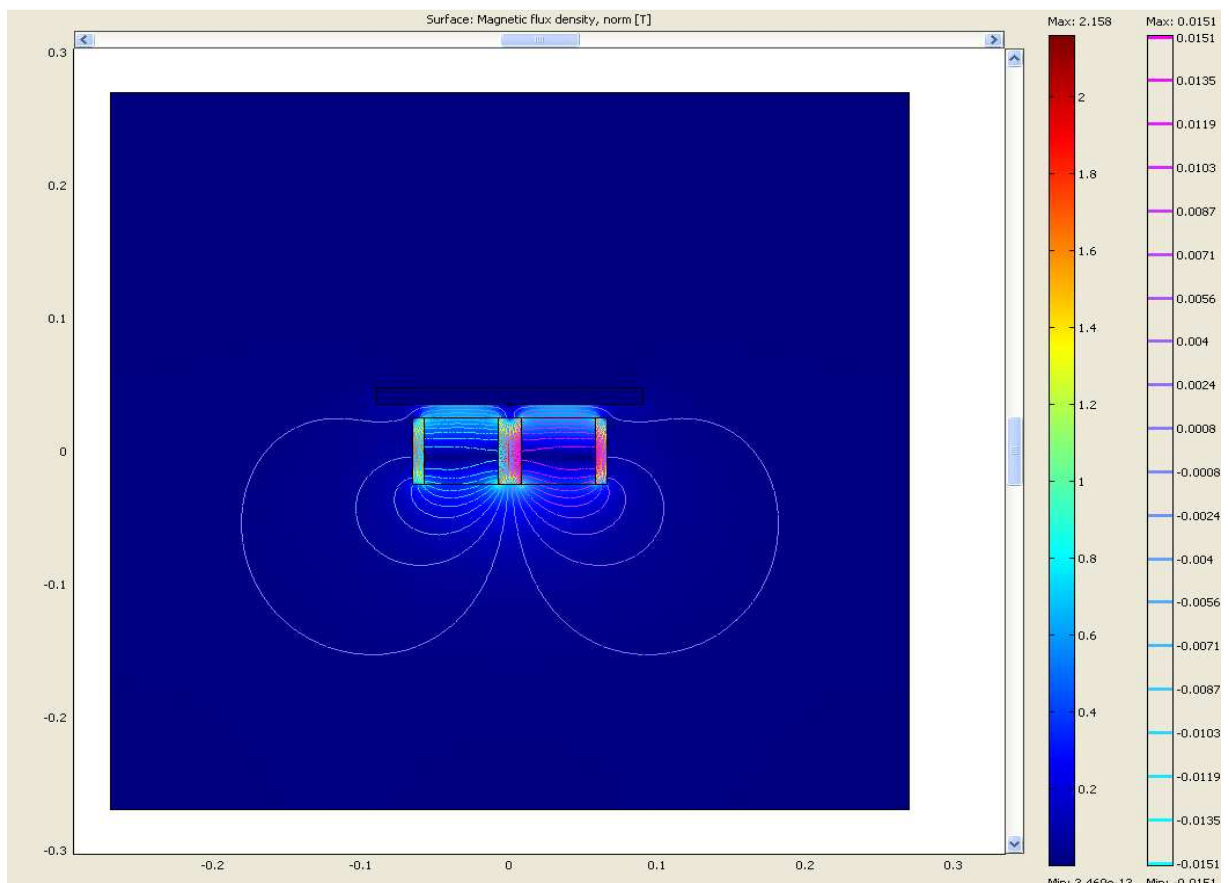


FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO DA DENSIDADE DE CAMPO E LINHAS DE FLUXO GERADAS PELO PROGRAMA, REFENTES À FIGURA 19.

Outra solução aparentemente viável seria colocar duas bobinas de modo que estas produzissem campos na direção horizontal e em sentidos contrários, iguais as dos ímãs. A próxima seção irá tratar deste caso.

4.3- Estrutura formada por dois eletroímãs com fluxos na direção horizontal e em sentidos contrários.

O esquema desta configuração pode ser vista na figura 21, onde esta é formada por:

- Três barras de aço SAE-1010, sendo dois destes de dimensões 8 mm x 50 mm e um 16 mm x 50mm.
- Dois eletroímãs, onde suas dimensões serão variadas para chegarmos a uma força ótima. O espaço entre cada eletroímã é preenchido por ferro.
- Um supercondutor de dimensões 180 mm x 13 mm.

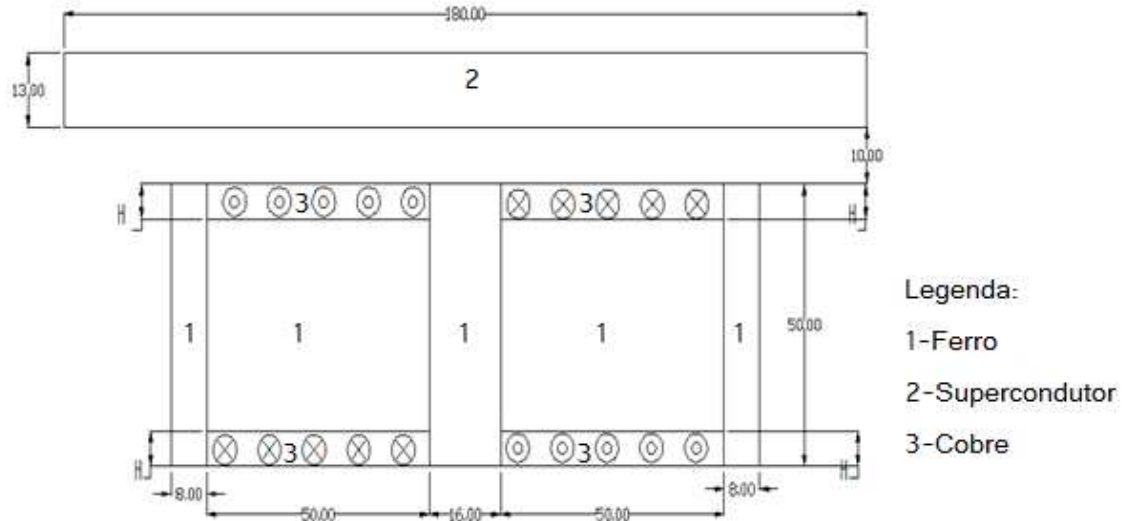


FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO COM DOIS ELETROÍMÃS PRODUZINDO FLUXOS NA DIREÇÃO HORIZONTAL E EM SENTIDOS CONTRÁRIOS.

O parâmetro H, que representa o tamanho da bobina, foi o parâmetro variado no programa, onde este foi simulado de 5 mm até 20 mm. Foram aplicadas nas bobinas dois

valores de densidades de corrente, 10 A/mm^2 e 18 A/mm^2 . O resultado pode ser observado na figura 22.

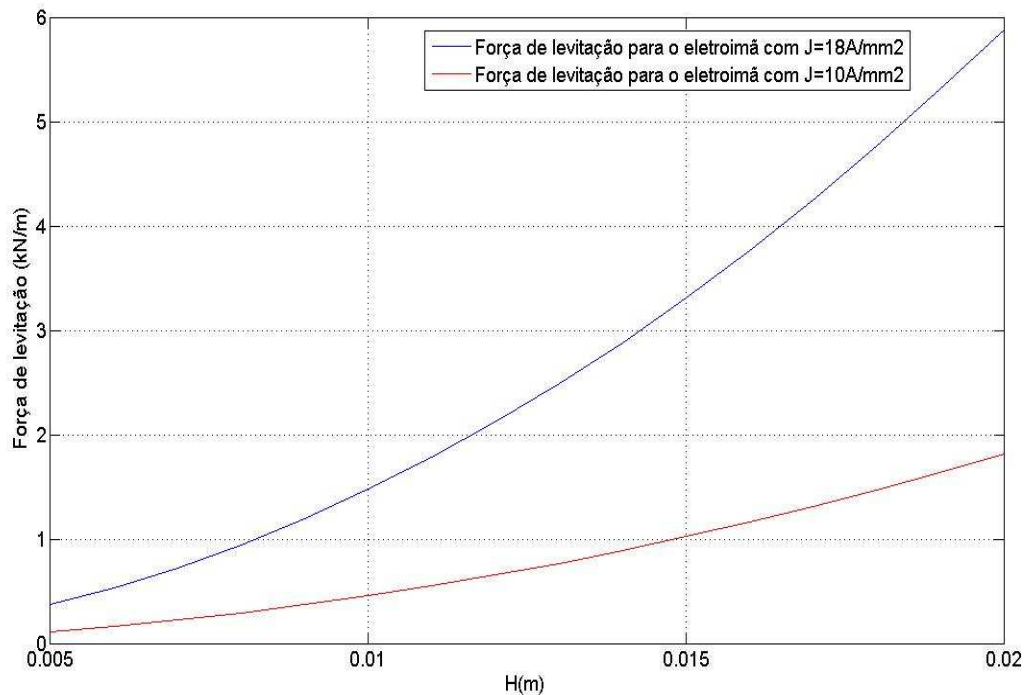


FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO DA FORÇA DE LEVITAÇÃO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DOS ELETROÍMÃS.

Assim pelos gráficos da figura 22, a maior força que é possível obter é para $H=20\text{mm}$ com uma densidade de 18 A/mm^2 , onde teremos um valor inferior a 6 kN/m .

4.4-Estrutura formada por um eletroímã enrolado ao redor do ferro central com $J=10 \text{ A/mm}^2$

Para a substituição dos ímãs permanentes por eletroímãs fica evidente a escolha da configuração formada com apenas uma bobina enrolada no ferro central, pois esta gera uma força de levitação bem próxima daquela gerada pelos ímãs, ao passo que a configuração formada por dois eletroímãs gera uma força bem menor. Todavia, a aplicação de uma densidade de corrente de 18 A/mm^2 na configuração vista na seção 3 gera um aquecimento elevado, com isso uma opção viável para a resolução deste problema seria fixar a densidade

de corrente em 10 A/mm^2 e variar apenas a altura da bobina mantendo sua largura constante. O gráfico da figura 23 mostra uma curva que relaciona a altura da bobina e a força de levitação.

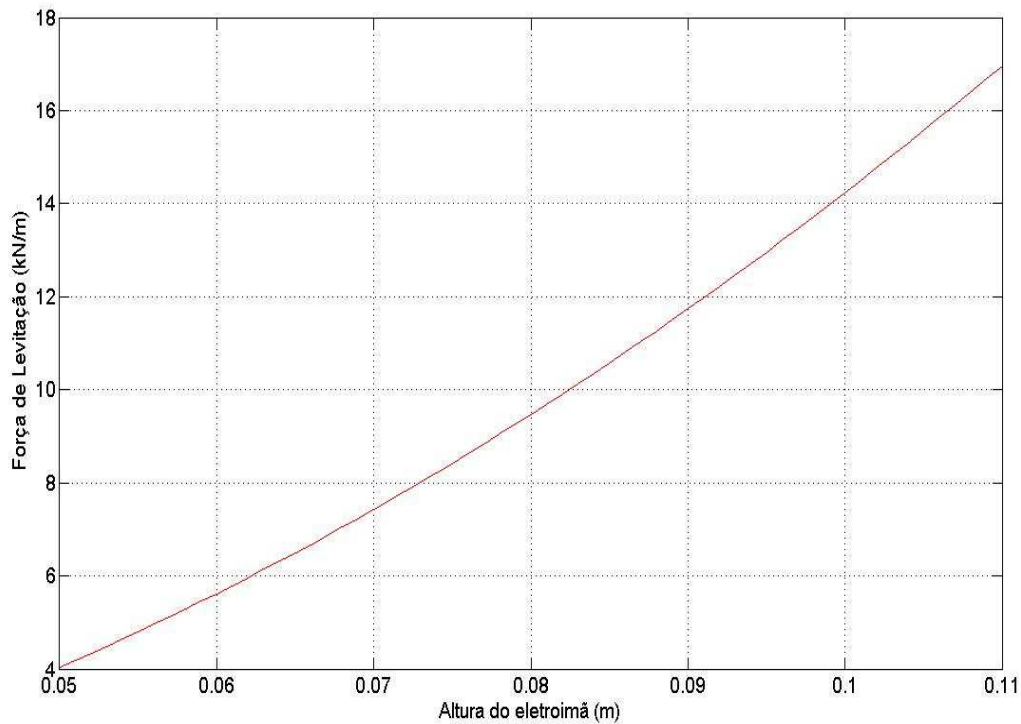


FIGURA 22 - REPRESENTAÇÃO DA FORÇA DE LEVITAÇÃO EM FUNÇÃO DA ALTURA DO ELETROÍMÃ.

Pode-se perceber que para uma altura de 0,1m (100 mm) obtêm-se uma força de levitação da ordem de 14 kN/m, mesma força obtida pelo conjunto de ímãs descritos na seção 4.1, desta forma a dimensão ideal para o eletroímã seria de 50mm (largura) x 100mm (altura). Uma importante aplicação da substituição dos ímãs por eletroímãs seria em equipamentos de mudança de via [7].

A validação do resultado da figura 23 pode ser realizada através de um estudo envolvendo a variação dos parâmetros H (altura do eletroímã), J (densidade de corrente) e F_y (força de levitação) da figura 19. Desta forma obtendo uma família de curvas, as quais podem ser vistas na figura 24 e um gráfico em três dimensões envolvendo essas grandezas, o qual é observado na figura 25.

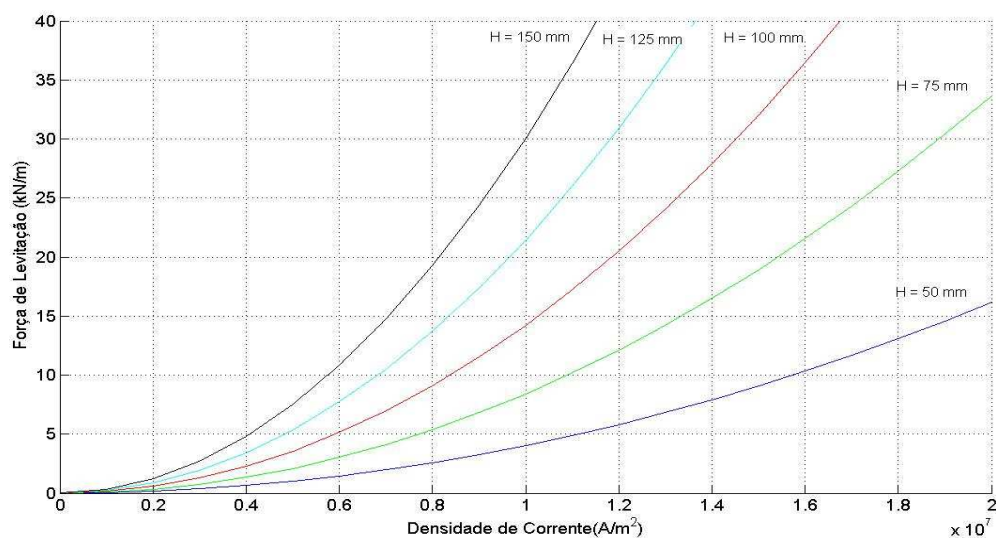


FIGURA 23 - CURVAS SIMULADAS NO COMSOL, QUE RELACIONAM ALTURA DO ELETROÍMÃ, DENSIDADE DE CORRENTE E FORÇA DE LEVITAÇÃO DA FIGURA 19.

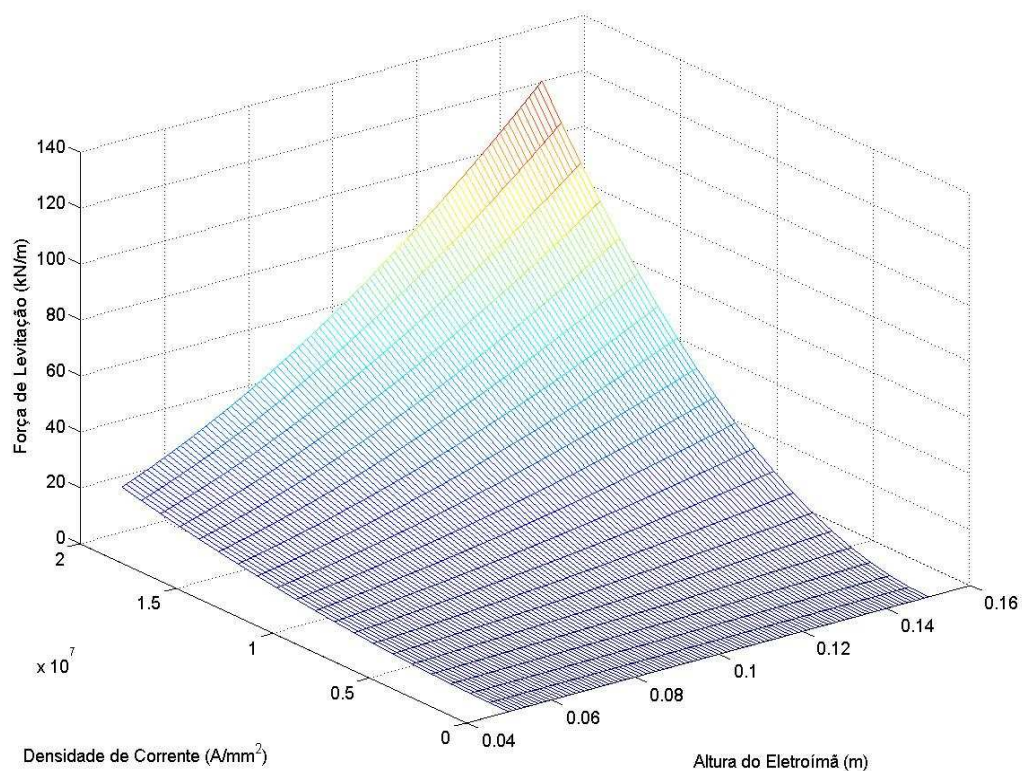


FIGURA 24 – CURVAS, EM TRÊS DIMENSÕES, SIMULADAS NO COMSOL, QUE RELACIONAM ALTURA DO ELETROÍMÃ, DENSIDADE DE CORRENTE E FORÇA DE LEVITAÇÃO DA FIGURA 19.

Assim, pode-se observar na figura 24 que para $J=10 \text{ A/mm}^2$ e $H=100\text{mm}$ a força de levitação corresponde aos 14kN/m encontrados na figura 23.

4.5 – Análise Financeira

A avaliação do custo de material da configuração formada por ímãs permanentes e eletroímãs pode ser vista na tabela 4.

Nesta avaliação, não foi levado em conta o preço das barras de ferro utilizadas em ambos os modelos devido ao baixo custo relativo deste material. Assim, o custo do eletroímã ficou reduzido ao preço do cobre necessário para os enrolamentos.

TABELA 4 - COMPARAÇÃO DO CUSTO DA CONFIGURAÇÃO FORMADA POR ÍMÃS PERMANENTES E ELETROÍMÃS.

	Dimensões (mm)	Volume (dm^3)	Densidade (kg/dm^3)	Massa (kg)	Preço (US\$/kg)	Custo Final (US\$)
Ímã	50 x 50 x 100	0,25	7,45	1,86	25,16	46,87
Eletroímã	50 x 100 x 100	0,5	8,92 ^(*)	4,46	6,00 ^(**)	26,76

(*) densidade do cobre (**) preço do cobre em Agosto de 2009

Pode-se observar pela tabela 4 que a configuração com eletroímã é 43% mais barata que o modelo do trilho formado por ímãs.

Conclui-se que a configuração formada por eletroímãs torna-se viável economicamente, não apresentando o problema de fornecimento de ímãs por empresas estrangeiras. Em contrapartida, nos eletroímãs há consumo de energia para a produção da densidade de campo magnético.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1-Conclusão

Neste trabalho foi possível determinar a configuração ótima, formada por ímãs e barras de ferro, para um modelo de trilho utilizado em veículo MagLev, a qual foi validada por dois softwares que utilizam método dos elementos finitos para o cálculo de campos e por um protótipo de trilho montado no LASUP.

A partir desta configuração ótima, os ímãs foram substituídos por eletroímãs de mesma área e assim investigou-se que estes não produziam a mesma força de levitação do caso anterior. Assim, foi realizado um estudo envolvendo a variação da altura do eletroímã, mostrado na figura 19, mantendo a densidade de corrente fixa no eletroímã com valor de 10 A/mm^2 , logo chegou-se a conclusão que para a produção da mesma força de levitação dos ímãs seria necessário dobrar o tamanho do eletroímã.

Finalmente, para comprovar os resultados obtidos da força de levitação *versus* altura do eletroímã, foram realizadas simulações envolvendo diversas alturas para o eletroímã variando a densidade de corrente e assim obtendo a força de levitação. Com isso, pode-se validar o modelo de trilho formado pelos eletroímãs.

5.2-Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se validar as simulações da configuração de trilho formada por eletroímãs, através da montagem de um protótipo e

assim comparando medidas de densidade de campo na direção axial do modelo simulado e do modelo real.

Bibliografia

- [1] - R.M.Stephan e E.G.David: *Maglev Cobra: Um veículo para transporte urbano energeticamente eficiente e ambientalmente correto*, Disponível em <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/60ra/textos/CO-RichardStephan.pdf>> Último acesso: 13 Julho de 2009.
- [2] – F.C. Moon: *Superconducting Levitation*, Ed.John Wiley& Sons,1994.
- [3] – L.H.Vlack : *Princípios de Ciência dos Materiais* , Ed. Edgar Bluncher, 1992.
- [4] - A. C. Rose-Innes e E. H. Rhoderick: *Introduction to Superconductivity*, Ed.Pergamon Press, Revised ed. 2 (1994).
- [5]-Comsol Multiphysics : *AC/DC Module User's Guide*, Version 3.3, August 2006.
- [6]- S.Moaveni: *Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys*, Ed.Prentice-Hall,1999.
- [7]- C.Beyer, O.Haas, L.Kuehn e L.Schultz: A Turnout Switch for a Superconductively Levitated Linear Transport System, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, no. 2, June 2007.

Anexo 1

Programa desenvolvido no software Comsol para a determinação da força ótima na configuração inicial mostrada na figura 8.

```
clear all
cd E:\comsol_modelos\Simulacoes_trilho2\Trilho_50x50_Variando_Xfe

for p = 2:1:35

    for i= 5:1:20

        Ygap=p/1000
        Xfe=i/1000

        % Constants
        fem.const = {'Xfe',Xfe, ...
            'Yfe','50/1000', ...
            'g','10/1000',...
            'p',p,...
            'mu0','4*pi*1E-7',...
            'Ygap',Ygap};

        % Geometry
        g1=rect2('Xfe/2','Yfe-Ygap','base','corner','pos',{'0',(-Yfe/2)+Ygap},'rot','0','const',fem.const);
        g2=square2('0.05','base','corner','pos',{'Xfe/2',(-Yfe/2)},'rot','0','const',fem.const);
        g3=rect2('Xfe/2','Yfe-Ygap','base','corner','pos',{'Xfe/2+0.05',(-Yfe/2)+Ygap},'rot','0','const',fem.const);
        %Supercondutor
        g4=rect2('90/1000','13/1000','base','corner','pos',{'0','Yfe/2+g'},'rot','0','const',fem.const);

        g5=mirror(g1,[0,0],[1,0]);
```

```

g6=mirror(g2,[0,0],[1,0]);
g7=mirror(g3,[0,0],[1,0]);
g8=mirror(g4,[0,0],[1,0]);
g9=geomcomp({g1,g5},'ns',{'g1','g5'},'sf','g1+g5','edge','none');
g10=geomdel(g9);
g11=geomcomp({g3,g7,g10},'ns',{'g3','g7','g10'},'sf','g3+g7+g10','edge','none');
g12=geomcomp({g4,g8},'ns',{'g4','g8'},'sf','g4+g8','edge','none');
g13=geomdel(g12);
g16=square2('540/1000','base','center','pos',{ '0','0'},'rot','0');

```

% Geometry objects

```

clear s
s.objs={g2,g6,g11,g13,g16};
s.name={'SQ1','CO2','CO5','CO3','SQ2'};
s.tags={'g2','g6','g11','g13','g16'};

```

```

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

```

% Functions

```

clear fcns
fcns{1}.type='interp';
fcns{1}.name='curva';
fcns{1}.method='cubic';
fcns{1}.extmethod='extrap';
fcns{1}.x={'0.00000000','90.0000000','270.000000','318.250000', ...
'384.500000','479.500000','608.562000','755.437000','939.185000', ...
'1188.93000','1407.93000','2077.31000','3117.93000','3969.37000', ...
'4843.66000','6081.34000','8581.09000','11066.4000','14985.7000', ...
'33003.3000','59203.3000','93214.9000','118884.000','163558.000', ...
'220788.000','373973.000','692281.000'};
fcns{1}.data={'0.00000000','0.50000000','1.00000000','1.10000000', ...
'1.20000000','1.30000000','1.38750000','1.45000000','1.50000000', ...
'1.54500000','1.57500000','1.62750000','1.67375000','1.70225000', ...
'1.72750000','1.75825000','1.80875000','1.85000000','1.90250000', ...
'2.05000000','2.15000000','2.22625000','2.27000000','2.33375000', ...
'2.40750000','2.60000000','3.00000000'};

```



```

'hmaxsub',[1,0.01,2,0.0005,3,0.001,4,0.001,5,0.001,6,0.001,7,0.001]);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'solcomp',{'Az'}, ...
    'outcomp',{'Az'});

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'tridata',{'normB_emqa','cont','internal','unit','T'}, ...
    'trimap','jet(1024)', ...
    'title','Surface: Magnetic flux density, norm [T]', ...
    'axis',[-0.3483522719067912,0.3483522719067912,-0.29700001180171964,0.29700001180171964,-
1,1]);

F = cemforce(fem,'Wm_emqa','dl',2) %calculo da força na direção x e y
Fy=F(2,1)/1000 %pegando so a força em y
m(i-4,p-1)=Fy
mxfe(i-4)=Xfe
myfe(p-1)=Ygap

end
end

save m.m m -ascii
save mxfe.m mxfe -ascii
save myfe.m myfe -ascii

```

Anexo 2

Programa desenvolvido no software Ansys para a determinação da força ótima na configuração inicial mostrada na figura 8.

```
/PREP7
/TITLE, Confirmação imas 50 x 50
ANTYPE,STATIC          ! Análise Magnetostática
ET,1,PLANE13
EMUNIT,MKS             ! MKS UNITS
!parâmetros
Xima=50/1000
Yfe=50/1000
!Xfe=12.7/1000
!p=10/1000
gap=10/1000
Xsuper=180/1000
Ysuper=13/1000
xcaixa=800/1000
ycaixa=800/1000
Xfeini=5                !entre com valor inteiro
Xfefin=20               !ira ter 16 colunas a matriz, que esta dentro do
limite
pini=2
pfin=35                 !ira ter 34 linhas

*dim,result,array,pfin-pini+1,Xfefin-Xfeini+1,0
*dim,XFERRO,array,Xfefin-Xfeini+1,1,0
```

*dim,YFERRO,array,pfin-pini+1,1,0

*do,var1,pini,pfin,1

p=var1/1000

*do,var,Xfeini,Xfein,1

Xfe=var/1000

!key points

k,1,Xfe/2,-Yfe/2

K,2,Xfe/2,-Yfe/2+p

k,3,Xfe/2,Yfe/2

k,4,Xfe/2+Xima,Yfe/2

k,5,Xfe/2+Xima,-Yfe/2+p

k,6,Xfe/2+Xima,-Yfe/2

K,7,Xfe/2+Xima+Xfe/2,Yfe/2

K,8,Xfe/2+Xima+Xfe/2,-Yfe/2+p

k,9,-Xfe/2,-Yfe/2

k,10,-Xfe/2,-Yfe/2+p

k,11,-Xfe/2,Yfe/2

k,12,-Xfe/2-Xima,Yfe/2

k,13,-Xfe/2-Xima,-Yfe/2+p

k,14,-Xfe/2-Xima,-Yfe/2

k,15,-Xfe/2-Xima-Xfe/2,Yfe/2

k,16,-Xfe/2-Xima-Xfe/2,-Yfe/2+p

!superconductor

K,17,-Xsuper/2,Yfe/2+gap

K,18,Xsuper/2,Yfe/2+gap

K,19,Xsuper/2,Yfe/2+gap+Ysuper

K,20,-Xsuper/2,Yfe/2+gap+Ysuper

!caixa externa

k,21,xcaixa/2,ycaixa/2

k,22,xcaixa/2,-ycaixa/2

k,23,-xcaixa/2,-ycaixa/2

k,24,-xcaixa/2,ycaixa/2

!Áreas a partir dos keypoints

A,1,2,3,4,5,6

A,9,10,11,12,13,14

A,2,3,11,10

A,13,12,15,16

A,5,4,7,8

A,17,18,19,20

A,21,22,23,24

aovlap,all

!sobrepõe áreas

numcmp,all

!comprime numeração

!definição de materiais

MP,MURX,1,1.005

! permanent magnet Relative Permeability

MP,MURY,1,1

! permanent magnet Relative Permeability

MP,MGY,1,0

! MGXX - força coercitiva

MP,MGXX,1,891267

! MGYY

MP,MURX,2,1.005

! permanent magnet Relative Permeability

MP,MURY,2,1

! permanent magnet Relative Permeability

MP,MGY,2,0

! MGXX - força coercitiva

MP,MGXX,2,-891267

! MGYY

MP,MURX,3,1	! AIR Relative Permeability
MP,MURY,3,1	! AIR Relative Permeability
MP,MURX,4,0.000000001	!permeabilidade do supercondutor
MP,MURY,4,0.000000001	
MAT,5,	
MPREAD,'emagSa1010','SI_MPL','C:\Program Files\Ansys	
Inc\v100\ANSYS\matlib\,LIB	
!atribuição de materiais	
ASEL,S,,,2	
AATT,1	! Atribui como ímã 1
!atribuição de materiais	
ASEL,S,,,1	
AATT,2	! Atribui como ímã 2
ASEL,S,,,3	
AATT,5	!Atribui ferro
ASEL,S,,,4	
AATT,5	!Atribui ferro
ASEL,S,,,5	
AATT,5	!Atribui ferro
ASEL,S,,,6	
AATT,4	! Atribui como SUPERCONDUTOR
ASEL,S,,,7	
AATT,3	! Atribui como AR
Allsel,all	

!divide as linhas para criar as malhas

!VERTICAIS

LESIZE,16, , ,30, , , ,1
LESIZE,10, , ,30, , , ,1
LESIZE,8, , ,30, , , ,1
LESIZE,2, , ,30, , , ,1
LESIZE,4, , ,30, , , ,1
LESIZE,19, , ,30, , , ,1

LESIZE,11, , ,10, , , ,1
LESIZE,7, , ,10, , , ,1
LESIZE,1, , ,10, , , ,1
LESIZE,5, , ,10, , , ,1

LESIZE,24, , ,20, , , ,1
LESIZE,22, , ,20, , , ,1

!HORIZONTAIS

LESIZE,15, , ,10, , , ,1
LESIZE,17, , ,10, , , ,1
LESIZE,18, , ,10, , , ,1
LESIZE,20, , ,10, , , ,1

LESIZE,9, , ,40, , , ,1
LESIZE,12, , ,40, , , ,1
LESIZE,3, , ,40, , , ,1
LESIZE,6, , ,40, , , ,1

LESIZE,13, , ,20, , , ,1

LESIZE,14, , ,20, , , ,1

LESIZE,21, , ,80, , , ,1

LESIZE,23, , ,80, , , ,1

*do,x,25,28,1

!caixa externa

LESIZE,x, , ,40, , , ,1

*enddo

MSHAPE,1,2D

MSHKEY,0

amesh,1,7,1

!Seleciona o material para cálculo da força de levitação

ESEL,S,MAT,4

CM,super,ELEM

!cria componente

FMAGBC,'super'

!aplica condições de contorno

ALLSEL,ALL

!***** define a região de fronteira da caixa*****

!Atribui potencial vetor = zero na fronteira externa

NSEL,S,LOC,X,xcaixa/2

! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO

NSEL,a,LOC,X,-xcaixa/2

! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO

NSEL,a,LOC,y,ycaixa/2

! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO

NSEL,a,LOC,y,-ycaixa/2

! SELEÇÃO DO CONTORNO EXTERNO

```

D,ALL,AZ,0
Allsel,ALL

!SOLUÇÃO
/SOLU
/STAT,SOLU
SOLVE
/post1
fmagsum,'super'

*GET,FVW,SSUM, ,ITEM,FVW_Y
result(var1-pini+1,var-Xfeini+1)=FVW      !pelo trabalho virtual
Xferro(var-Xfeini+1,1)=Xfe              !pelo trabalho virtual
Yferro(var1-pini+1,1)=p                  !pelo trabalho virtual
/prep7
aclear,1,7,1
adele,1,7,1,1
reset
SAVE,'teste','db','E:\Daniel\'
*enddo
*enddo
*create,ansuitmp
*CFOPEN,result,txt,C:\temp
*VWRITE,result(1,1),result(1,2),result(1,3),result(1,4),result(1,5),result(1,6),result(
1,7),result(1,8),result(1,9),result(1,10),result(1,11),result(1,12),result(1,13),result(1,14),resu
lt(1,15),result(1,16)
      (1X,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,'
',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,' ',F20.12,'
',F20.12)
*CFCLOSE
*end

```

```
/input,ansuitmp
*create,ansuitmp
*CFOPEN,Xferro,txt,C:\temp
*VWRITE,Xferro(1,1),
  (1X,' ',F20.12)
*CFCLOS
*end
/input,ansuitmp
```

```
*create,ansuitmp
*CFOPEN,Yferro,txt,C:\temp
*VWRITE,Yferro(1,1),
  (1X,' ',F20.12)
*CFCLOS
*end
/input,ansuitmp
```