



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**INVESTIGAÇÃO DA MELHOR CONFIGURAÇÃO DO
SISTEMA DE LEVITAÇÃO DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA**

GUSTHAVO GONÇALVES FARVES

RIO DE JANEIRO, R. J. - BRASIL

JANEIRO 2009

INVESTIGAÇÃO DA MELHOR CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE LEVITAÇÃO DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA

GUSTHAVO GONÇALVES FARVES

“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:

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

Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.
(Co-Orientador)

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.

Eduardo Gonçalves David, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, R. J. - BRASIL

JANEIRO 2009

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela sua misericórdia, sua maravilhosa graça e sua mão mantenedora em todos os momentos e sua ação em minha vida.

À minha família, meus pais, Sergio e Célia, e meus avós, pela compreensão, sustento e incentivo durante todos os anos de minha vida e aos entes queridos de quem tantas vezes me privei da presença em detrimento aos estudos.

Aos professores, técnicos e servidores que contribuíram para meu amadurecimento e formação tanto profissional quanto pessoal, particularmente ao Ocione Machado, ao Guilherme Sotelo, ao professor Richard Magdalena Stephan, ao técnico Sérgio Santos e ao pesquisador do CEPEL Alexander Polasek.

Aos meus companheiros nessa árdua peleja de uma fase inesquecível de minha jornada da vida, ao partilhar o sofrimento, as angústias, mas também os risos e alegrias.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Como parte dos estudos para a implantação do sistema de transporte por levitação magnética (MagLev), o Laboratório de Aplicações de Supercondutores da Universidade Federal do Rio de Janeiro está construindo um protótipo em escala real com 114 metros de comprimento.

Este trabalho tem como objetivo a avaliação de configurações de ímãs, concentradores de fluxo magnético e blocos supercondutores que otimizem a levitação magnética supercondutora para a implementação do sistema MagLev-Cobra. Para tal, utilizou-se o método de elementos finitos para a determinação da dimensão do ferro central do concentrador que maximizaria a força de levitação entre o supercondutor e o trilho. Posteriormente, realizaram-se medições de densidade de fluxo magnético e ensaios de força de levitação utilizando os procedimentos de ‘zero field cooling’ e ‘field cooling’, em diversas posições. Foram usadas nestes procedimentos duas unidades supercondutoras diferentes: uma amostra em forma de paralelepípedo de YBCO com três sementes e um criostato com um arranjo de 24 amostras similares a esta.

SUMÁRIO

<u>RESUMO</u>	iv
<u>SUMÁRIO</u>	v
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	vii
<u>LISTA DE TABELAS</u>	ix
<u>CAPÍTULO 1</u>	1
<u>INTRODUÇÃO</u>	1
<u>1.1. Motivação</u>	1
<u>1.2. Projeto MagLev-Cobra</u>	1
<u>1.2.1 Sistema de Levitação Magnética</u>	1
<u>1.2.2 Sistema de Tração</u>	2
<u>1.3. Objetivo do Trabalho</u>	2
<u>1.4. Organização do Projeto Final</u>	2
<u>CAPÍTULO 2</u>	3
<u>SIMULAÇÃO DO TRILHO MAGNÉTICO</u>	3
<u>2.1. Introdução</u>	3
<u>2.2. Método de Elementos Finitos</u>	3
<u>2.2.1. Aplicações para o MEF</u>	3
<u>2.2.2. Fundamentos do MEF</u>	3
<u>2.3. Programa Utilizado</u>	4
<u>2.4. Concentrador Simulado</u>	4
<u>2.5. Parâmetros Adotados nas Simulações</u>	5
<u>2.6. Definição das Medidas para o Aço</u>	8
<u>2.7. Sumário do Capítulo</u>	9
<u>CAPÍTULO 3</u>	10
<u>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÕES COM SIMULAÇÕES PELO MEF</u>	10
<u>3.1. Introdução</u>	10
<u>3.2. Construção do Trilho Magnético</u>	10
<u>3.3. Medidas da Densidade de Fluxo Magnético</u>	11
<u>3.3.1 Equipamento Utilizado para Medir a Densidade de Fluxo Magnético</u>	11
<u>3.3.2 Procedimentos Adotados</u>	13
<u>3.3.3 Valores Encontrados e Comparações</u>	13
<u>3.4. Ensaio da Força de Levitação</u>	16
<u>3.4.1. Equipamentos Utilizados</u>	16
<u>3.4.2. Procedimentos Adotados</u>	18
<u>3.4.3. Resultados Medidos da Força de Levitação</u>	18
<u>3.5. Análise das Disposições do Supercondutor</u>	26
<u>3.5.1. Supercondutores Transversais ao Concentrador</u>	26
<u>3.5.2. Supercondutores Alinhados ao Concentrador</u>	27
<u>3.5.3. Sumário do Capítulo</u>	28
<u>CAPÍTULO 4</u>	29
<u>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</u>	29
<u>4.1. Conclusão</u>	29
<u>4.2. Trabalhos Futuros</u>	29
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	31
<u>ANEXO I</u>	32
<u>DADOS DO ÍMA UTILIZADO</u>	32

<u>ANEXO II</u>	33
<u>MEDIDA DO PERFIL DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO, EM ALTURAS DIVERSAS</u>	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seção transversal do trilho de levitação magnética.	2
Figura 2- Seção transversal do trilho na configuração de concentrador de fluxo magnético a ser simulado.	4
Figura 3- Curva B vs. H do aço SAE-1010.	5
Figura 4- Comparativo entre diversas curvas de magnetização.	6
Figura 5- Indicação de dimensões e coordenadas adotadas durante o projeto.	7
Figura 6- Malha gerada pelo programa para os valores da Tabela-2.	7
Figura 7-Solução fornecida pelo programa para valores da Tabela-2 (permeabilidade relativa do supercondutor igual a 1).	8
Figura 8- Força de levitação que o material diamagnético perfeito sofreria (kN/m) v.s. a metade da espessura do ferro central (mm), a uma distância de 10mm entre o concentrador e o material.	9
Figura 9-Peça confeccionada em alumínio para prover resistência mecânica ao concentrador de fluxo magnético.	10
Figura 10-Trilho magnético composto por quatro unidades.	11
Figura 11-Gaussímetro utilizado nas medições de densidade de fluxo magnético.	12
Figura 12- Indicação das medições para determinar a região sob o efeito de borda.	13
Figura 13-Componente na direção y da densidade de fluxo magnético medida ao longo do trilho para alturas diversas.	14
Figura 14-Indicação das medições para determinar a componente y da densidade de fluxo magnético.	14
Figura 15- Componente na direção y da densidade de fluxo magnético, medidas e simulações pelo MEF, para diversas alturas.	15
Figura 16--Indicação das medições para determinar a componente y da densidade de fluxo magnético.	15
Figura 17-Densidade de fluxo magnético na direção y, medidas e simuladas, em diversas alturas.	16
Figura 18-a) Amostra de YBCO bruta; b) Amostra após o polimento.	17
Figura 19-Criostato utilizado.	17
Figura 20-a) Sistemas de medição de força do LASUP; b) Célula de carga utilizada nas medições.	18
Figura 21-a) Medição de força com a amostra de YBCO; b) Medição de força com o criostato da ATZ.	19
Figura 22-Supercondutor disposto ao longo do trilho.	20
Figura 23-Comparativo entre as curva força vs. distância simulada e medida com a amostra de YBCO alinhada ao bloco.	20
Figura 24-Supercondutor disposto transversal (ou girado) ao trilho.	21
Figura 25-Comparativo entre as curva força vs. distância simulada e medida com a amostra de YBCO girado 90°.	21
Figura 26 - Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO alinhado e girado 90°.	22
Figura 27- Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO sobre cada face.	23
Figura 28-Supercondutor disposto ao longo do trilho e deslocado lateralmente.	23
Figura 29—Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO ao longo do bloco e deslocada 18mm para a esquerda.	24
Figura 30- Curva força vs. distância medida com o criostato em FC.	24

Figura 31-Curva força vs. distância medida com o criostato em FC.	25
Figura 32 - Comparativo entre três curvas força vs. distância para a amostra de YBCO.	26
Figura 33 - Ímãs transversais ao concentrador.	27
Figura 34 - Ímãs alinhados ao supercondutor.	27
Figura 35 - Comparativo entre as curvas força vs. distância para as duas configurações propostas.	28
Figura 36- Concentrador de campo magnético proposto.	29
Figura 37- Concentrador de campo magnético proposto (Halbach).	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Propriedades físicas	4
Tabela 2- Valores fornecidos ao programa de elementos finitos para as simulações.	6
Tabela 3-Dimensões inicialmente adotadas nas simulações.	8
Tabela 4- Dimensões adotadas nas simulações para a escolha das medidas do ferro.	9
Tabela 5 - Escalas do gaussímetro utilizado.	12
Tabela 6 - Resolução do gaussímetro utilizado.	12

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O Laboratório de Aplicação de Supercondutores da Universidade Federal do Rio de Janeiro está construindo um protótipo de sistema de transporte em escala real. Com 114 metros de comprimento, o mesmo destina-se a estudos sobre o uso de supercondutores em sistemas de transporte de levitação magnética supercondutora (MagLev-Cobra) [1 2 e 3]. Sendo o trilho, constituído de ímãs permanentes em uma configuração de concentração de fluxo magnético, uma das partes mais caras do sistema, justifica-se a investigação da melhor configuração do sistema.

1.2. Projeto MagLev-Cobra

Na área de engenharia elétrica o projeto MagLev-Cobra é composto por duas partes principais: sistema de levitação magnética (em que está incluído o trilho) e sistema de tração.

1.2.1 Sistema de Levitação Magnética

O sistema de levitação magnética vale-se da propriedade diamagnética de supercondutores de alta temperatura crítica, quando resfriados com nitrogênio líquido na presença de um campo magnético. Este processo permite estabilidade passiva (sem uso de sistemas de controle) transversal e vertical, o que o diferencia dos demais processos de levitação empregados nos trens MagLev existentes no mundo atualmente.

O trilho usado no modelo em escala reduzida do sistema de levitação magnética supercondutora do LASUP é formado por um conjunto de concentradores, cada um composto por dois ímãs dispostos em oposição de polaridade e separados por um material ferromagnético como mostra a Figura 1. Tal montagem possibilita a levitação através da repulsão do fluxo magnético do concentrador pelo supercondutor.

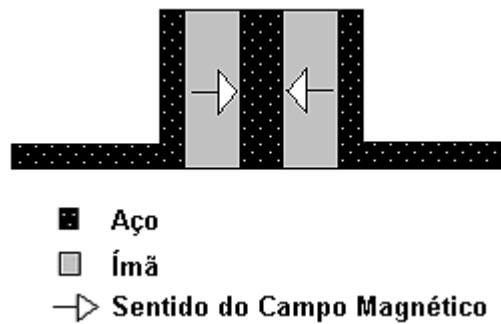


Figura 1- Seção transversal do trilho de levitação magnética.

1.2.2 Sistema de Tração

O sistema de tração é obtido com o uso de motores lineares (síncronos ou de indução) e é responsável pelo deslocamento do veículo.

1.3. Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo a avaliação de configurações de ímãs, concentradores de fluxo magnético e blocos supercondutores que otimizem a levitação magnética supercondutora.

1.4. Organização do Projeto Final

O presente trabalho teve início apresentando o projeto MagLev-Cobra. No Capítulo 2, aborda-se a simulação do trilho utilizando o Método de Elementos Finitos, comentando-se sobre o programa utilizado e o concentrador simulado.

As comparações são realizadas no Capítulo 3, o qual segue descrevendo a construção do trilho, e as medidas de densidade de fluxo magnético e de força de levitação.

Finalmente, o Capítulo 4 encerra o projeto apresentando as conclusões obtidas e propondo trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SIMULAÇÃO DO TRILHO MAGNÉTICO

2.1. Introdução

O presente capítulo é destinado a apresentar as simulações pelo método de elementos finitos no projeto de um trilho magnético com ímãs de Ne-Fe-B para um veículo MagLev.

2.2. Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos, consagrado a quase duas décadas, foi utilizado como ferramenta no presente texto.

2.2.1. Aplicações para o MEF

Atualmente o MEF é utilizado em diversos campos da engenharia: acústica , civil, química, mecânica, naval e elétrica. Em eletromagnetismo, a aplicação do MEF é justificada pela complexidade, ou inexistência, de uma solução analítica em problemas com geometrias mais elaboradas, apresentando uma solução aproximada por cálculos numéricos.

Embora a maioria dos casos reais seja em 3D, suas soluções requerem maior esforço computacional, implicando em maior tempo para resolve-los. Logo, utiliza-se o domínio bidimensional pela simplicidade de seus algoritmos e por permitir a análise, com precisão, de aproximadamente 90% dos casos encontrados na engenharia, sendo importante a realização de uma análise prévia que verifique a possível existência de simetrias, possibilitando a simplificação do problema.



2.2.2. Fundamentos do MEF

Para utilizar o MEF o objeto em estudo deve ter sua geometria subdividida em várias partes, que são os elementos finitos. Através deste processo é montado um sistema de equações cuja solução permite determinar as grandezas de interesse [4 e 5].

2.3. Programa Utilizado

Para a simulação utilizou-se do programa COMSOL (versão 3.3). O referido programa utiliza o método de elementos finitos e dispõe de diversos pacotes referentes a variadas áreas da engenharia. Particularmente, neste trabalho, foi utilizado o módulo AC/DC que possibilita a simulação de componentes e dispositivos eletromagnéticos sob diversas condições.

O programa utilizado adapta as Equações de Maxwell de acordo com o módulo selecionado [6]. Segue a equação a ser resolvida no caso magneto-estático, com suas variáveis expostas na Tabela 1.

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) = \tilde{\mathbf{J}}^e \quad (1)$$

Tabela 1-Propriedades físicas

Símbolo	Grandeza Física	Unidade
A	Vetor potencial magnético	(Wb/m)
M	Magnetização	(A/m)
μ_0	Permeabilidade no vácuo	(H/m)
J	Densidade de corrente	(A/m ²)

Onde $\tilde{\mathbf{J}}^e = \mathbf{J}^E + \mathbf{J}^e$, e \mathbf{J}^e é a corrente externa e \mathbf{J}^E é a corrente gerada por um campo elétrico estático. Como trabalha-se em baixas frequências, a parcela da corrente de deslocamento foi desconsiderada na equação (1).

2.4. Concentrador Simulado

As simulações foram realizadas com o arranjo concentrador de fluxo (indicado para levitação com uso de supercondutores) e com as dimensões dos ímãs disponíveis no LASUP.

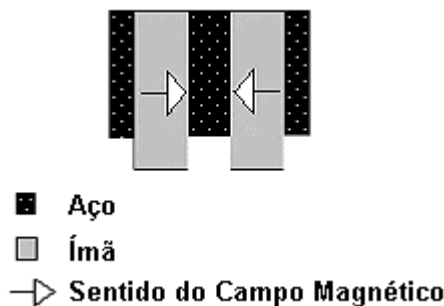


Figura 2- Seção transversal do trilho na configuração de concentrador de fluxo magnético a ser simulado.

2.5. Parâmetros Adotados nas Simulações

Para realizar a simulação do referido concentrador alguns parâmetros foram estipulados no programa de simulação.

O material ferro-magnético escolhido para envolver os ímãs foi o aço SAE-1010 (com 0,10% de teor de carbono) utilizando-se da respectiva curva B vs. H, mostrada na Figura 3. Tal escolha deve-se à sua alta permeabilidade magnética, e sua elevada resistência mecânica, necessária para suportar os esforços mecânicos advindos da oposição de campos magnéticos e da operação de um veículo MagLev.

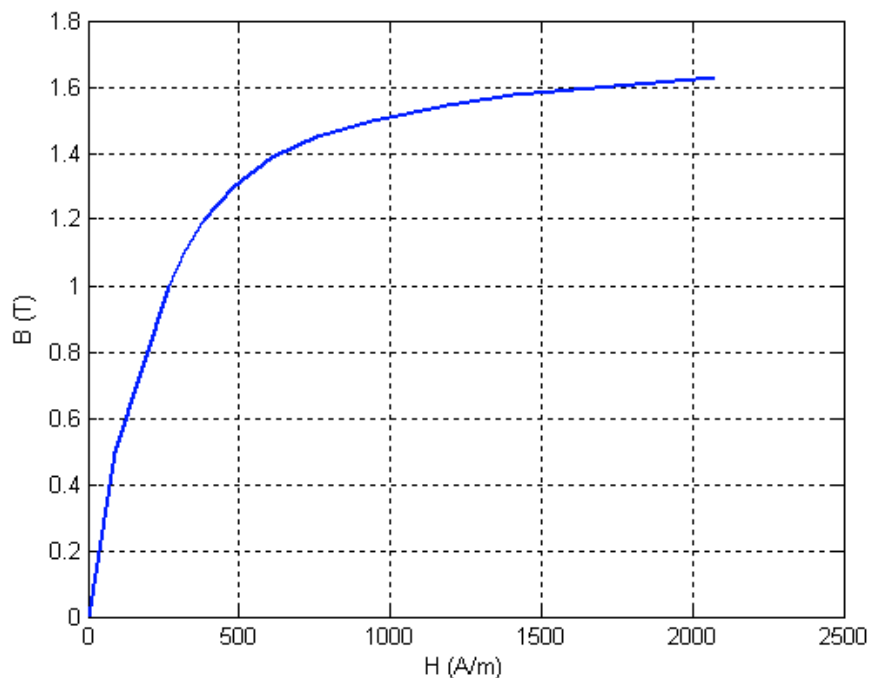


Figura 3- Curva B vs. H do aço SAE-1010.

O ímã escolhido foi o Nd-Fe-B (Neodímio Ferro Boro, N-35) que possui elevadas indução magnética remanente (1,1998 T) e força coercitiva (918 kA/m) quando comparado a outros materiais, como mostra a Figura 4. O anexo I apresenta informações mais detalhadas sobre o ímã utilizado. Devido às suas características magnéticas, faz-se necessário um menor volume de ímã para o estabelecimento de um mesmo valor de campo magnético em uma região do espaço [7].

Destaca-se que o valor de permeabilidade relativa atribuído ao supercondutor é um zero numérico e foi utilizado somente nas simulações de força. Essa aproximação indica o limite superior da força de levitação.

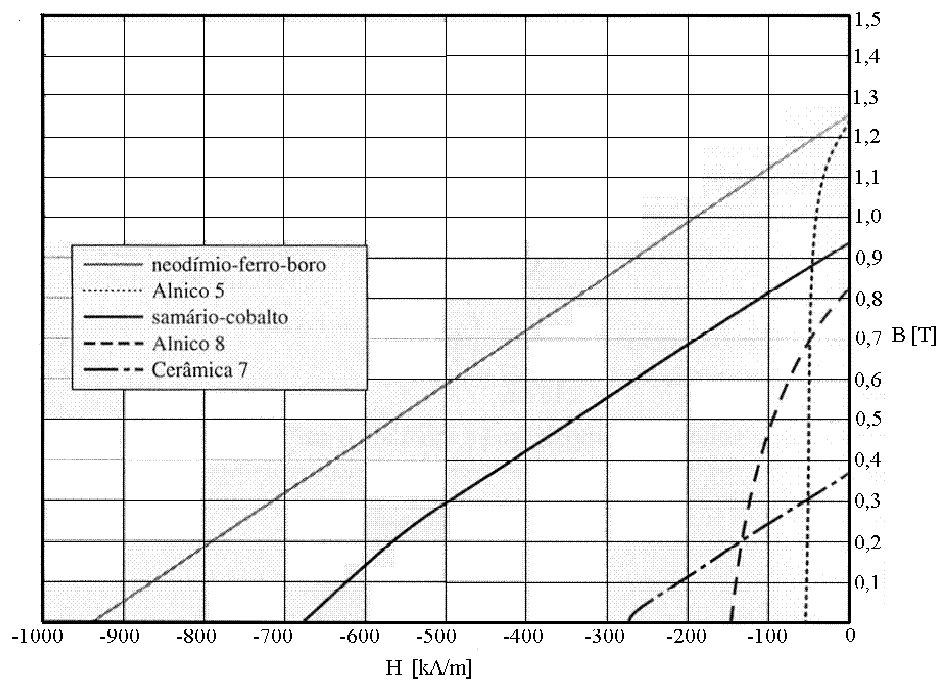


Figura 4- Comparativo entre diversas curvas de magnetização.

A Tabela 2 mostra os valores fornecidos para o programa para as propriedades magnéticas de cada material.

Tabela 2- Valores fornecidos ao programa de elementos finitos para as simulações.

	AR	AÇO SAE-1010	Nd-Fe-B	SUPERCONDUTOR
Permeabilidade relativa (μ_R)	1	Curva BH (Figura 3)	1,0385	1×10^{-11}
Indução magnética remanente (B_R)	----	----	1,198	----

Durante as simulações de densidade de fluxo magnético, os efeitos da presença do supercondutor não eram interessantes, logo o mesmo foi simulado com a mesma permeabilidade relativa do ar.

A geometria inicialmente proposta é mostrada na Figura 5 (possuindo os ímãs com dimensões fixas de 120x120x30 mm), sendo definida pelos seguintes parâmetros:

- x1-metade da espessura do ferro central;
- x2-espessura do ímã (fixa e igual à 30 mm);
- y1- altura do ferro (fixa e igual à 102 mm)
- y2- altura do ímã (fixa e igual à 120 mm);

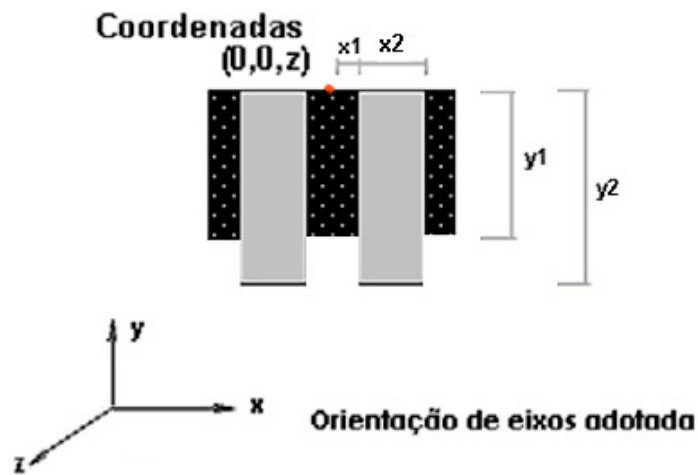


Figura 5- Indicação de dimensões e coordenadas adotadas durante o projeto.

A Figura 6 apresenta a imagem da malha gerada pelo programa, enquanto a Figura 7 mostra as linhas de campo para os valores das propriedades contidos na Tabela 2 (exceto pela permeabilidade do supercondutor que é a mesma que a do ar) e as dimensões contidas na Tabela 3.

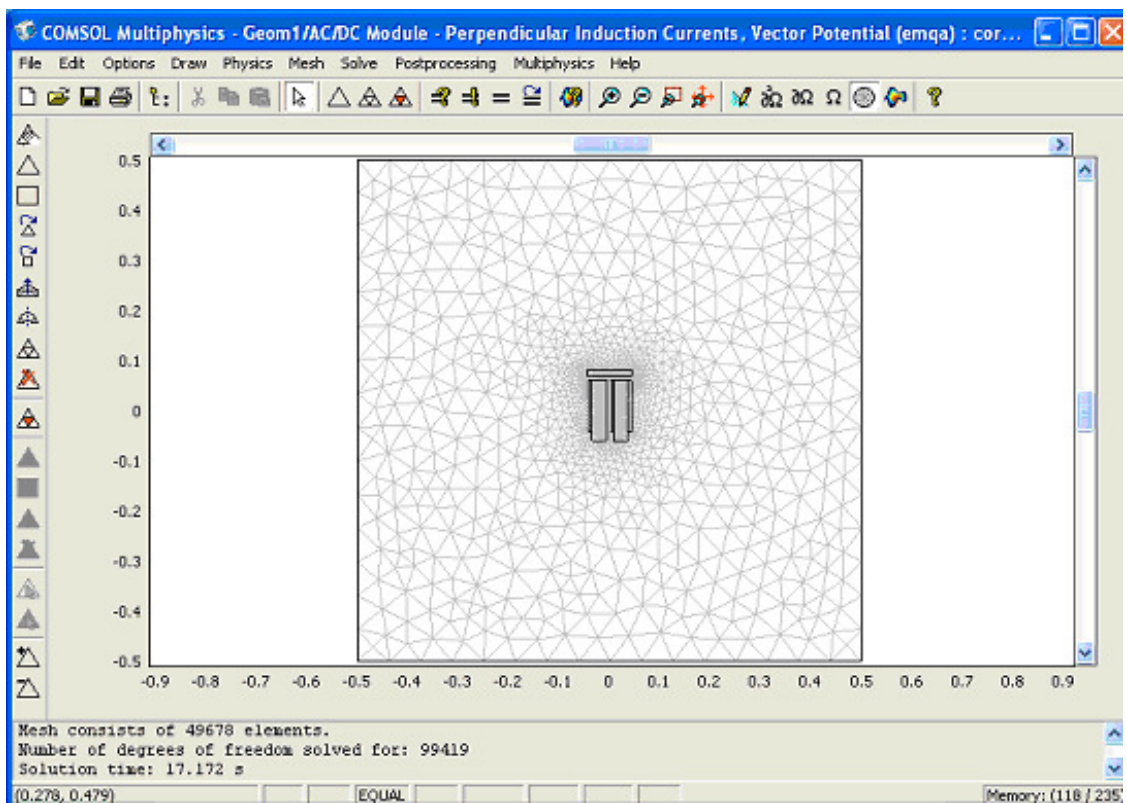


Figura 6- Malha gerada pelo programa para os valores da Tabela-2.

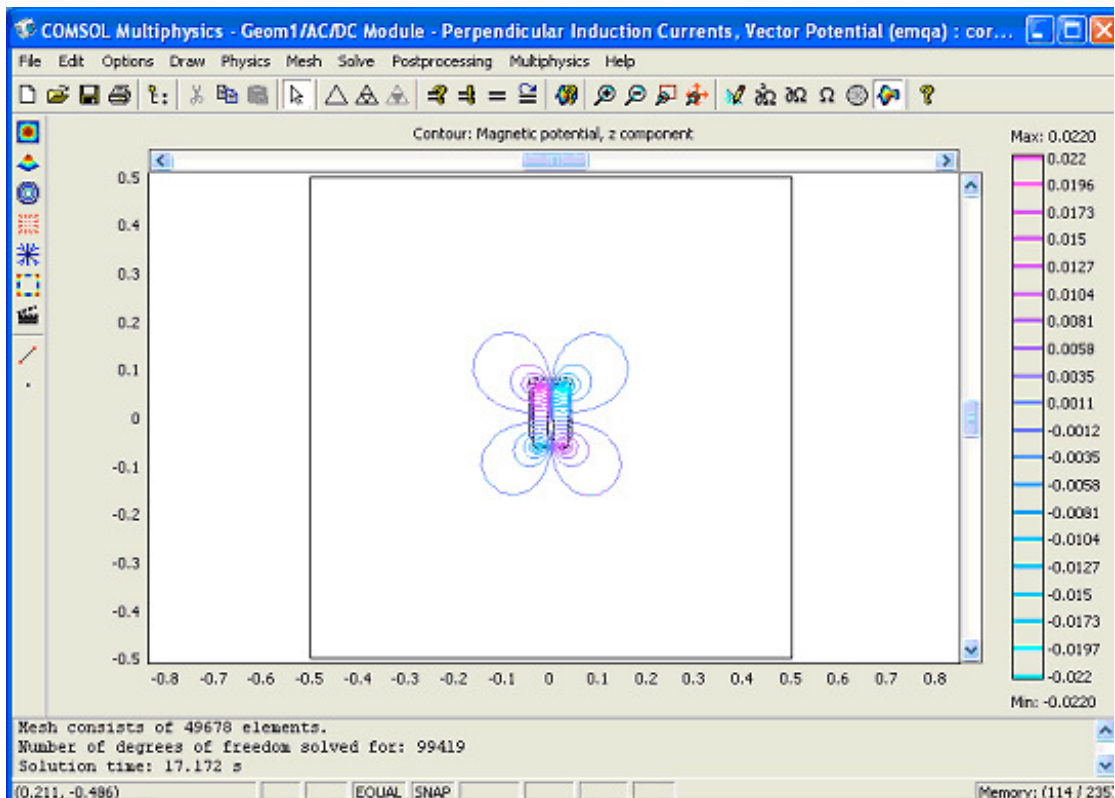


Figura 7-Solução fornecida pelo programa para valores da Tabela-2 (permeabilidade relativa do supercondutor igual a 1).

Tabela 3-Dimensões inicialmente adotadas nas simulações.

Dimensão	Valor (mm)
X1	10
Y1	102
X2	30
Y2	120

2.6. Definição das Medidas para o Aço

No presente trabalho, a escolha das medidas do ferro foi realizada pela comparação da força de levitação do supercondutor sobre o trilho magnético.

Dois parâmetros foram variados: a espessura do ferro central (o dobro de x_1) e a espessura do ferro lateral (igual a x_1). O passo utilizado foi 1 mm, e o procedimento contemplou valores entre 1 e 50 mm. A cada iteração a força que o material diamagnético sofreria (a 10 mm de distância do concentrador) foi calculada, conforme mostra a Figura 8.

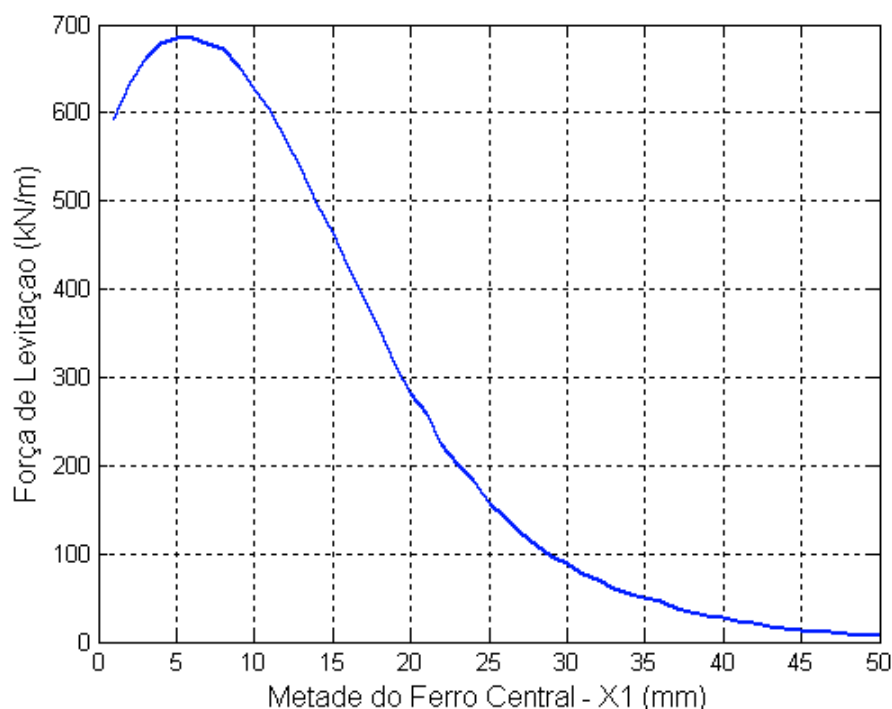


Figura 8- Força de levitação que o material diamagnético perfeito sofreria (kN/m) v.s. a metade da espessura do ferro central (mm), a uma distância de 10mm entre o concentrador e o material.

Tabela 4- Dimensões adotadas nas simulações para a escolha das medidas do ferro.

Dimensão	X1	X2	Y1	Y2	Supercondutor
Valor (mm)	varia	30	102	120	33

A maior força encontrada ($F=685$ kN/m) foi relativa à espessura de ferro central de 10 mm (o dobro de x_1), entretanto, pelo elevado custo de fundição de uma peça personalizada, o concentrador foi construído com ferro central de $1/2'' \times 4''$ (12,7 x 102,00 mm). Utilizando-se esses valores, procedeu-se à análise de algumas propriedades.

2.7. Sumário do Capítulo

Esta etapa do trabalho objetivou encontrar as dimensões ótimas do ferro do concentrador do trilho de um veículo MagLev pela maximização da força de levitação. Para tal foi utilizado o Método de Elementos Finitos, através do programa COMSOL.

Finalmente, as medidas do ferro do concentrador de fluxo magnético, adaptando-se a valores comerciais para que o trilho fosse construído, foram determinadas.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÕES COM SIMULAÇÕES PELO MEF

3.1. Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados de ensaios realizados com o trilho magnético construído, analisando e comparando os valores encontrados no decorrer do texto.

3.2. Construção do Trilho Magnético

O protótipo do trilho magnético construído utiliza oito ímãs e quatro unidades concentradoras de fluxo. As unidades, mostradas na Figura 9, foram montadas formando um trilho com 480 mm de comprimento, o qual é mostrado na Figura 10.

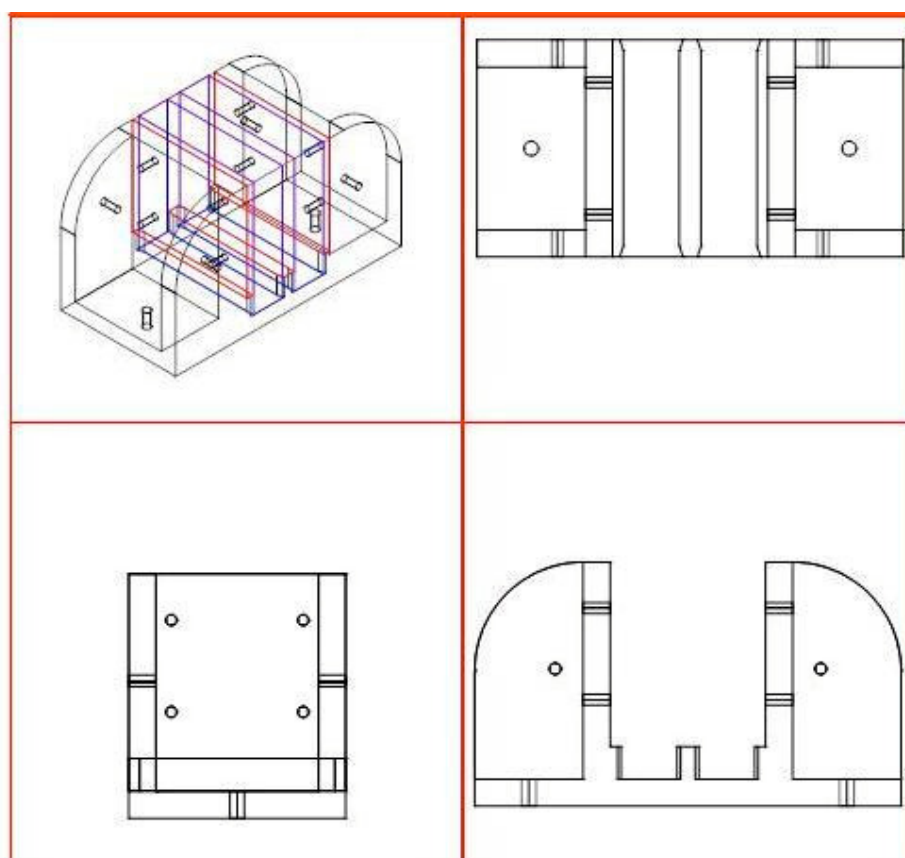


Figura 9-Peça confeccionada em alumínio para prover resistência mecânica ao concentrador de fluxo magnético.



Figura 10-Trilho magnético composto por quatro unidades.

3.3. Medidas da Densidade de Fluxo Magnético

Para a construção em escala real de um trilho é importante saber a intensidade e o perfil de densidade de fluxo magnético que será encontrada próxima e ao entorno do mesmo. No presente texto, a finalidade é a validação da simulação pelo MEF.

3.3.1 Equipamento Utilizado para Medir a Densidade de Fluxo Magnético

Para medir a densidade de fluxo magnético foi utilizado o Gaussímetro (ou Teslômetro) modelo 5080, da marca F.W.BELL, mostrado na Figura 11, indicado para as seguintes aplicações segundo seu manual:

- Verificação da performance de ímãs permanentes;
- Testes em motores elétricos (armadura e rotor), transformadores e solenóides;
- Determinação de campos danosos a equipamentos sensíveis, e interferências eletromagnéticas, dentre outras.

I. Especificações do Gaussímetro

Tabela 5 - Escalas do gaussímetro utilizado.

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

Tabela 6 - Resolução do gaussímetro utilizado.

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: $\pm 1\%$ da leitura, ± 3 casas

Variação de acurácia com a temperatura (sem incluir a ponteira): $\pm 0,02\%$ / $^{\circ}\text{C}$

II. Especificações da ponteira de prova transversal

Número do modelo: STD58-0404

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

Variação da acurácia com a temperatura : $-0,05\%$ / $^{\circ}\text{C}$

Variação da medida com a temperatura: $\pm 30\ \mu\text{T}$ / $^{\circ}\text{C}$



Figura 11-Gaussímetro utilizado nas medições de densidade de fluxo magnético.

3.3.2 Procedimentos Adotados

As medidas foram feitas ajustando manualmente a posição do sensor hall do gaussímetro sobre o concentrador. Folhas de papel milimetrado foram alinhadas e fixadas ao trilho para direcionar os deslocamentos horizontais e placas de G-10 (material não ferromagnético) foram usadas como espaçadores em excursões verticais. Ressalta-se que o conjunto, lâmina de aço (que cobre o trilho) e a ponteira de medidas, inserem um deslocamento de aproximadamente 1 mm, que foram considerados nos cálculos pelo MEF para comparação dos resultados.

3.3.3 Valores Encontrados e Comparações

Medidas variadas de densidade de fluxo magnético foram realizadas, sendo mostradas a seguir.

I. Medidas para a determinação da região com efeito de borda desprezível

A componente na direção y da densidade de fluxo magnético foi medida ao longo do eixo z para quatro alturas diferentes ($y=1, 6, 11$ e 16 mm) conforme mostra a Figura 12, os resultados são apresentados na Figura 13.

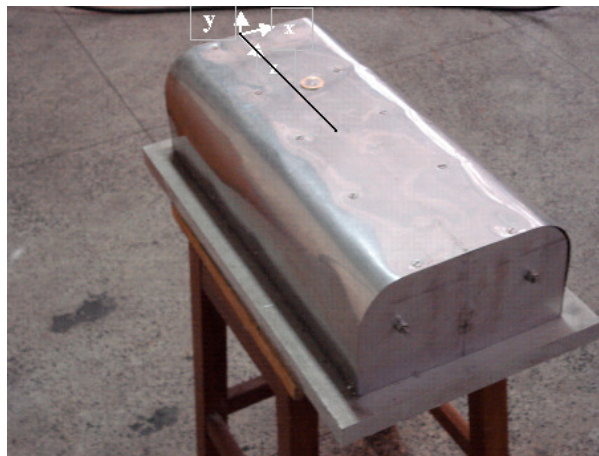


Figura 12- Indicação das medições para determinar a região sob o efeito de borda.

Verifica-se que o efeito de borda varia em y , o que já era esperado. Pode-se dizer que a partir de 100 mm das laterais do trilho o efeito de borda pode ser desprezado. Portanto, as demais medidas foram realizadas nesta região, salvo menção em contrário.

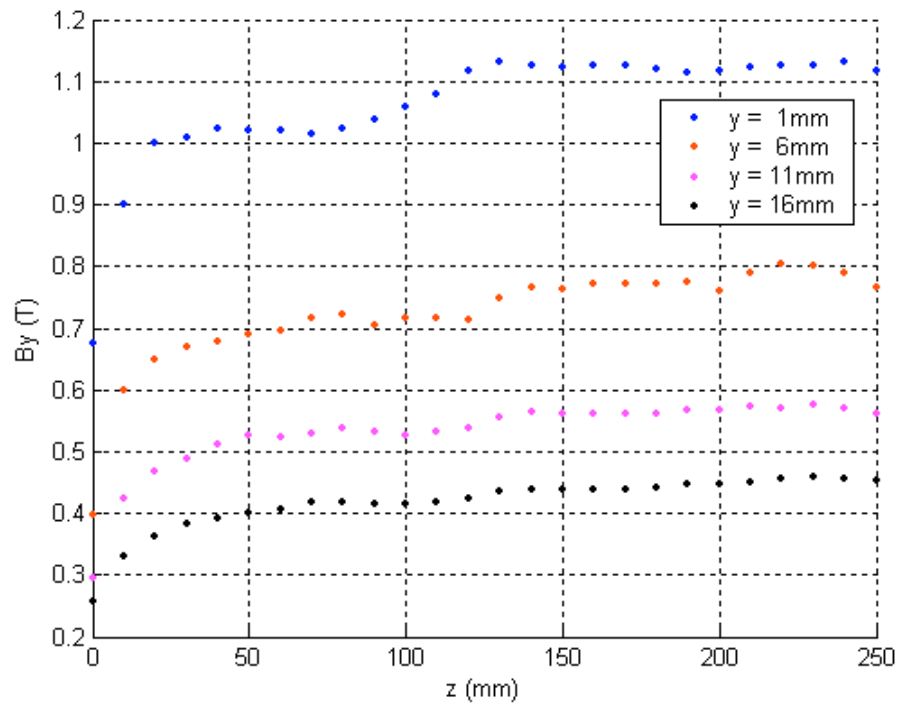


Figura 13-Componente na direção y da densidade de fluxo magnético medida ao longo do trilho para alturas diversas.

II. Medidas em planos com alturas variadas

Determinada a região linear, pode-se medir o perfil da componente na direção y da densidade de fluxo magnético, as medidas foram realizadas sobre os planos em $z=250$ mm (próximo ao centro do trilho) e diversas alturas ($y=1, 6, 11$ e 16 mm) conforme mostra a Figura 14. Tais valores foram comparados com simulações realizadas pelo MEF, conforme mostra a Figura 15.

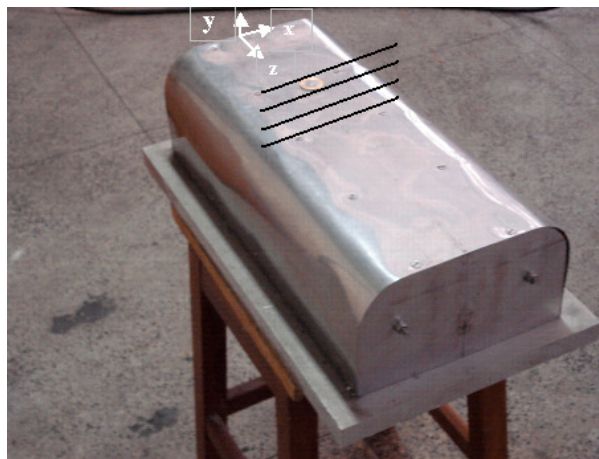


Figura 14-Indicação das medições para determinar a componente y da densidade de fluxo magnético.

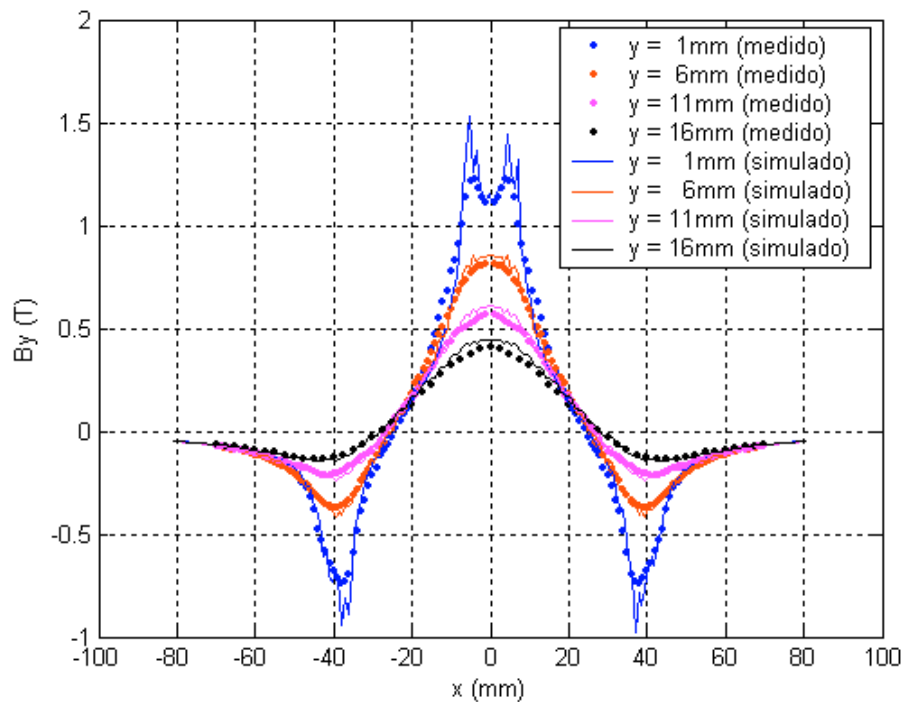


Figura 15- Componente na direção y da densidade de fluxo magnético, medidas e simulações pelo MEF, para diversas alturas.

Os valores medidos se encontram muito próximos às curvas simuladas havendo uma maior divergência em regiões de maior gradiente, o que pode ser influência da malha gerada não tão refinada nesta região (explicando também a assimetria da curva de B_y para $y = 1$ mm). O Anexo II expõe gráficos 3D de B_y medidos ao longo do trilho em $y=1, 6, 11$ e 16 mm.

III. Medidas lineares em alturas variadas (no centro do trilho)

Para definir a ordem de grandeza da densidade de fluxo magnético em distâncias maiores foram realizadas medições de B_y conforme mostra a Figura 16.

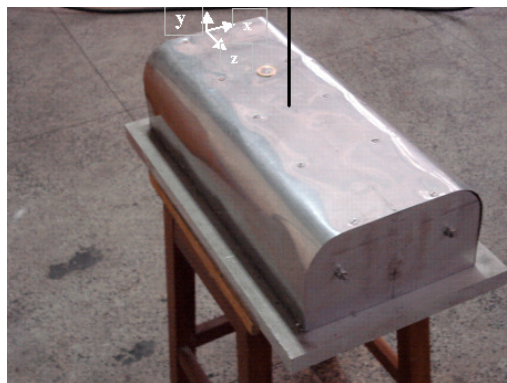


Figura 16--Indicação das medições para determinar a componente y da densidade de fluxo magnético.

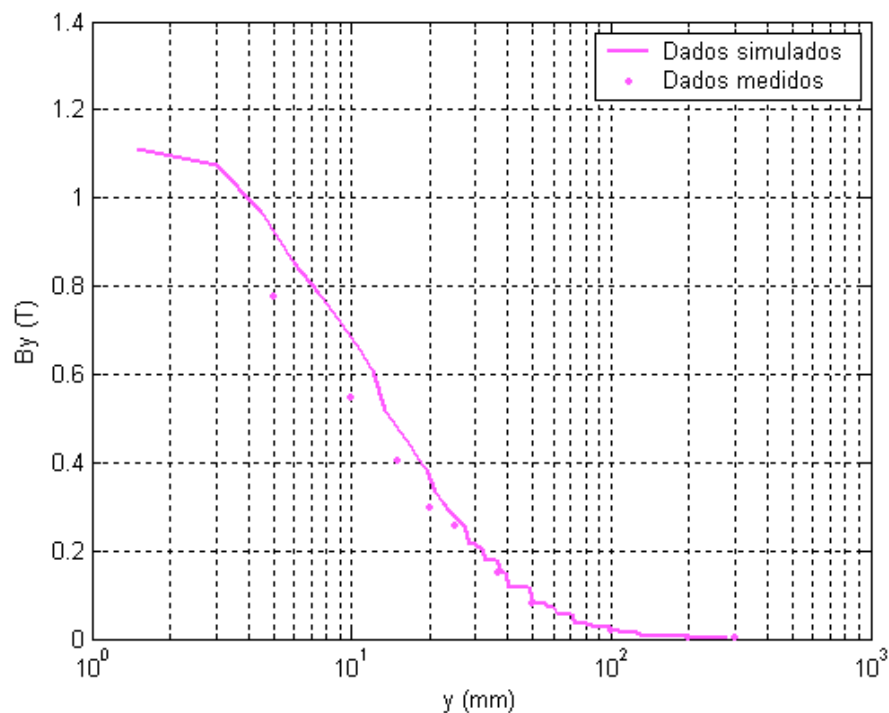


Figura 17-Densidade de fluxo magnético na direção y, medidas e simuladas, em diversas alturas.

A Figura 17 compara a componente na direção y da densidade de fluxo magnético, medida e simulada, próximo ao centro do bloco ($x=0\text{mm}$; $z=250\text{mm}$) em alturas diversas.

3.4. Ensaio da Força de Levitação

É fundamental saber a força de levitação fornecida pela interação entre o trilho e o supercondutor, seja para análise estrutural do veículo, ou para o dimensionamento de material.

3.4.1. Equipamentos Utilizados

Para determinar a força de levitação magnética foram utilizadas duas unidades supercondutoras:

- I. A primeira é uma amostra de YBCO (64x33x13 mm). A amostra foi fornecida bruta sendo lixada e polida, como mostra a Figura 18.

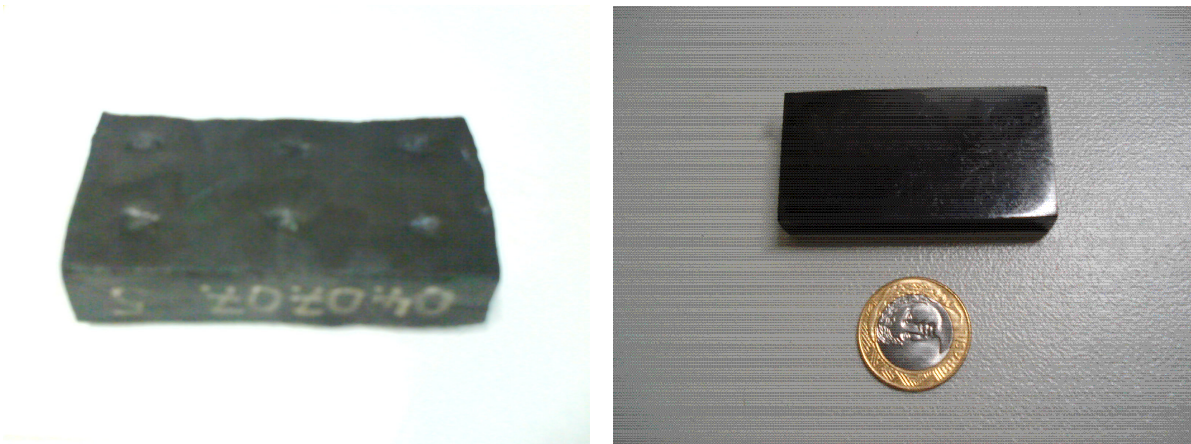


Figura 18-a) Amostra de YBCO bruta; b) Amostra após o polimento.

- II. A segunda é um criostato composto por 24 blocos supercondutores. O criostato, adquirido recentemente pelo LASUP da empresa ATZ [8], é mostrado na Figura 19. Os supercondutores estão divididos em duas fileiras de doze unidades ao longo do criostato.



Figura 19-Criostato utilizado.

Foram utilizados ainda: o sistema de medidas de força, do LASUP, e células de carga, previamente calibradas (ambos mostrados na Figura 20). Maiores informações sobre o

sistema de medidas de força, métodos e as células utilizadas podem ser encontradas em [9].

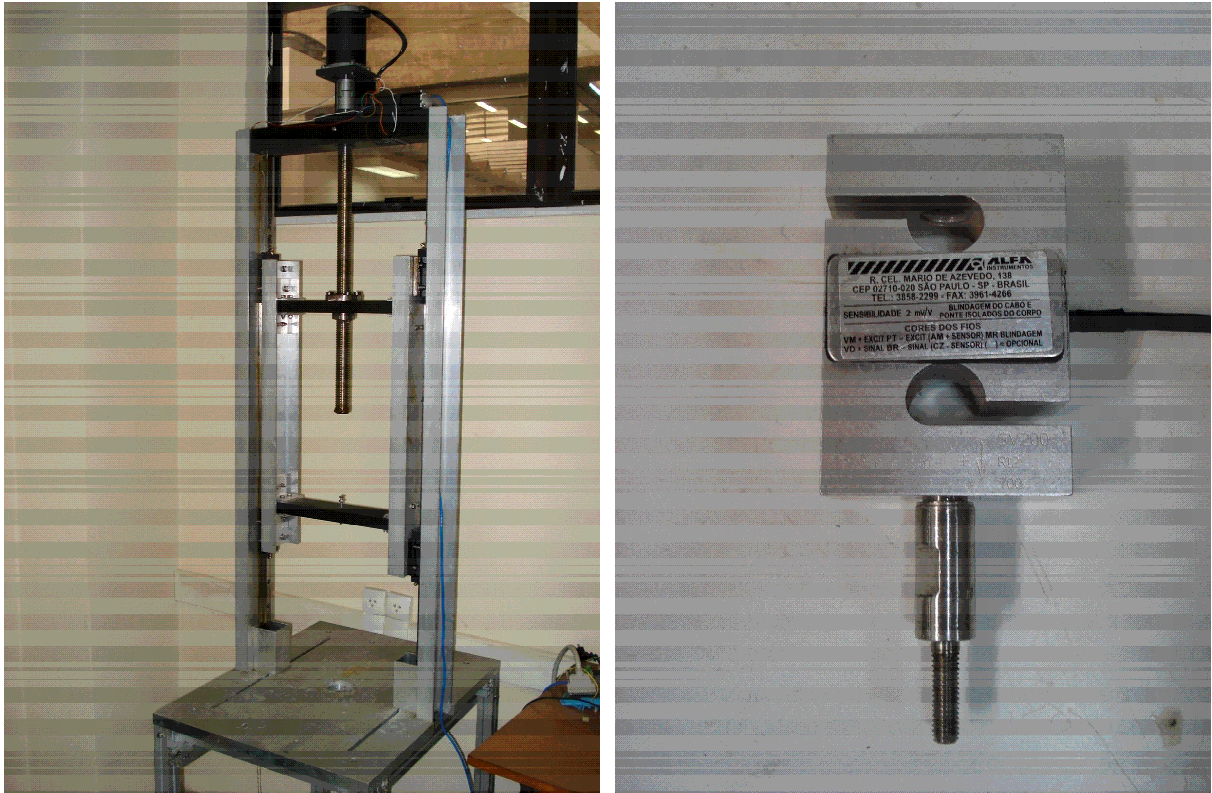


Figura 20-a) Sistemas de medição de força do LASUP; b) Célula de carga utilizada nas medições.

3.4.2. Procedimentos Adotados

Dois procedimentos foram adotados durante as medidas. O primeiro foi o ‘zero field cooling’ (ZFC), que consiste no resfriamento do supercondutor sem a presença de campo magnético e o segundo foi o ‘field cooling’ (FC), que é o resfriamento do supercondutor em presença de um campo magnético. No primeiro, surge uma força ao aproximar o supercondutor de um campo magnético. Este método indica a máxima força de repulsão que o supercondutor pode sofrer. No segundo, a força surge ao tentar mover o supercondutor para uma região de campo magnético diferente do campo em que houve o resfriamento do supercondutor. Este indica um procedimento mais próximo da operação de um veículo MagLev dada a estabilidade em todos os graus de liberdade.

3.4.3. Resultados Medidos da Força de Levitação

A força de levitação entre o supercondutor e o trilho construído foi medida usando o sistema de medidas da Figura 20, para a amostra da Figura 18 e para o criostato da Figura 19, conforme mostra a Figura 21.

Nas primeiras quatro medições, a amostra de YBCO foi utilizada adotando-se o ZFC como mostra a Figura 21-a, enquanto que nas duas últimas o criostato foi medido, utilizando o FC (Figura 21-b). Todas as medições foram feitas centralizando os criostatos sobre o bloco concentrador ($x=0$ e $z=250$ mm), objetivando minimizar o efeito de borda, exceto menção em contrário.

Finalmente, os ensaios de ZFC para o bloco de YBCO foram comparados com simulações em 2D, onde a profundidade do supercondutor foi multiplicada pela força por unidade de comprimento calculada.

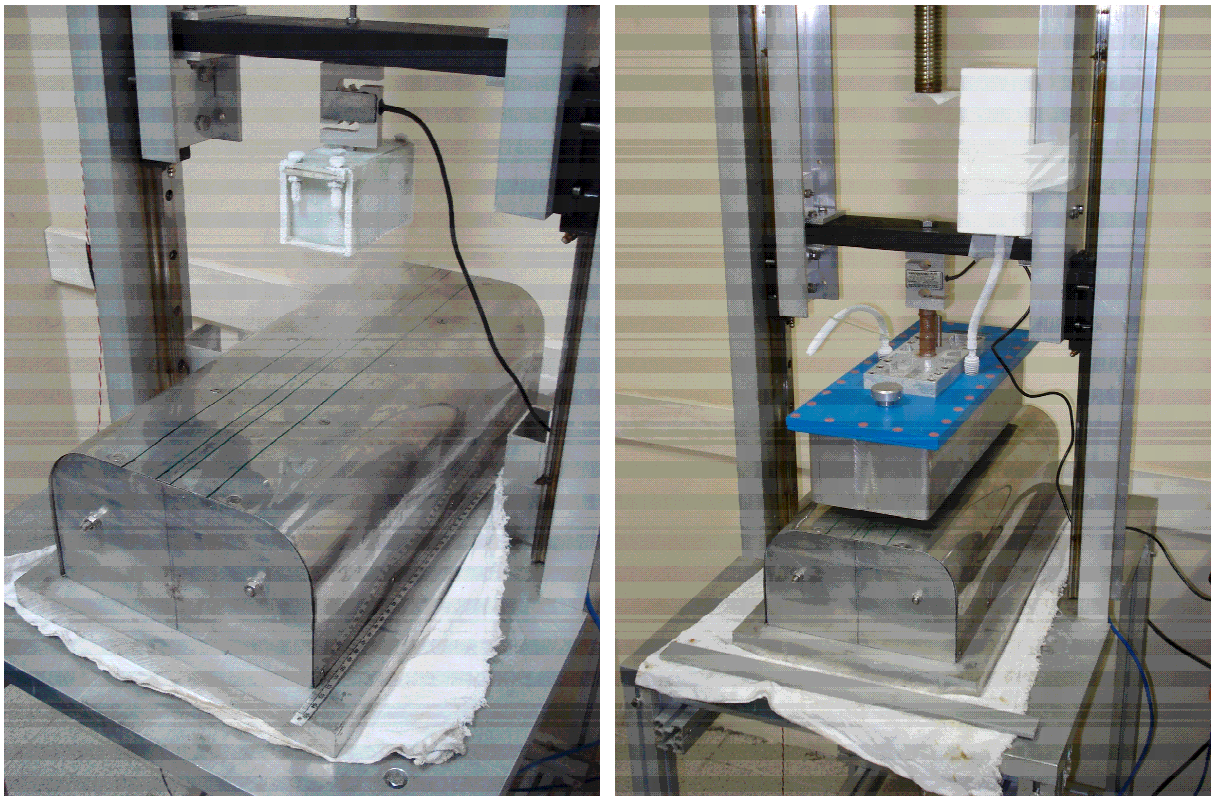


Figura 21-a) Medição de força com a amostra de YBCO; b) Medição de força com o criostato da ATZ.

I. Medida em ZFC com a amostra de YBCO disposta ao longo do concentrador.

Esta medida foi realizada com o supercondutor disposto como mostrado da Figura 22 e mede a máxima força de levitação entre os dois elementos, sendo mostrada na Figura 23.

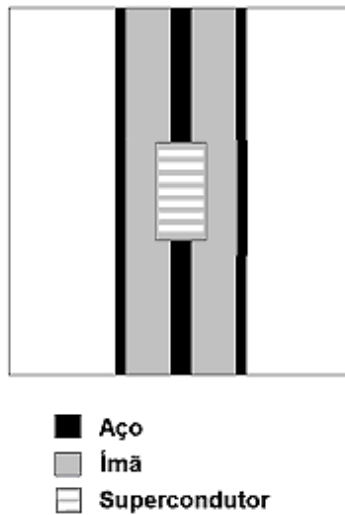


Figura 22-Supercondutor disposto ao longo do trilho.

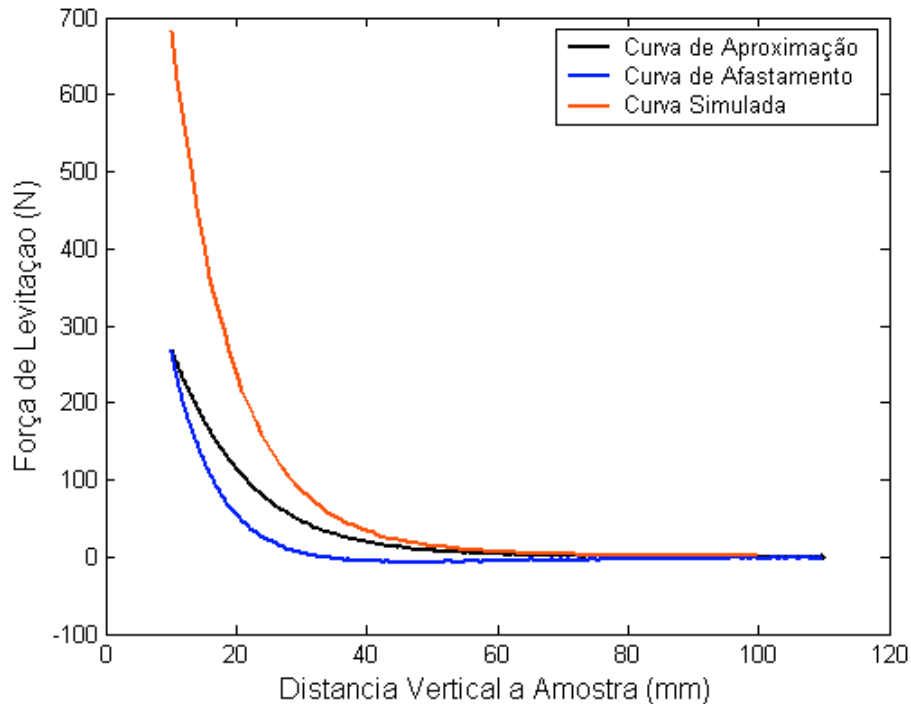


Figura 23-Comparativo entre as curva força vs. distância simulada e medida com a amostra de YBCO alinhada ao bloco.

Para este ensaio obteve-se uma força de levitação máxima de 272 N a 10 mm do concentrador. Nota-se também uma discrepância entre os valores medidos e os simulados proporcional à distância dos objetos. Esta divergência é fruto do modelo de permeabilidade nula adotado para o supercondutor nas simulações, que perde sua validade para distâncias menores, fornecendo o limitante superior da força de levitação. Este efeito estará presente em todas as simulações de força do presente trabalho.

II. Medida em ZFC com a amostra de YBCO disposta transversalmente ao concentrador (no centro do trilho).

A Figura 24 mostra a orientação do supercondutor durante as medições enquanto a Figura 25 mostra os valores medidos.

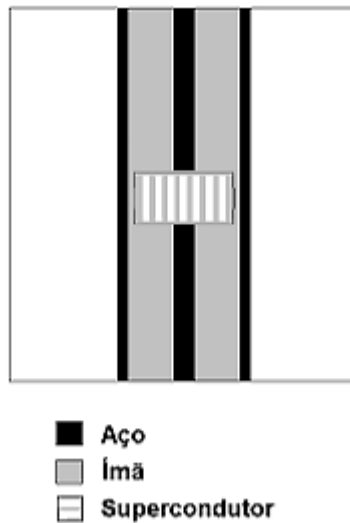


Figura 24-Supercondutor disposto transversal (ou girado) ao trilho.

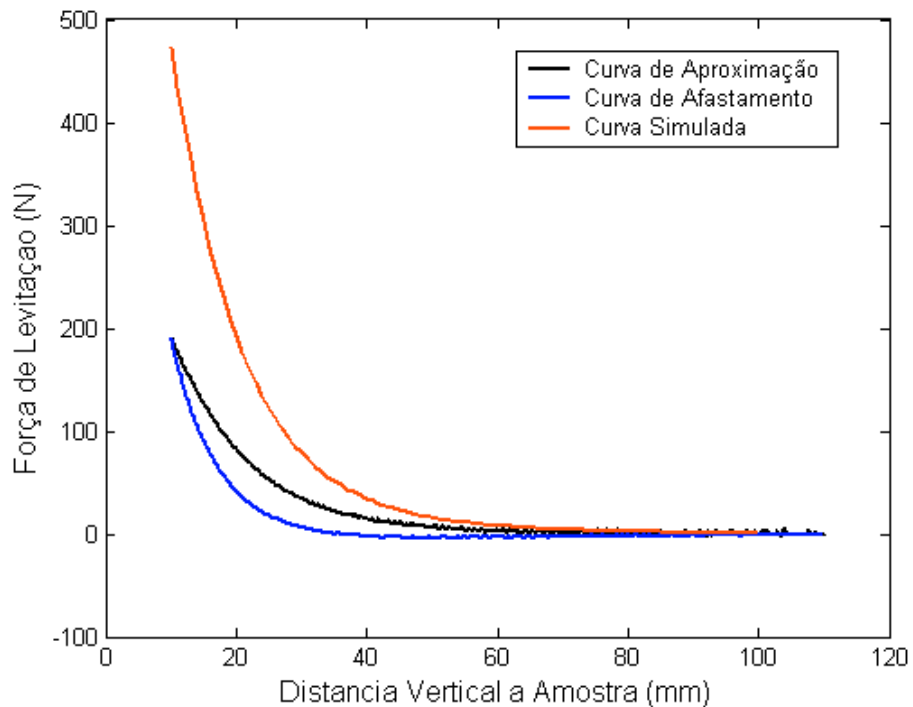


Figura 25-Comparativo entre as curva força vs. distância simulada e medida com a amostra de YBCO girado 90°.

O valor máximo de força de levitação é de 190 N, menor do que no caso anterior. Esse resultado é fruto de um posicionamento que submete as áreas mais nobres do supercondutor (entorno do grão) a regiões de campo menos intenso, o item 3.5 analisa mais profundamente esse aspecto.

A Figura 26 compara os valores de força de levitação medidos com a amostra disposta alinhada e girada 90°, revelando que a força máxima de levitação com o supercondutor girado é 30% menor do que quando alinhado.

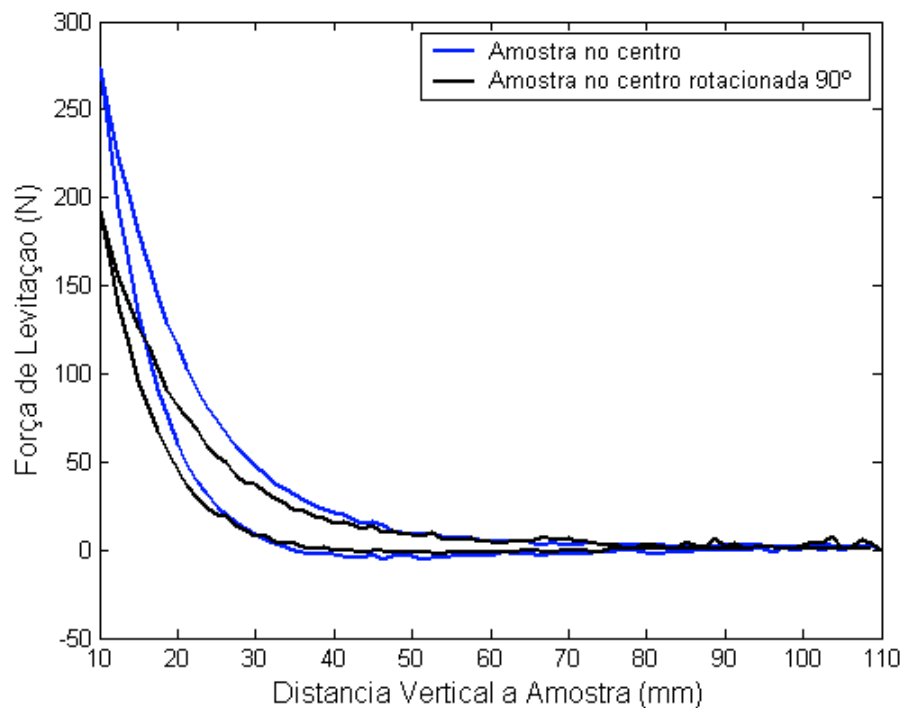


Figura 26 - Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO alinhado e girado 90°.

III. Medida em ZFC com a amostra de YBCO disposta ao longo do concentrador com as sementes do supercondutor para a parte de cima.

Todo bloco supercondutor possui uma face nobre e um lado menos nobre (área final do crescimento do supercondutor). A face nobre possui propriedades supercondutoras mais aprimoradas, fornecendo uma maior força de levitação. A Figura 27 compara os valores medidos para cada lado do supercondutor, e mostra uma força máxima de levitação de 227 N, 16% menor do que para o lado bom do bloco supercondutor.

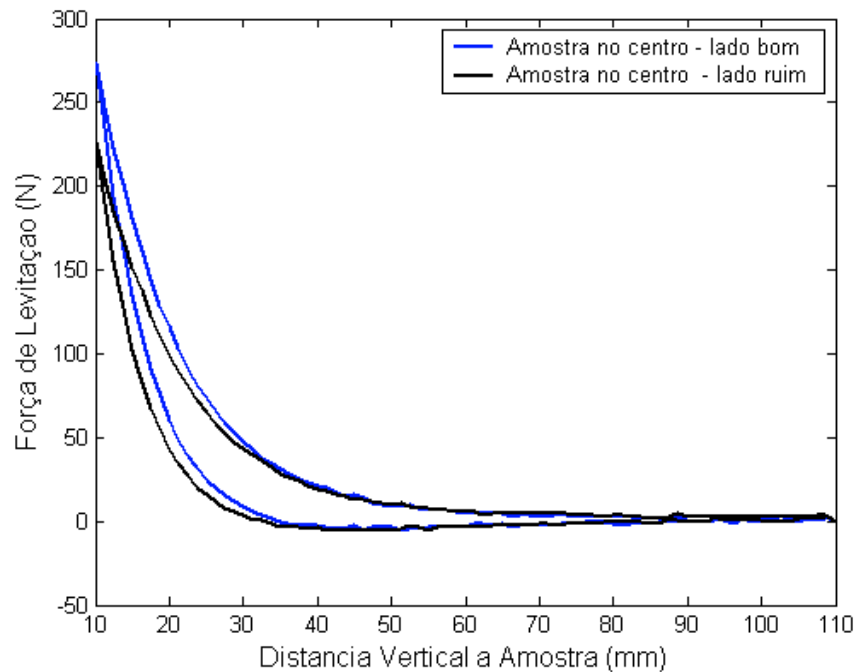


Figura 27- Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO sobre cada face.

IV. Medida em ZFC com a amostra de YBCO disposta ao longo do concentrador, mas deslocado de 18 mm para a esquerda.

Esta medida simula a resposta do supercondutor quando não centralizado sobre o trilho como mostrado na Figura 28.

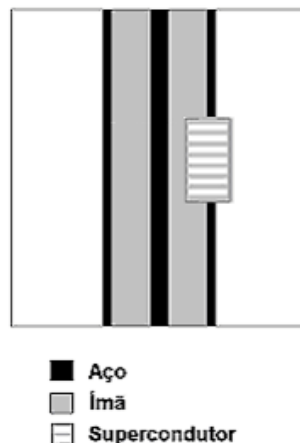


Figura 28-Supercondutor disposto ao longo do trilho e deslocado lateralmente.

A Figura 29 compara os valores medidos com o supercondutor centralizado e deslocado, revelando uma força máxima de 135 N para o supercondutor deslocado 18 mm, 50% menor do que quando centralizado, o item 3.5 analisa também esse aspecto.

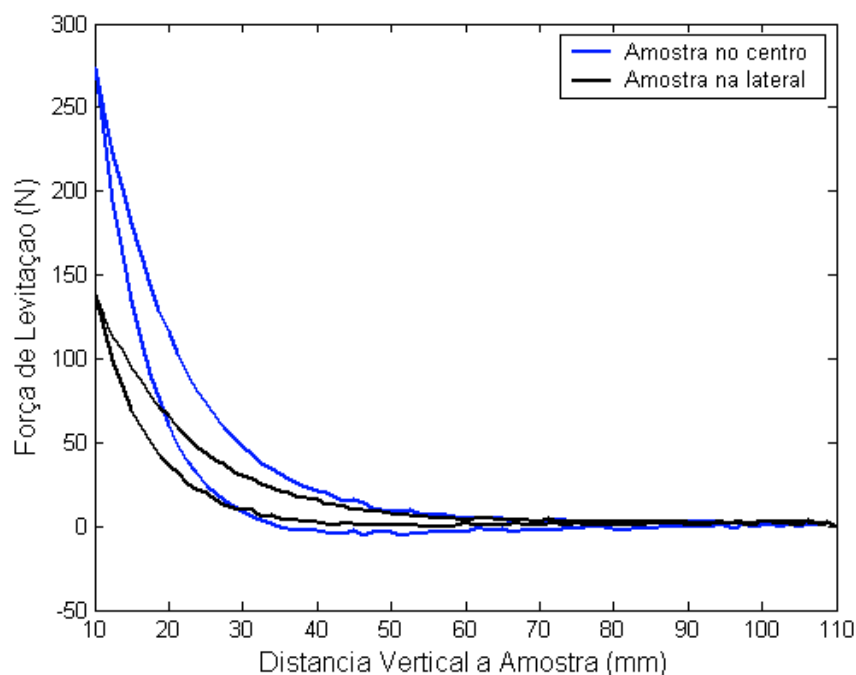


Figura 29—Comparativo entre as curvas força vs. distância medidas com a amostra de YBCO ao longo do bloco e deslocada 18mm para a esquerda.

V. Medida de FC com o criostato da ATZ disposto ao longo do concentrador.

O criostato foi refrigerado a 16 mm do concentrador, em seguida aproximado até 10 mm, se distanciou 50 mm e reaproximando-se 50 mm.

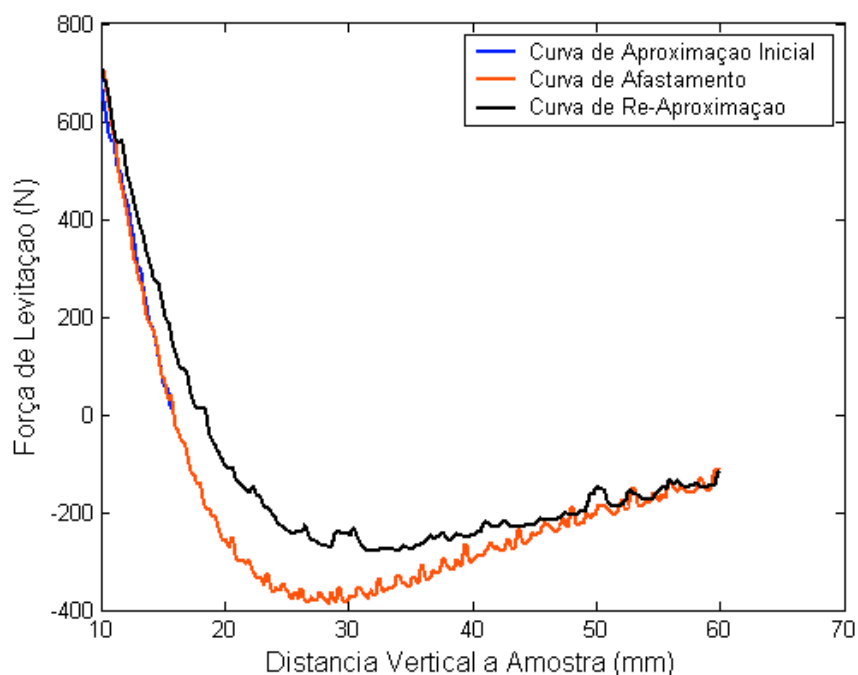


Figura 30- Curva força vs. distância medida com o criostato em FC.

A Figura 30 mostra uma força máxima de levitação de 724 N a 10 mm do concentrador. Esta medida indica a performance do supercondutor em uma operação próxima a de um veículo MagLev (onde a variação de carga implica em uma variação espacial).

VI. Medida de FC com o criostato da ATZ disposto ao longo do trilho.

Como continuidade do teste anterior, imediatamente após a realização das medidas apresentadas na Figura 30, o criostato partiu da posição de parada, ou seja, 10 mm. Neste novo ensaio, o criostato foi agora aproximado até 5 mm do trilho e depois afastado até 10 mm. A Figura 31 mostra uma força máxima de levitação de 1740 N, quando distando 5 mm do trilho.

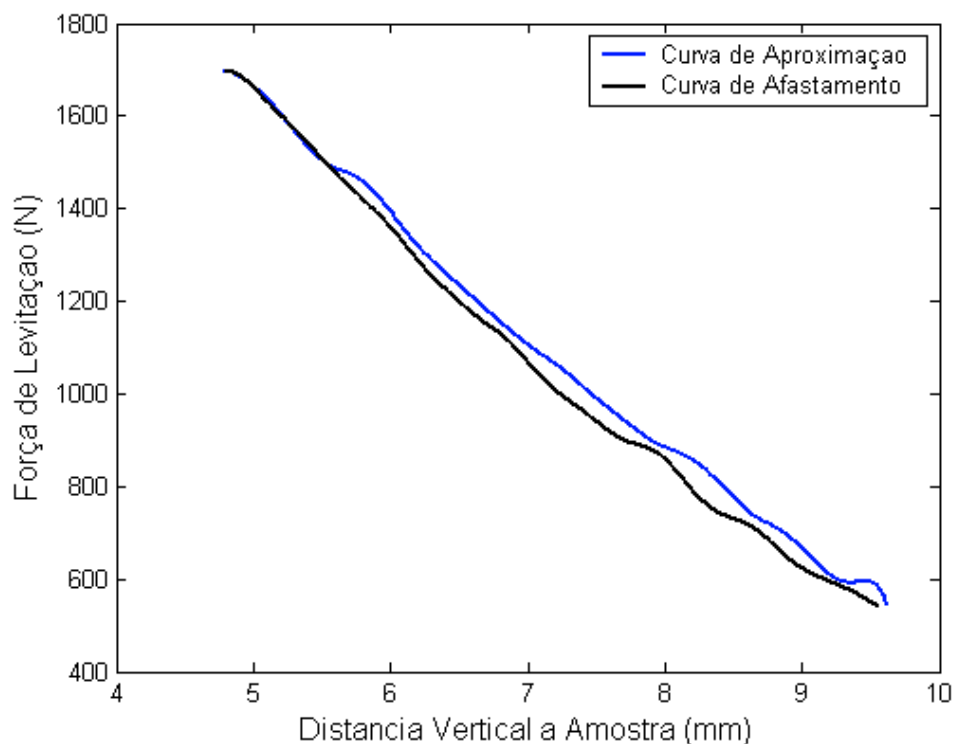


Figura 31-Curva força vs. distância medida com o criostato em FC.

VII. Este item se propõe a mostrar a repetitividade do experimento.

Para mostrar a repetitividade do experimento, foram realizadas três medições de força com o supercondutor centralizado e utilizando o lado nobre. A Figura 32 mostra as curvas obtidas praticamente sobrepostas.



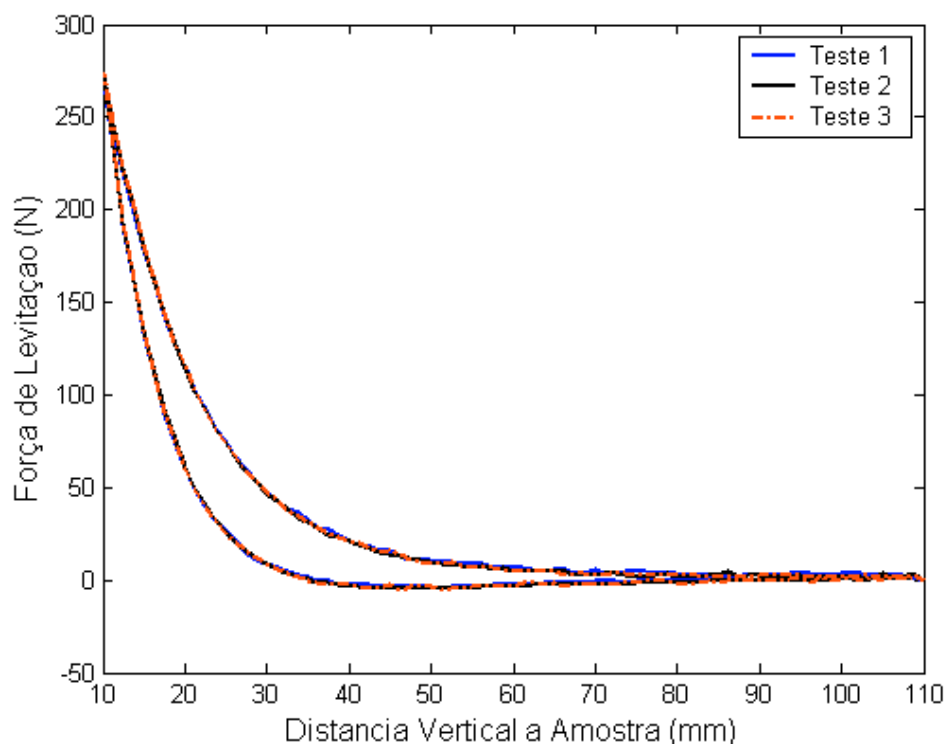


Figura 32 - Comparativo entre três curvas força vs. distância para a amostra de YBCO.

3.5. Análise das Disposições do Supercondutor

Complementando as análises anteriores, uma análise da melhor configuração dos supercondutores é realizada.

3.5.1. Supercondutores Transversais ao Concentrador

A primeira disposição consiste em três blocos supercondutores dispostos transversalmente ao concentrador, como mostra a Figura 33.

Utilizando-se os valores encontrados, a força pode ser calculada multiplicando a força pelo número de supercondutores.

$$\text{Força} = 3 \times 190 = 570 \text{ N}$$

Outro cálculo importante é o de força por metro, sendo calculado como:

$$570 / (3 \times 0,033) = 5700 \text{ N/m}$$

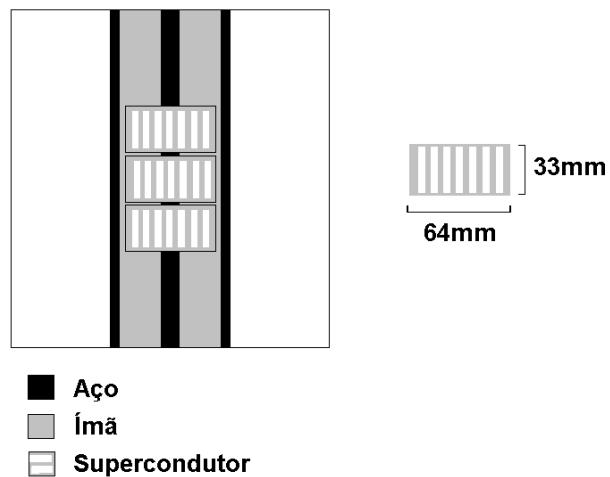


Figura 33 - Ímãs transversais ao concentrador.

3.5.2. Supercondutores Alinhados ao Concentrador

A configuração seguinte consiste em três blocos supercondutores, um no centro (alinhado ao concentrador) e outros dois laterais a este, um em cada lado como mostra a Figura 34.

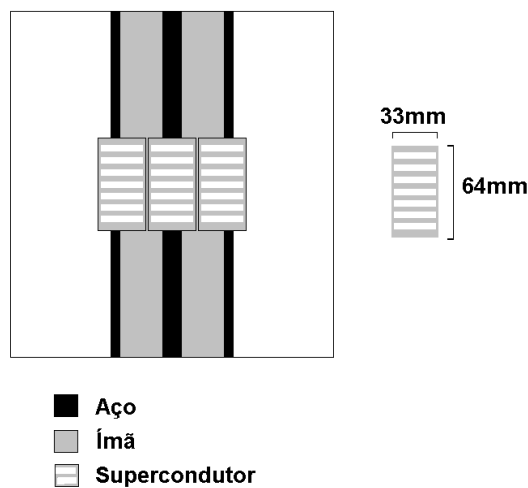


Figura 34 - Ímãs alinhados ao supercondutor.

Novamente calcula-se a força multiplicando da força pelo número de supercondutores em cada posição.

$$\text{Força} = 272 + 2 \times 135 = 542 \text{ N}$$

E calculando a força por metro encontra-se:

$$542 / (0,064) = 8437,5 \text{ N/m}$$

3.5.3. Sumário do Capítulo

A Figura 35 mostra um comparativo entre as curvas força vs. distância para as duas configurações propostas.

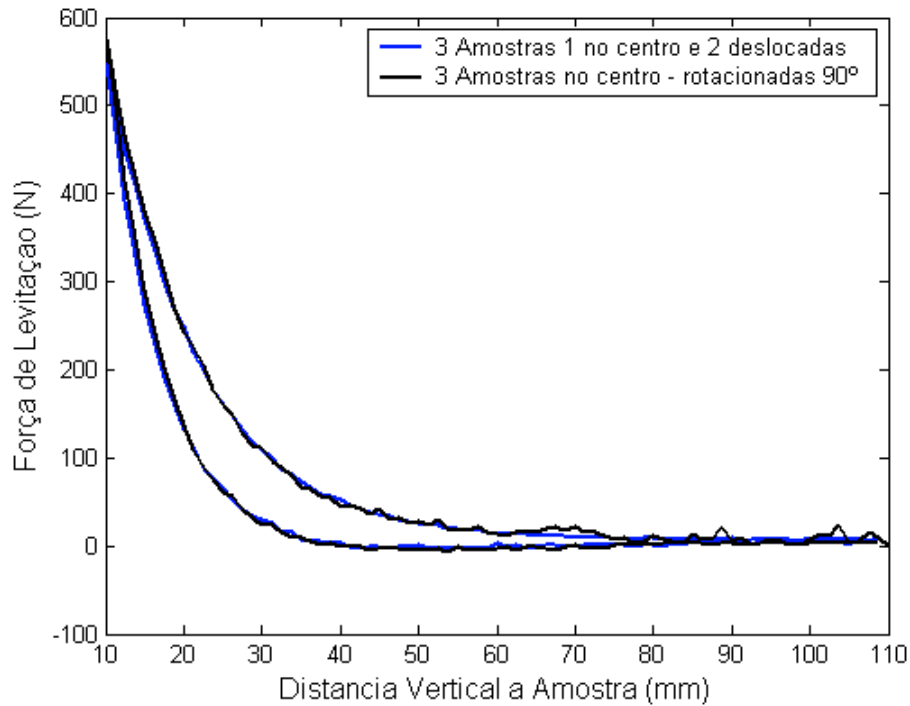


Figura 35 - Comparativo entre as curvas força vs. distância para as duas configurações propostas.

Como pode ser observado, não há diferença significativa entre as curvas, entretanto percebe-se que mesmo que a primeira configuração resulte em uma força total 5% maior, o segundo arranjo se mostra mais conveniente ao atingir uma força por metro 32,4% maior.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1. Conclusão

Este trabalho investigou a melhor configuração do sistema de levitação magnética do veículo MagLev-Cobra. Inicialmente, determinou-se as dimensões que maximizariam a força de levitação magnética utilizando o método de elementos finitos.

Complementarmente, construiu-se um trilho, no qual foram realizadas medidas de densidades de fluxo magnético nas direções x e y e de força de levitação entre o concentrador e o supercondutor.

Finalmente, analisando os valores obtidos em diversas configurações e procedimentos (ZF e ZFC), propõe-se novos arranjos para a construção do concentrador do trilho de levitação magnética, as quais seguem abaixo.

4.2. Trabalhos Futuros

Pelos resultados obtidos, percebe-se que a força máxima de levitação é obtida alinhando o centro do supercondutor (origem da semente) ao concentrador de fluxo magnético. Objetivando multiplicar essa interação, sugere-se que em trabalhos futuros o trilho seja composto por múltiplas unidades concentradoras menores em duas configurações.

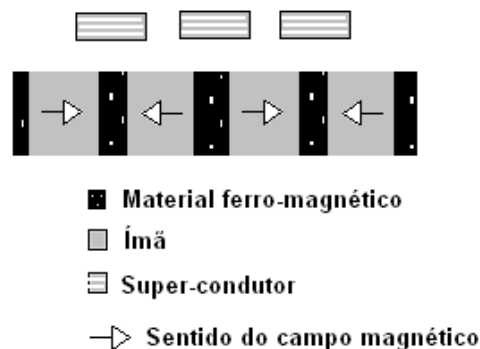


Figura 36- Concentrador de campo magnético proposto.

Na primeira, concentradores são dispostos lado a lado, aproveitando o concentrador proveniente da aproximação das outras duas unidades, como mostra a Figura 36.

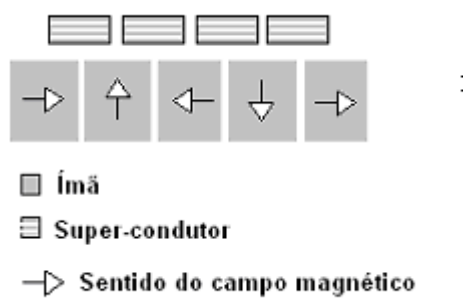


Figura 37- Concentrador de campo magnético proposto (Halbach).

Na segunda, o esquema Halbach é utilizado, acrescentando-se ímãs com magnetização vertical para intensificar o campo magnético, como mostra a Figura 37.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Stephan, R. M., David, E. G., Andrade Jr., R., Sotelo, G. G., Machado, O. J., Haas, O., Werfel, F. A *Full-scale Module of the MagLev-Cobra Hts-Superconducting Vehicle* In: *MagLev'2008 - International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 2008, San Diego. *Proceedings MagLev'2008 - International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives.*, 2008.

[2] - Stephan, R. M., David, E. G., Haas, O., *MagLev-Cobra: An Urban Transportation Solution Using Hts-Superconductores and Permanent Magnets* In: *MagLev'2008 - International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 2008, San Diego. *Proceedings M MagLev '2008 - International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives.*, 2008.

[3] - David, E. G., Stephan, R. M., Touriho, J. F. G., *Etapas para Implantação do Sistema de Transporte de Levitação Magnética Supercondutora M MagLev-Cobra* In: *2º Congresso de Infra-Estrutura de Transportes - Coninfra 2008*, 2008, São Paulo. *Coninfra 2008.*, 2008.

[4] - Cardoso, J.R. - , Primeira Edição, Produção Independente, 1995.

[5] - Azevedo, A. F. M. - *Método do Elementos Finitos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Abril 2003. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/Livro_MEF_AA.htm> Último acesso em: 01 Janeiro 2008.

[6] - Comsol Multiphysics - AC/DC Module User's Guide, Version 3.3, August 2006.

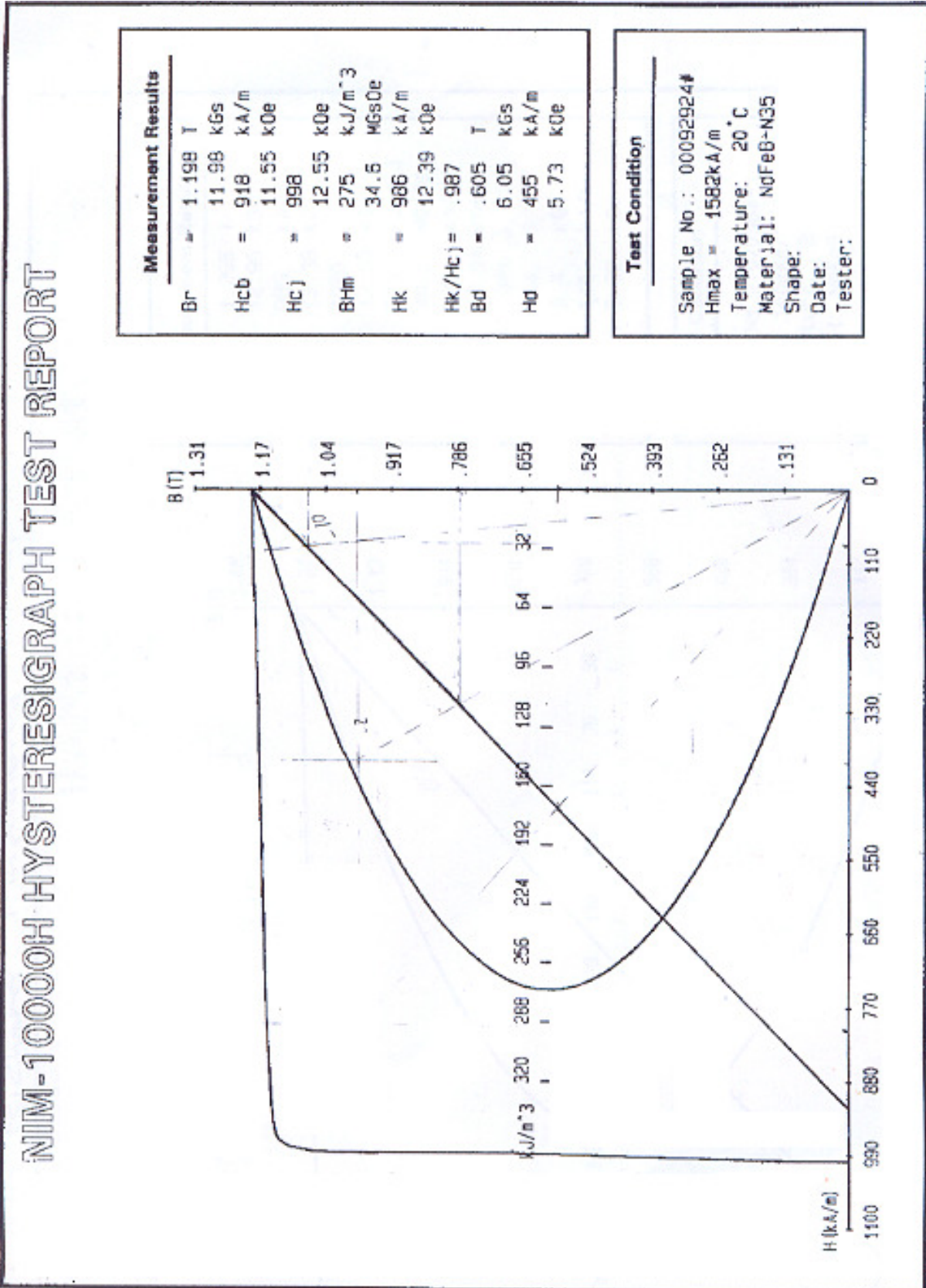
[7] - R. M. Stephan - *Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas*. UFRJ, 2008.

[8] - Disponível em: <<http://www.atz-gmbh.com/>> último acesso em: 20 Dezembro 2008.

[9] - P. V. Ferreira, Automação de um sistema de medidas de levitação magnética. Projeto de graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, Janeiro 2008.

ANEXO I

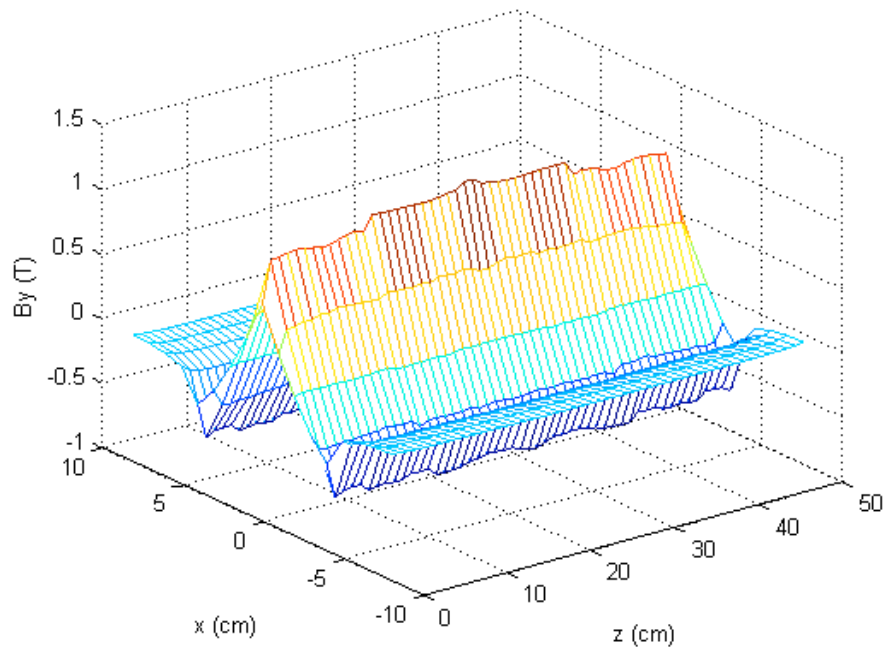
DADOS DO ÍMA UTILIZADO



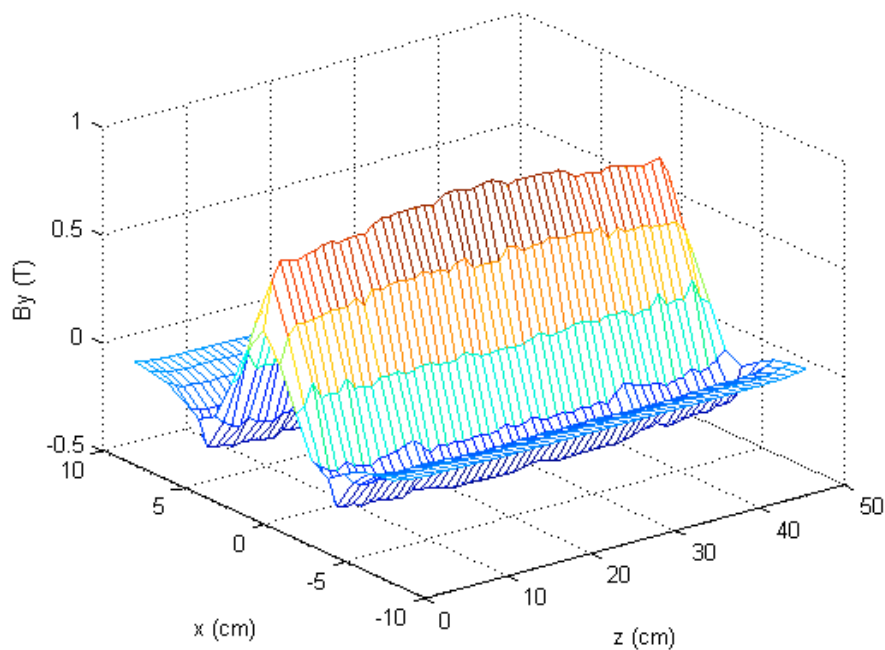
ANEXO II

MEDIDA DO PERFIL DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO, EM ALTURAS DIVERSAS

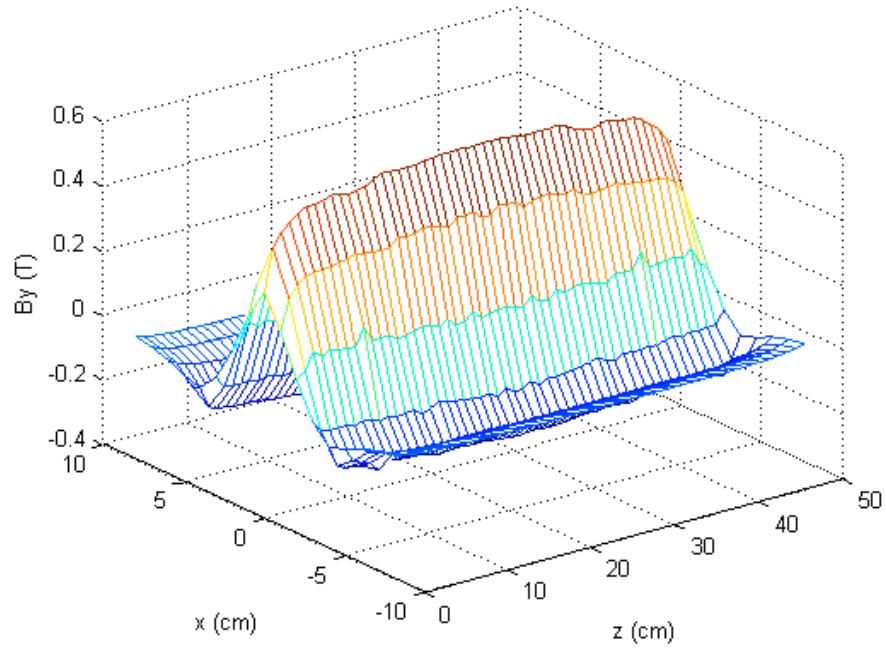
Densidade de fluxo magnético na direção y para distância vertical de 1mm.



Densidade de fluxo magnético na direção y para distância vertical de 6mm.



Densidade de fluxo magnético na direção y e para distância vertical de 11mm.



Densidade de fluxo magnético na direção y e para distância vertical de 16mm.

