



PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO UTILIZANDO LEVITAÇÃO MAGNÉTICA SUPERCONDUTORA

Giancarlo Cordeiro da Costa

Márcio Feres Bessa

Carlos A. C. Cavaliere

Paulo Roberto L. Almeida

Antônio Carlos Ferreira

Roberto Nicolsky

Richard M. Stephan

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cx. Postal 68504- C.E.P. 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ

***Resumo.** A aplicação da supercondutividade apresenta uma forma inovadora nos processos de levitação magnética associados a meios de transporte. Utilizando blocos supercondutores de alta temperatura crítica, o estado de levitação é alcançado através da repulsão por exclusão parcial do fluxo magnético entre um supercondutor e um magneto permanente (ou bobina), possibilitando uma levitação auto-estável verticalmente, além de apresentar estabilidade transversal. Propõe-se a construção de um protótipo trilho-veículo baseado nesta tecnologia utilizando motor linear síncrono e trilhos com seção transversal em "forma de telhado", podendo-se testar curvas e gradientes de até 10%. Resultados numéricos mostrando o comportamento do campo magnético em função da forma da seção dos trilhos são apresentados.*

Palavras-chave. Levitação Magnética; Supercondutor; Trem de Levitação; Motor Linear

1. INTRODUÇÃO

Problemas envolvendo transporte rápido de superfície têm feito com que estudos e investimentos sobre meios alternativos estejam em pauta há alguns anos. Grandes congestionamentos provocados pela saturação das estradas, o esgotamento de aeroportos e o dispêndio de tempos operacionais passivos com aviões, o elevado preço de combustíveis não-renováveis, além da poluição, justificam e estimulam pesquisas para o aperfeiçoamento e utilização de uma tecnologia mais limpa e eficiente.

Neste sentido, a aplicação de levitação magnética, associada a meios de transporte, surge como fonte de grande interesse, onde a falta de contato mecânico e a utilização de um sistema de controle permitem o alcance de altas velocidades de forma segura e com reduzido consumo de energia. Processos de levitação associados a motores de tração linear como o EML (ElectroMagnetic Levitation) – atração eletromagnética – e o EDL (ElectroDynamic Levitation) – repulsão eletrodinâmica – são os sistemas atualmente em desenvolvimento tecnológico, com destaque para a Alemanha e o Japão, respectivamente.

Em anos recentes, o surgimento de blocos supercondutores de alta temperatura crítica viabilizou uma forma de levitação magnética inovadora. A essência deste processo, chamado aqui SQL (Superconducting Quantum Levitation), é a repulsão por exclusão (parcial) do fluxo magnético entre um supercondutor e um magneto permanente (ou bobina). Ao contrário dos outros processos mencionados, o SQL possui uma levitação auto-estável verticalmente devido à condição de equilíbrio entre a força de levitação e o peso, além de apresentar estabilidade transversal, baseada na ancoragem da rede de vórtices, que gera forças restauradoras quando deformada elasticamente.

Comparado a tecnologias convencionais, o veículo utilizando levitação magnética aplicado a sistemas de tração linear ("levmag"), consome cerca de 30% menos energia por passageiro-km do que o trem convencional para um trajeto de 400 km a uma velocidade média de 400 km/h, e 60% menos que o avião para o mesmo trajeto (Gieras, 1994). Ainda, enquanto o trem convencional, em virtude do contato com os trilhos, possui um limite máximo de velocidade da ordem de 400 km/h ("barreira de tração"), o veículo levmag possui um promissor horizonte de expansão de velocidade, podendo vir a ser supersônica se o veículo for posto em um tubo a vácuo parcial (projeto Swissmetro) (Luiz, 1992).

Todas essas vantagens e possibilidades levaram os pesquisadores da COPPE/UFRJ a realizar um estudo mais detalhado desta tecnologia a partir da construção de um protótipo trilho-veículo utilizando motor linear síncrono. O veículo de 30kg é suspenso com o uso de quatro blocos supercondutores que garantem um campo remanente acima de 1 Tesla. Trilhos com 7,5m de comprimento possuem um projeto apropriado constituído de uma seção transversal reta e uma outra em "forma de telhado", objetivando a melhoria das condições de estabilidade. Tal implementação permite testar curva (raio de curvatura de 4m) e gradientes de até 10%, possibilitando avaliar o comportamento dinâmico do sistema em função das variações impostas pelas condições de operação.

A seguir serão apresentados o embasamento teórico associado a esta tecnologia, bem como os primeiros resultados envolvendo a simulação numérica do campo magnético gerado em função da forma da seção dos trilhos.

2. SUPERCONDUTIVIDADE

No início do século, experiências de Karmelringh Onnes sobre o comportamento de metais a baixas temperaturas verificaram que estes perdiam totalmente a sua resistividade quando submetidos a temperaturas muito baixas. Tal propriedade foi chamada supercondutividade, sendo utilizado hélio líquido para que este estado fosse atingido. Esta característica, no entanto, era apenas uma das propriedades fundamentais que caracterizariam o estado supercondutor. Em meados da década de trinta, percebeu-se que, mais que um condutor perfeito, os supercondutores comportavam-se como diamagnetos ideais, ou seja, a baixas temperaturas estes metais expulsavam completamente o fluxo magnético de seu interior, fazendo surgir uma força de repulsão que produzia o estado de levitação. Um diamagneto é um material (ou meio) que possui uma permeabilidade magnética (μ) bastante baixa. No caso dos supercondutores, então descobertos, tal permeabilidade é nula ($\mu = 0$). Assim, da relação clássica do eletromagnetismo

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{1}$$

onde \mathbf{B} é a indução de fluxo magnético e \mathbf{H} é o campo magnético, percebe-se que o fluxo magnético no interior do supercondutor é igual à zero.

A existência deste diamagnetismo ideal, chamado "efeito Meissner", é o que realmente caracteriza o estado supercondutor, diferenciando-o de um condutor ideal (Luiz, 1992). Ou

seja, no interior de um supercondutor, devido ao “efeito Meissner”, $\mathbf{B} = 0$ (Fig.1), enquanto que no interior de um condutor perfeito, nem sempre isso acontece. Pela Lei de Ohm, tem-se:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (2)$$

onde \mathbf{E} é o campo elétrico, ρ é a resistividade e \mathbf{J} é a densidade de corrente. Como em um condutor perfeito a resistividade é nula ($\rho = 0$), a eq. (2) fica:

$$\mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

Com base na equação de Faraday-Lenz

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad (4)$$

tem-se que $\mathbf{B} = \text{cte}$, onde se pode concluir que para um condutor perfeito, o fluxo magnético é constante, mas não necessariamente igual à zero (Luiz, 1992).

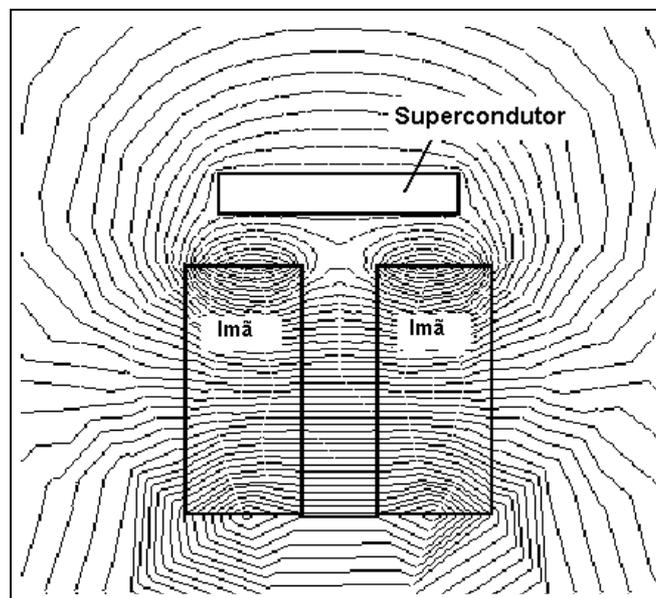


Figura 1 – Efeito Meissner: no interior do supercondutor $\mathbf{B} = 0$

Por outro lado, notou-se que o estado supercondutor era destruído caso alguns parâmetros, chamados “críticos”, fossem superados: temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c), que são propriedades intrínsecas de cada material.

Ainda na década de trinta, foi descoberta uma nova classe de supercondutores, os quais apresentavam dois campos magnéticos críticos, um superior e um inferior, de tal forma que a transição entre o estado supercondutor e o estado normal ocorria suavemente. Ou seja, existia uma faixa de campo, $H_{c1} < H < H_{c2}$, em que o material encontrava-se em um estado misto onde o fluxo magnético não era completamente excluído, havendo uma penetração gradual do campo magnético, chamado “efeito Meissner parcial” (Rose-Innes&Rhoderick, 1988). Esta nova classe de materiais foi denominada supercondutores do “tipo II” (“hard”), enquanto que os que exibiam o “efeito Meissner total” foram chamados de “tipo I” (“soft”). Como vantagem, em relação aos do tipo I, esses supercondutores apresentavam parâmetros críticos mais elevados.

No entanto, a idéia de se utilizar a supercondutividade para fins práticos esbarrava no fato de que os valores de campo magnético eram ainda muito pequenos, além do elevado custo para se produzir e manter as baixas temperaturas. Em meados dos anos oitenta, a descoberta de cerâmicas supercondutoras de alta temperatura crítica surge como uma solução para estes problemas. Além de produzir um campo magnético forte, estas podem ser refrigeradas com a utilização de nitrogênio líquido, o que reduz consideravelmente os custos, se comparados ao uso do hélio líquido, tornando viável sua utilização associada a processos envolvendo levitação magnética, como por exemplo, em meios de transporte.

Por serem supercondutores do tipo II, estas cerâmicas produzem o estado de levitação por exclusão parcial do fluxo magnético gerado por uma fonte que, para o protótipo em questão, são ímãs permanentes. Fica fácil perceber que, por se tratar de uma força de repulsão, o sistema possui uma levitação auto-estável verticalmente devido à condição de equilíbrio entre a força de levitação e o peso. Ainda, o estado misto destes supercondutores é caracterizado pela presença de vórtices (ou pequenas espiras de corrente) que funcionam como dipólos magnéticos que aprisionam o fluxo magnético, criando assim um aumento da resistência ao deslocamento transversal entre o supercondutor e a fonte de campo, dando origem a forças restauradoras quando deformado elasticamente, o que garante uma relativa estabilidade transversal (Luiz, 1992).

Tomando por base estas vantagens e visando melhorar ainda mais as condições de operação, o protótipo apresenta trilhos com uma seção transversal reta e outra em forma de telhado como mostrado na Fig. 2. A Fig. 3 mostra o layout do trilho, suas dimensões e raio de curvatura, podendo-se observar no detalhe o gradiente de inclinação que será variável até 10%. Resultados numéricos apresentando o comportamento do campo magnético em função da forma da seção dos trilhos, bem como a força magnética gerada, serão vistos mais adiante.

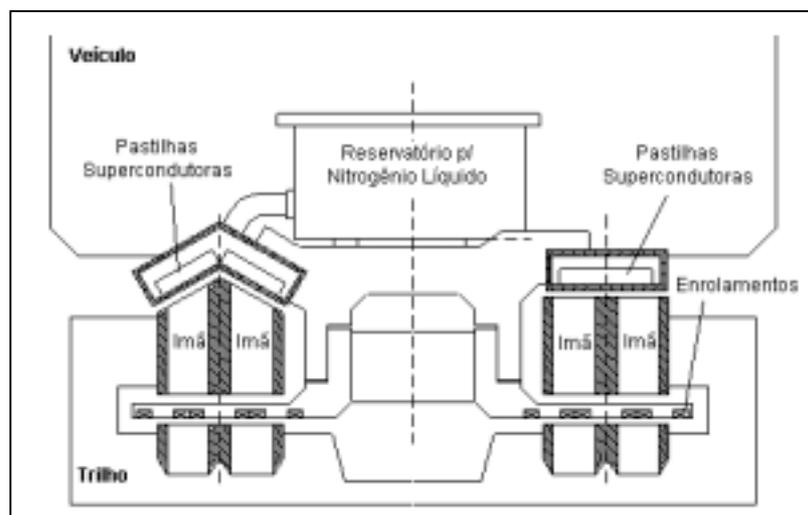


Figura 2 – Seção Transversal dos Trilhos

3. MOTOR

O movimento do veículo sobre os trilhos será feito com a utilização de um motor de tração linear síncrono de ímã permanente (Gieras, 1994; Nasar&Boldea, 1976 e Sinha, 1987). Motores lineares podem ser descritos como um motor cilíndrico normal que foi “aberto”, “desenrolado” e dividido ao longo de um plano radial. O princípio de funcionamento é basicamente o mesmo, só que agora, ao invés de um campo magnético perseguir o outro de forma circular, ele o faz de forma linear, provocando o movimento do veículo.

Como pode ser observado na Fig.2, os enrolamentos do primário encontram-se no veículo, tendo em vista que a velocidade de deslocamento do protótipo é suficientemente baixa para permitir o uso de contatos deslizantes.

O motor será alimentado através de um inversor que permitirá a variação de frequência e da tensão de alimentação. Alguns dados do projeto são:

- Passo polar: 50 mm,
- Potência: 2 kW,
- Densidade de campo magnético: 0,4 T
- Peso do veículo: 30 kg.

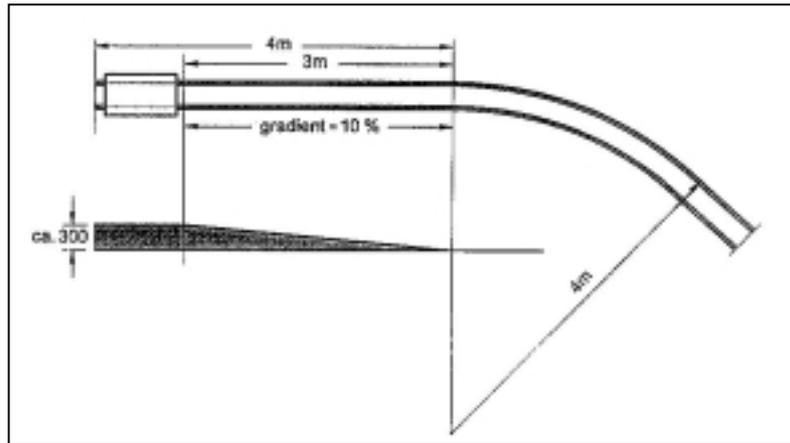


Figura 3 – Layout do trilho

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Na construção do protótipo, o conhecimento da distribuição do campo magnético assim como das forças geradas são instrumentos de grande importância, podendo ser obtidos através de simulação numérica. Neste sentido, no atual estágio do projeto, foi desenvolvida uma modelagem da seção dos trilhos, via método de elementos finitos, sendo utilizado o programa Student's Quickfield, versão 3.2.

Como anteriormente mencionado, os trilhos apresentam um projeto apropriado constituído de uma seção transversal reta e uma outra em forma de um “V” invertido (ou forma de telhado) com uma inclinação de 30° em relação ao seu eixo de simetria, com o objetivo de gerar uma componente radial da força magnética, melhorando assim as condições de estabilidade (Weh, 1998). As Figs. 4 e 5 a seguir mostram as seções dos trilhos, bem como a malha criada no programa, onde se pode observar uma maior densidade de elementos na região de interesse, ou seja, no entreferro, e nas suas vizinhanças.

As características magnéticas dos materiais usados são fornecidos em função da permeabilidade relativa μ_r para casos lineares, ou através da curva de magnetização $B \times H$, específica do material, para casos não-lineares. A permeabilidade relativa é a relação entre a permeabilidade do material e a do ar ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m). Neste aspecto, surge uma das principais dificuldades para simulação de supercondutores, visto que este não é um material normalmente disponível na biblioteca dos programas comerciais. Ainda, caracterizar um supercondutor no estado Meissner total, consistiria em atribuir à região supercondutora uma permeabilidade relativa igual à zero, o que geraria uma indeterminação no cálculo da relutividade ($v = 1/\mu$). Para contornar este problema, na simulação deste estado, considerou-

se uma permeabilidade relativa bastante baixa, $\mu_r = 10^{-6}$. Na representação do estado Meissner parcial, o supercondutor foi tratado como material não-linear, sendo definida a curva de magnetização $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ deste material através do modelo de Bean (Chen&Golfab, 1989; Camacho, et al., 1997).

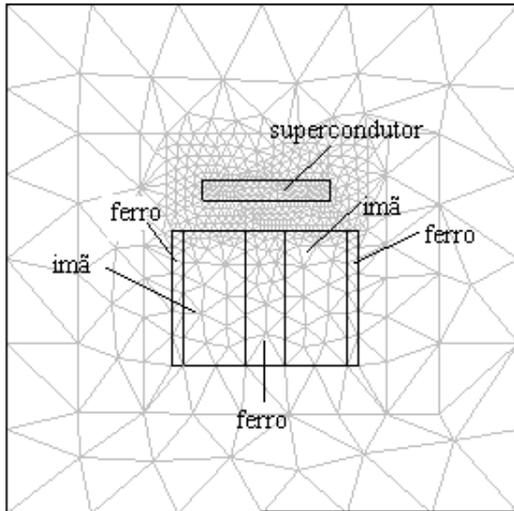


Figura 4 – Malha trilho reto

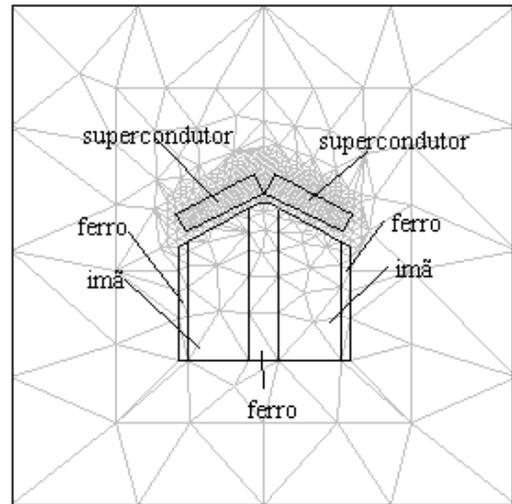


Figura 5 – Malha trilho em forma de telhado

Como fonte geradora de campo magnético, foram considerados ímãs permanentes (SmCo), sendo utilizada a curva de magnetização fornecida pelo fabricante. As Figs. 6 e 7 mostram a distribuição do fluxo magnético no trilho em forma de telhado, para os estados Meissner total e parcial, bem como a orientação, dos dipólos.

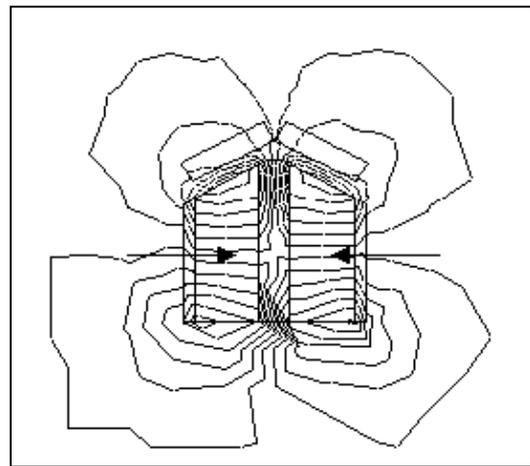
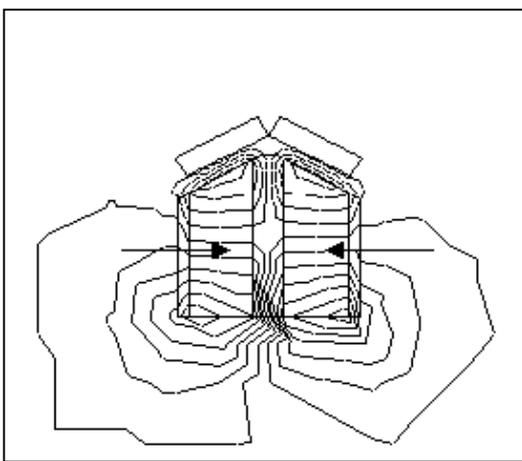
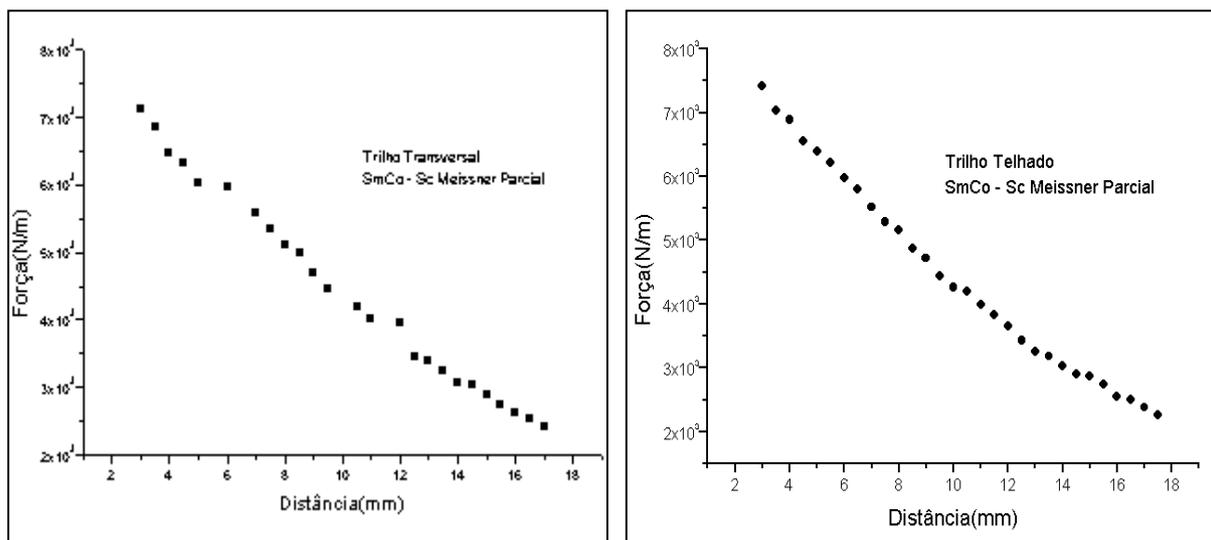


Figura 6 – Linhas de fluxo (Meissner Total) Figura 7 – Linhas de Fluxo (Meissner Parcial)

Conhecida a distribuição do campo magnético, é possível calcular as forças oriundas do mesmo tendo sido utilizado o método baseado no Tensor de Maxwell, o qual determina a força atuante sobre um corpo na superfície que o envolve (onde $\mu = \mu_0$), em função do campo magnético distribuído ao longo desta superfície. A Fig. 8 mostra o comportamento da força em função do entreferro para os trilhos reto e em forma de telhado. Pode-se observar que, apesar da componente radial da força gerada no trilho em forma de telhado, as forças para os dois tipos de seção são equivalentes.



(a) Trilho reto

(b) Trilho em forma de telhado

Figura 8 – Força vertical em função do entreferro

CONCLUSÕES

Os resultados numéricos obtidos mostraram-se bastante coerentes com as expectativas e teoria apresentadas. A seção do trilho em forma de telhado, apesar da componente radial da força gerada, apresenta forças na direção vertical de mesma ordem de grandeza que o trilho reto, surgindo como uma alternativa eficiente na melhoria das condições de estabilidade na direção transversal.

Vale ressaltar que uma das condições essenciais para o estudo e divulgação de uma tecnologia é a sua perspectiva de utilização e desenvolvimento. Neste sentido, a construção do protótipo aqui proposto, além de permitir a monitoração de parâmetros operacionais em função das variáveis do sistema e a sua comparação com resultados numéricos, possibilita difundir a cultura tecno-científica por levitação SQL dando início a um progressivo domínio desta tecnologia, esperando-se, já para fins da próxima década, a sua utilização em escala comercial.

AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ – pelo apoio financeiro, concedido em Julho de 1999, para a construção do protótipo.

REFERÊNCIAS

- Camacho, D., Mora, J., Fontcuberta, J. & Obradors, X., 1997, Calculation of levitation forces in permanent magnet superconductor system using finite element analysis, *Journal of Appl. Physics*, 82(2), 15 July.
- Chen, D. X. & Golgfab, R. B., 1989, Kim Model for Magnetization of Type II Superconductors, *Journal Appl. Physics*, 66(6), 15 Sept.
- Luiz, A.M., 1992, *Aplicações da supercondutividade*, ed. E. Blücher.
- Gieras, J.F., 1994, *Linear induction drives*, Clarendon Press, Oxford.
- Nasar, S.A. and Boldea, L.I., 1976, *Linear motion electric machines*, John Wiley & Sons, New York.

Rose-Innes, A.C. & Rhoderick, E.H., 1988, Introduction to superconductivity, Pergamon Press, Oxford.

Sinha, P.K., 1987, Electromagnetic suspension dynamics & control, IEE control engineering series, v.30., Peter Peregrinus Ltd., England.

Weh, H., 1998, New Maglev Concepts with Magnetically Active Rails, SPEDAM'98

VEHICLE PROTOTYPE USING SUPERCONDUCTING MAGNETIC LEVITATION

Abstract. Application of superconductivity is a promising and innovative technology in the magnetic levitation processes associated to transportation means. Using high T_c superconductor blocks, levitation effect is achieved through the repulsion by partial exclusion of magnetic flux between a superconductor and a permanent magnet, generating a stable suspension in vertical and lateral directions. The construction of a rail-vehicle prototype is proposed, using synchronous linear motor and rail of roof-shaped transverse section, which allows testing curves and gradients up to 10%. Numerical results of magnetic field distribution related with the rail section shape are showed.

Keywords. Magnetic Levitation, Superconductor, Levitation Train, Linear Motor