

CARACTERIZAÇÃO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM MOTOR LINEAR PROJETADO PARA O VEÍCULO MAGLEV-COBRA

Roberto A. H. Oliveira[†], Felipe Costa^{*}, Richard M. Stephan^{*,*}, Paulo R. da Costa[§], Antônio C. Ferreira^{*}

^{*}Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

^{*}MagLev Company Brazil, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

[†]University of Bath, Bath – UK, United Kingdom

[§]Sea Horse, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

e-mail: richard@dee.ufrj.br

Resumo – A obtenção da característica de força x velocidade de um Motor Linear de Indução projetado para veículos de transporte apresenta dificuldade pelo fato do secundário do motor se estender por um percurso longo, não estando confinado a um pequeno espaço, como é o caso dos Motores Rotativos ou mesmo dos Motores Lineares para aplicações em indústrias. Para contornar esta dificuldade, alguns métodos experimentais, com movimento confinado, foram propostos, por exemplo: motores cilíndricos com remoção de alguns polos do primário; bancadas de laboratório nas quais o deslocamento linear é substituído por um disco ou um tambor em rotação e, também, na forma de uma esteira plana em movimento fechado. No caso específico de veículos de Levitação Magnética (MagLev), um problema adicional advém da necessidade de garantir a levitação durante os testes. Isto costuma ser contornado com o uso de rodas de apoio bem lubrificadas, mas, mesmo assim, as medidas de força de tração sofrem com erros introduzidos pelo atrito. Além do mais, a medição da força de atração entre primário e secundário do motor linear apoiado em rodas exige uma adaptação engenhosa na instalação de extensômetros. No presente artigo, descreve-se a realização de um teste de laboratório para comprovar estudos de simulação e de testes com operação confinada de movimento de um Motor Linear para veículos MagLev. Trata-se de um simples procedimento estático, porém capaz de considerar a situação peculiar de um veículo sem contato com o solo na sua real situação de operação. Se a medição da força de tração possui limitação oriunda da baixa frequência de alimentação, compensada apenas com um incremento na razão V/f , em contrapartida, a força de atração entre primário e secundário, extremamente importante em veículos MagLev, revela-se de forma confiável. O método aqui apresentado mostrou-se suficientemente preciso para a escolha do Motor Linear de um veículo de levitação magnética para transporte urbano denominado MagLev-Cobra.

Palavras-chave – Levitação Magnética, Motor Linear, Supercondutividade.

CHARACTERIZATION OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN A

Manuscript received 03/02/2022; first revision 05/02/2022; accepted for publication 05/02/2022, by recommendation of Editor Marcelo Lobo Heldwein. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2022.2.0007>

LINEAR MOTOR DESIGNED FOR THE MAGLEV-COBRA VEHICLE

Abstract – The experimental determination of the force x speed characteristic of a Linear Induction Motor designed for transportation systems presents some difficulties since the motor secondary extends over long distances, not being confined to a small space, as is the case of Rotative Motors or even Linear Motors for industrial applications. To overcome this difficulty, some experimental methods, with confined motion, have been proposed, for example: cylindrical motors without some poles of the the primary; laboratory benches in which linear displacement is replaced by a rotating disk or drum, and also in the form of a flat belt in closed motion. In the specific case of Magnetic Levitation (MagLev) vehicles, an additional problem arises from the need to ensure levitation during tests. This is usually overcome with the use of well-lubricated support wheels, but even then, the pulling force measurements suffer from errors due to friction. Furthermore, measuring the force of attraction between the primary and secondary of the linear motor supported on wheels requires an ingenious adaptation in the installation of strain gauges. In this article, the performance of a laboratory test to prove simulation studies and tests with confined operation motion of a Linear Motor for MagLev vehicles is described. It is a simple static procedure, but capable of considering the peculiar situation of a vehicle without ground contact in its real operating situation. If the traction force measurement has a limitation due to the low power supply frequency, compensated only with an increase in the V/f ratio, on the other hand, the attraction force between primary and secondary, extremely important in MagLev vehicles, reveals itself reliable. The method presented here proved to be sufficiently accurate for choosing the Linear Motor of a magnetic levitation vehicle for urban transportation called MagLev-Cobra.

Keywords – Linear Motor, Magnetic Levitation, Superconductivity.

NOMENCLATURA

δ Espaço de ar entre o primário e o secundário.
 δ_{lev} Espaço de ar entre o criostato e o trilho de ímãs.
 $F_{(x,y)}$ Força de tração, Força repulsão/atração.

I. INTRODUÇÃO

A necessidade de transporte público eficiente, não poluidor, com custos de implantação e manutenção competitivos, faz parte das prioridades do mundo moderno, no qual grande parte da população vive em metrópoles [1]–[3]. Cidades que dispõem de uma extensa malha de metrô subterrâneos são consideradas como modelo de solução. No entanto, o custo de implantação destas vias encontra-se entre R\$100 M e R\$300 M por quilômetro, ou até superior, dependendo do tipo de solo.

A tecnologia MagLev-Cobra propõe um veículo de levitação magnética com articulações múltiplas, que permite efetuar curvas de raios de 50 m, vencer aclives de até 15% e operar em vias elevadas a 70 km/h ou mais [4]. Para obter a levitação, o sistema vale-se da propriedade diamagnética dos supercondutores de elevada temperatura crítica e do campo magnético produzido por ímãs de terras-raras [5], [6]. Esses materiais só foram produzidos a partir do final do século passado. Ainda não existe, até a presente data, um veículo do tipo aqui proposto em uso comercial, o que lhe confere originalidade, oportunidade de inovação e crescimento tecnológico.

Por ser movido à energia elétrica, cuja geração no Brasil é predominantemente de origem hidráulica, o sistema MagLev-Cobra funciona sem a emissão de gases poluentes. Por não depender de atrito mecânico, o MagLev-Cobra, além de menor consumo energético, não produz poluição sonora, podendo se harmonizar com a arquitetura das cidades em vias elevadas, apresentando uma imagem futurista dos locais onde for instalado.

A UFRJ, através da COPPE, vem trabalhando no desenvolvimento desta tecnologia desde o ano 2000 [7], [8]. A evolução encontra-se organizada em 4 etapas [9]:

- i **Prova de Conceito**, que correspondeu à construção de um Protótipo em Escala Reduzida, finalizado em 2006 com o apoio do CNPq, CAPES e FAPERJ. O total de recursos investidos nesta etapa foi da ordem de R\$100 mil.
- ii **Protótipo Funcional**, desenvolvido entre 2008 e 2012 com recursos da FAPERJ e da FUNDAÇÃO COPPETEC, totalizando cerca de R\$ 4.8 M. Esse protótipo objetivou demonstrar a viabilidade técnica do veículo em escala real, sua capacidade de suportar cargas, efetuar curvas, vencer declividades, tudo ainda dentro de um ambiente controlado de laboratório.
- iii **Protótipo Operacional**, para o qual foram levantados recursos de R\$6.5 M do BNDES/FUNTEC. Ao apoio público, somou-se a participação de empresas privadas. Esse protótipo opera atualmente para demonstrações semanais, em uma linha aberta, com 200 m de extensão, para qualquer usuário, dentro do campus da UFRJ (Figura 1). Em suma, trata-se da comprovação da viabilidade operacional do equipamento.
- iv **Industrialização**. A presente etapa. Ela trará o esperado desdobramento para levar o projeto da universidade para a sociedade.

A tração é obtida por ação de um motor linear de indução

de primário curto, objeto do presente artigo.

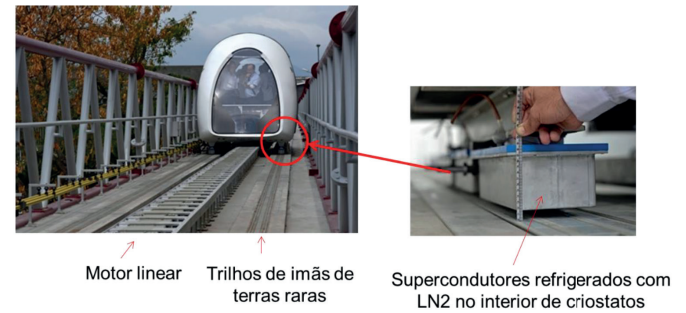


Fig. 1. Resumo gráfico do veículo MagLev-Cobra. Percurso de 200 m em céu aberto. Veículo para 20 passageiros.

II. MOTOR LINEAR

O primeiro motor linear, especialmente projetado para o veículo MagLev-Cobra, possuía uma estrutura em formato “C”, como mostra a Figura 2 [10]. A vantagem dessa proposta inovadora, que resultou em uma patente (PI 1103525-0) [11] concedida pelo INPI em 05/05/2020, está no fato da força de atração entre primário e secundário auxiliar na levitação.

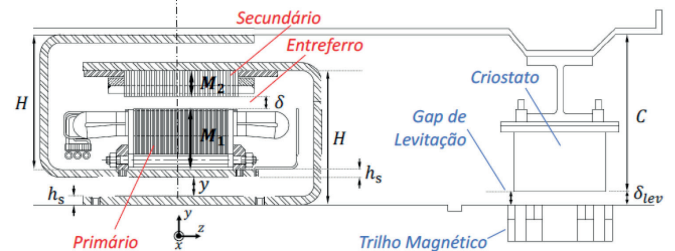


Fig. 2. Motor linear em formato “C”.

No entanto, a aplicação a céu aberto revelou que a dilatação irregular da estrutura elevada, que necessariamente recebe insolação variada ao longo do dia, impossibilitava movimentar o primário do Motor Linear com restrições em δ_{lev} e δ (ver Figura 2) sem o eventual contato de rodas de segurança [12]. A dificuldade reside na restrição em δ_{lev} ser no sentido para baixo, e a restrição em δ , no sentido para cima [13].

A solução definitiva do problema exigiu um estudo especial, desenvolvido como uma tese de doutorado [14]. A estrutura segue um padrão convencional de Motor Linear, como mostrado na Figura 3 [15]–[18]. Dentre os diversos casos avaliados, deu-se especial atenção à manutenção do primário do motor em estrutura em “C”, porém com secundário que garantisse a necessária força de tração, com o mínimo de força de atração [19]. De fato, a qualidade na manufatura do primário do motor original e seu desempenho não justificariam outra escolha. Com esta nova geometria, tanto a restrição em δ_{lev} quanto a restrição em δ estão no mesmo sentido, para baixo, permitindo operar em uma via elevada submetida a deformações elásticas.

Além de estudos de simulação, foram feitos testes experimentais em uma bancada com esteira em movimento fechado, validando o projeto [20], [21]. A implementação na linha de teste de 200 m, mencionada anteriormente, só se tornou viável a partir da concessão, no final de 2021, do apoio financeiro obtido com a aprovação de um projeto submetido

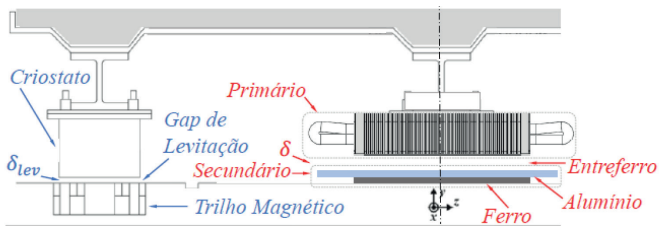


Fig. 3. Motor linear em estrutura convencional.

ao edital de Mobilidade da FAPERJ. Limitações de orçamento acabam sendo fonte de criatividade. Assim sendo, procurou-se manter o máximo possível da estrutura do secundário do motor original (Figura 4).



Fig. 4. Secundário do Motor linear original.

Com isto em mente, surgiram as seguintes alternativas:

- Instalar sobre a estrutura do secundário original um *back-iron laminado* de 25.4 mm (1") de espessura.
- Instalar sobre a estrutura do secundário original um *back-iron maciço* de 25.4 mm (1") de espessura.
- Aproveitar a estrutura do secundário original, completando os **espaços entre as braçadeiras em "C"** com aço 1020 de 15.8 mm (5/8"), na formação do *back-iron*.

As opções (a) e (b) seguem o trabalho de doutorado desenvolvido por Oliveira [14]. O secundário original serviria apenas como infraestrutura de suporte para a instalação. A opção (c) levaria a uma espessura de *back-iron* menor, porém muito mais econômica, pois o secundário original estaria sendo aproveitado também magneticamente. Esta opção não havia sido objeto do trabalho supracitado. Além disso, desejava-se avaliar a possibilidade de depositar sobre o *back-iron* dois condutores diferentes:

- Folha de alumínio (Al) de 6.35 mm (1/4") de espessura
- Folha de cobre (Cu) de 4.76 mm (3/16") de espessura

A opção (d) foi simulada e testada com o auxílio de uma esteira rotativa. Já a opção (e) havia sido apenas simulada.

Para cada uma das 3 possibilidades de *back-iron* existem 2 possibilidades de folha de material condutor, resultando um total de 6 possibilidades, porém, como será visto, nem todas precisarão ser testadas. Para escolher com segurança a opção que levasse à menor relação custo/benefício, foram conduzidas as experiências descritas no próximo item.

III. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A Figura 5 apresenta os principais elementos da montagem experimental:

- Talha com balança (amarela) suportando o primário do ML como se levasse,
- Secundário fixado em uma laje de concreto,
- Balança (vermelha) para medição da força de tração e
- Inversor eletrônico (lado direito) para alimentação do primário do ML.

Os testes realizados com as rodas sobre trilhos (Figura 6) eram de fácil posicionamento, porém apresentaram erros na força de tração devido ao atrito e impossibilitavam a medida da força de atração. Sem trilhos e rodas para guiamento, o posicionamento do primário, perfeitamente alinhado sobre o secundário, exigiu alguma destreza.



Fig. 5. Principais elementos da montagem de teste experimental.



Fig. 6. Estrutura com rodas de guiamento e suporte: fácil mas com resultados incompletos.

A. Cuidados no Procedimento Experimental

1) *Cuidados Mecânicos*: O primário e sua estrutura de suporte pesam 180 kgf. A talha com comando elétrico permite levantar e abaixar a estrutura. Mesmo assim, o ajuste do entreferro, em valores variando de 10 mm a 30 mm, representou um grande desafio na realização dos testes.

2) *Compensação da Razão V/f*: O inversor CFW-11 da WEG recebe alimentação trifásica em 440 V, 60 Hz. Ele foi ajustado para alimentar o motor linear que possui frequência nominal 25 Hz, 440 V. Foram empregadas baixas frequências de alimentação, variando entre 1 e 7 Hz.

Como mostra a Figura 7, mantida a razão V/f constante, o torque (força, no caso de um motor linear) sofre uma

perda para baixas frequências de alimentação, consequência da maior influência da queda de tensão resistiva. Para a necessária compensação em baixas frequências, vale-se de um incremento nesta razão (Figura 8). No presente trabalho, foi adotado o ajuste 4, em uma escala que vai de 0 a 9 no parâmetro P136 do inversor CFW-11. Admitindo-se que esta compensação eleva a força ao seu valor máximo, os pontos medidos com velocidade zero e baixas frequências de alimentação correspondem aos pontos da curva de força na região linear, aquela região de baixa velocidade de escorregamento (Figura 9).

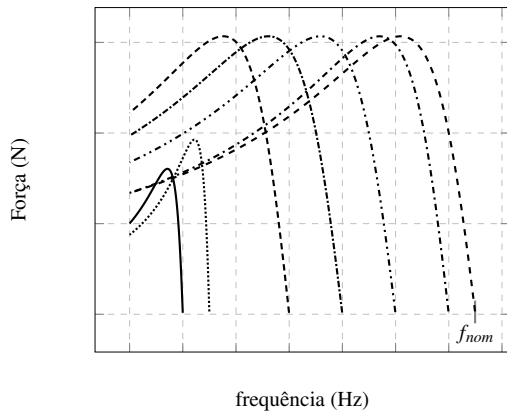


Fig. 7. Curvas torque \times velocidade com V/f constante.

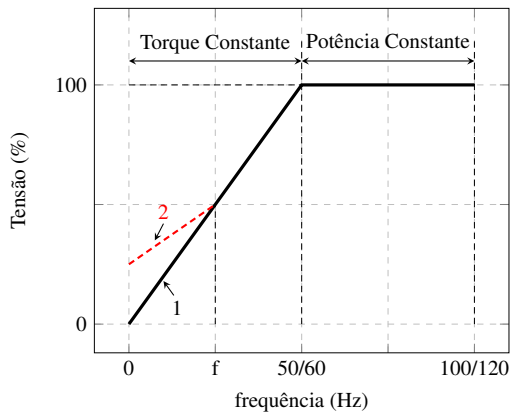


Fig. 8. Compensação da razão V/f para baixas frequências de alimentação.

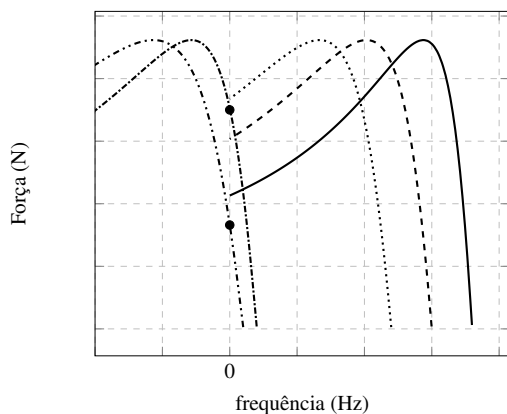


Fig. 9. Curvas de força com V/f compensada e situação de teste estacionário para baixas frequências.

B. Influência do Material Condutor (Al ou Cu)

A resistência do condutor empregado no secundário determina a inclinação da curva de força nas regiões de baixa velocidade de escorregamento. Nessas regiões de baixo escorregamento, a curva pode ser aproximada por uma reta. Assim, com Cobre, o coeficiente angular dessa reta é maior do que com Alumínio. O valor máximo da força, no entanto, depende principalmente da indutância de dispersão, não se esperando um ganho significativo de força pela escolha do material condutor. O principal efeito encontra-se no fato que o melhor condutor permitirá o mesmo valor de força com uma menor velocidade de escorregamento, isto não significando necessariamente uma menor corrente.

C. Forças de Atração e Repulsão Verticais

As correntes circulantes no primário do motor linear criam um fluxo magnético que atravessa o *back-iron* provocando uma força de atração. Simultaneamente, as correntes induzidas na folha condutora de Alumínio ou Cobre produzem uma força de repulsão, que será tanto maior quanto maior for a frequência de alimentação. Descontado o peso da estrutura, a força de atração é a resultante dessas duas forças eletromagnéticas opostas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os primeiros testes objetivaram a escolha do tipo de *back-iron* mais apropriado. Para tanto, trabalhou-se com a folha condutora de Alumínio. Os resultados experimentais estão apresentados nas Tabelas I, II e III.

TABELA I
Back-Iron Maciço

Chapa de Al 1/4" - f_n (P043) = 25 Hz-Comp. V/f (P136) = 4							
Gap=20mm				Gap=25mm			
f (Hz)	F_x (kgf)	i (A)	F_y (kgf)	f (Hz)	F_x (kgf)	i (A)	F_y (kgf)
1,2	31	37	-104	1,2	21	43	-64
1,3	-	-	-	1,3	23	43	-64
1,6	-	-	-	1,6	27	43	-64
1,9	-	-	-	1,9	30	44	-61
2,5	54	39	-83	2,5	36	45	-55
3,5	60	41	-67	3,5	44	46	-45
4,1	63	43	-59	4,1	46	46	-39
4,8	65	44	-49	4,8	49	47	-34
5,1	67	45	-45	5,1	50	48	-31
5,5	69	46	-42	5,5	50	48	-30
6,0	70	47	-37	6,0	52	49	-23

Inicialmente, comparando os resultados das Tabelas I e III, observa-se que o pequeno ganho que se consegue em termos de força de tração com o *back-iron* laminado não compensa o custo maior comparativamente ao *back-iron* maciço. Além disso, a força de atração aumenta, significando uma maior carga para o sistema de levitação do veículo MagLev-Cobra.

Comparando-se os resultados das Tabelas I e II, constata-se que os resultados com *back-iron* preenchido diferem muito pouco dos com *back-iron* maciço, representando uma economia de material, sem a necessidade de superposição da barra de aço maciça. Para facilitar a comparação, os resultados são apresentados como gráficos, nas Figuras 10 e 11. Em vista destes resultados, optou-se pelo *back-iron* preenchido (Figura 12).

TABELA II
Back-Iron Preenchido

Chapa de Al 1/4" - f_n (P043) = 25 Hz-Comp. V/f (P136) = 4							
Gap=20mm				Gap=25mm			
f (Hz)	F_x (kgf)	i (A)	F_y (kgf)	f (Hz)	F_x (kgf)	i (A)	F_y (kgf)
2,5	42	38	-78	2,5	39	42	-63
3,5	50	40	-63	3,5	47	44	-52
4,1	55	42	-54	4,1	51	45	-43
4,8	59	43	-46	4,8	54	46	-36
5,1	61	44	-42	5,1	56	47	-32
5,5	63	45	-38	5,5	57	48	-30
6,0	65	46	-33	6,0	58	49	-26
7,0	68	47	-24	7,0	60	49	-22
7,3	69	48	-23	7,3	61	50	-19

TABELA III
Back-Iron Laminado

Chapa de Al 1/4" - f_n (P043) = 25 Hz-Comp. V/f (P136) = 4			
Gap=25mm			
f (Hz)	F_x (kgf)	i (A)	F_y (kgf)
1,2	31	43	-97
1,3	31	38	-93
1,9	33	42	-79
2,5	38	44	-60
3,5	38	44	-60
4,1	47	46	-45
4,8	55	47	-40
5,1	55	47	-37
5,5	57	48	-35

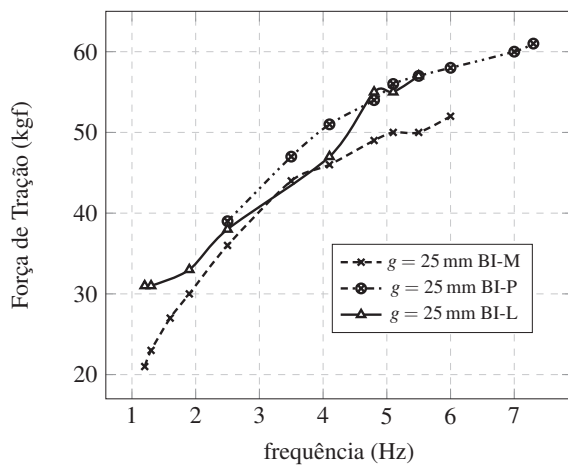


Fig. 10. Força de Tração: Secundário com *back-iron* maciço (BI-M), preenchido (BI-P) e laminado (BI-L) com lâmina de Al=1/4". De acordo com as Tabelas I, II e III.

Uma vez optado pelo *back-iron* preenchido, passou-se a testes mais cuidadosos, comparando os resultados com folha condutora de Alumínio e com folha de Cobre (Figura 13), apresentados nas Tabelas IV e V, respectivamente.

Comparando-se os resultados das Tabelas IV e V, constata-se um aumento na força de tração do Cobre em relação ao Alumínio para os mesmos valores de frequências de alimentação (no teste estacionário, essa frequência corresponde à velocidade de escorregamento), porém com pouca diferença em relação aos valores máximos. Existe também uma diminuição na força de atração. Porém, o preço do Cobre é no mínimo 3 vezes maior que o preço do Alumínio

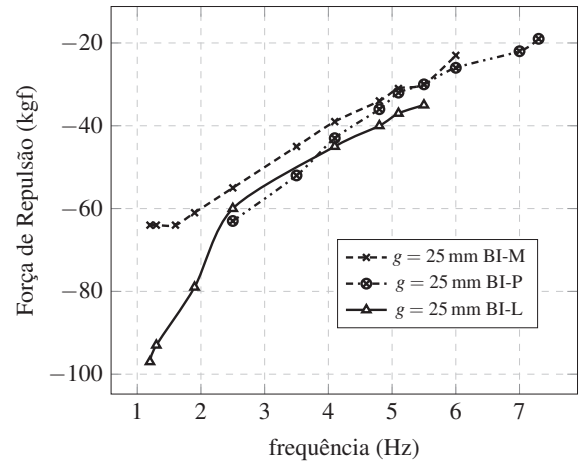


Fig. 11. Força de Atração: Secundário com *back-iron* maciço (BI-M), preenchido (BI-P) e laminado (BI-L) com lâmina de Al=1/4". De acordo com as Tabelas I, II e III.



Fig. 12. *Back-iron* com preenchimento.

– conforme a cotação da tonelada de Cu (R\$ 9.678,00) e Al (R\$ 3.110,00) obtida em 28/01/2022 através do site da Sanfro –, não havendo justificativa para sua escolha.

Avaliou-se uma solução híbrida, com Cobre nas estações, para aumentar a força de tração nos instantes de aceleração ou frenagem, e Alumínio ao longo do restante da via. Mas essa solução não atende ao trajeto estudado que, por possuir declividade, exige força de tração ao longo de toda a trajetória e não apenas nos pontos iniciais e finais do percurso.



Fig. 13. *Back-iron* com preenchimento e folhas de Alumínio (esq.) e Cobre (dir.).

V. CONCLUSÕES

A análise dos resultados levou à escolha do secundário com preenchimento feito de placas de aço 1020 maciço de 15.8 mm (5/8") de espessura e folha de alumínio de 4.76 mm (3/16"). Comparativamente à instalação de um novo secundário, a solução com preenchimento do secundário existente resultou

TABELA IV
Back-Iron Preenchido

Chapa Al = 6.35 mm (1/4") - P(136) = 4									
Gap=10mm				Gap=20mm			Gap=30mm		
f(Hz)	F _x (kgf)	i(A)	F _y (kgf)	F _x	i	F _y	F _x	i	F _y
1,2	35	33	-121	19	41	-62	16	44	-53
1,4	40	33	-114	22	42	-62	19	44	-52
1,6	42	34	-107	25	42	-60	21	45	-51
1,8	48	34	-103	27	43	-59	24	45	-50
2,0	50	35	-100	30	43	-57	26	46	-49
2,5	54	36	-84	35	44	-52	30	47	-44
3,0	57	37	-76	39	44	-46	33	47	-40
3,5	62	38	-65	42	45	-41	36	47	-36
4,0	66	40	-57	44	45	-36	38	47	-31
5,0	72	43	-43	50	47	-26	40	49	-23

TABELA V
Back-Iron Preenchido

Chapa Cu = 4.76 mm (3/16") - P(136) = 4									
Gap=10mm				Gap=20mm			Gap=30mm		
f(Hz)	F _x (kgf)	i(A)	F _y (kgf)	F _x	i	F _y	F _x	i	F _y
1,2	45	35	-84	30	39	-57	24	42	-45
1,4	49	36	-77	34	40	-54	27	43	-42
1,6	53	37	-71	37	41	-52	30	44	-40
1,8	56	37	-65	40	42	-50	32	45	-38
2,0	57	38	-63	41	42	-44	34	45	-34
2,5	63	40	-48	44	43	-42	40	47	-26
3,0	67	43	-38	50	46	-28	40	49	-23
3,5	70	45	-28	52	47	-24	41	50	-19
4,0	72	47	-19	54	49	-18	45	51	-10
5,0	75	50	-7	57	53	-4	45	51	-2

em uma economia da ordem de R\$ 3.000,00 por metro de motor linear. Serão necessários dois primários para conduzir o veículo MagLev-Cobra, que pode chegar a 5000 kg, ao longo de uma rampa de 1%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERJ pelo apoio financeiro concedido nos editais PENSA RIO 2014 e MOBILIDADE 2021; aos técnicos Carlos Henrique da Silva Fernandes, Renato dos Santos Lopes e Edeval Vieira Gangá, que tiveram participação decisiva na execução dos ajustes experimentais; e ao Dr. Ivan Chabu, pelas discussões técnicas.

REFERÊNCIAS

[1] A. Sikora, "European Green Deal—legal and financial challenges of the climate change", in *Era Forum*, vol. 21, pp. 681–697, Springer, Nov 2021, doi: 10.1007/s12027-020-00637-3.

[2] G. Maris, F. Flouros, "The green deal, national energy and climate plans in Europe: Member States' compliance and strategies", *Administrative Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 75, Jun 2021, doi: 10.3390/admsci11030075.

[3] D. Gielen, "Energy technology perspectives", *Paris: International Energy Agency*, Dez 2008.

[4] G. Sotelo, R. A. H. Oliveira, F. Costa, D. H. Dias, R. de Andrade Jr, R. M. Stephan, "A full scale superconducting magnetic levitation (MagLev) vehicle operational line", *IEEE Transactions on Applied*

Superconductivity, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, Nov 2014, doi:10.1109/TASC.2014.2371432.

[5] F. C. Moon, *Superconducting levitation: applications to bearings and magnetic transportation*, John Wiley & Sons, 2008.

[6] H.-S. Han, D.-S. Kim, "Magnetic levitation", *Springer Tracts on Transportation and Traffic Springer Netherlands*, vol. 247, 2016, doi:10.1007/978-94-017-7524-3.

[7] R. M. Stephan, A. C. Ferreira, R. de Andrade Jr, L. Rolim, M. Neves, M. Moreira, M. Rosário, O. Machado, R. Nicolsky, "Um Protótipo Brasileiro de Trem de Levitação Magnética", *Eletrônica de Potência*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, Jun 2003.

[8] R. M. Stephan, R. de Andrade Jr, A. C. Ferreira, G. Sotelo, "Superconducting levitation applied to urban transportation", *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, pp. 1–18, Fev 2017, doi:10.1002/047134608X.W8346.

[9] R. M. Stephan, "MagLev-Cobra: Tecnologia de levitação magnética no Brasil", *Ciência Hoje*, vol. 55, no. 325, pp. 20–25, Mai 2015.

[10] D. Gomes, I. E. Chabu, "Magnetic induction modulation analysis in the linear induction motor yoke", in *Proc. 22nd Int. Conf. Magnetically Levitated Syst. Linear Drives*, pp. 1–9, Set 2014.

[11] UFRJ, "Motor Linear Aplicado a Veículos de Transporte por Levitação Magnética", 05-05-2020, May 5 2020, URL: patents.google.com/patent/BRPI1103525A2.

[12] G. Sotelo, R. de Andrade Jr, D. H. Dias, A. C. Ferreira, F. Costa, O. Machado, R. A. H. Oliveira, M. Santos, R. M. Stephan, "Tests with one module of the Brazilian Maglev-Cobra vehicle", *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 3601204–3601204, Jan 2013, doi:0.1109/TASC.2013.2237875.

[13] L. S. Mattos, *Estudo de tração de um veículos de levitação magnética supercondutora: Contribuição a certificação do MAGLEV-COBRA*, Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Jun 2015.

[14] R. A. H. Oliveira, *Estudo teórico e experimental de um sistema de tração utilizando motor de indução linear para veículos de levitação magnética supercondutora*, Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Dez 2018.

[15] Z. Sun, L. Xu, W. Zhao, K. Du, "Comparison Between Linear Induction Motor and Linear Primary Permanent Magnet Vernier Motor for Railway Transportation", in *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, pp. 1–6, Jul 2021, doi:10.1109/LDIA49489.2021.9505835.

[16] E. Laithwaite, "Linear induction motors", *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering*, vol. 104, no. 18, pp. 461–470, Dez 1957, doi:10.1049/pi-a.1957.0115.

[17] G. E. Dawson, A. R. Eastham, J. F. Gieras, R. Ong, K. Ananthasivam, "Design of linear induction drives by field analysis and finite-element techniques", *IEEE transactions on industry applications*, , no. 5, pp. 865–873, Set 1986, doi:10.1109/TIA.1986.4504805.

- [18] Q. Lu, Y. Li, Y. Ye, Z. Zhu, “Investigation of forces in linear induction motor under different slip frequency for low-speed maglev application”, *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 28, no. 1, pp. 145–153, Nov 2012, doi:10.1109/TEC.2012.2227114.
- [19] G. Lv, D. Zeng, T. Zhou, Z. Liu, “Investigation of Forces and Secondary Losses in Linear Induction Motor With the Solid and Laminated Back Iron Secondary for Metro”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4382–4390, Mai 2017, doi:10.1109/TIE.2016.2565442.
- [20] R. A. H. Oliveira, R. M. Stephan, A. C. Ferreira, “Optimized linear motor for urban superconducting magnetic levitation vehicles”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 5, pp. 1–8, Fev 2020, doi:10.1109/TASC.2020.2976589.
- [21] R. A. H. Oliveira, R. M. Stephan, A. C. Ferreira, J. Murta-Pina, “Design and innovative test of a linear induction motor for urban MagLev vehicles”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6949–6956, Set 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3023066.

DADOS BIOGRÁFICOS

Roberto A. H. Oliveira, formado em Engenharia Elétrica recebeu o título de M.Sc. em 2013 e de D.Sc. em 2018 (COPPE/UFRJ) com parte da formação tendo sido realizada no IFW-Dresden, Alemanha. Trabalhou na Thyssenkrupp e Otis com motores síncronos e assíncronos. Atuou no projeto MagLev-Cobra entre os anos 2012-2018 na área de propulsão com motores lineares e sistemas de regeneração de energia. Pesquisador na Faculdade de Ciências e Tecnologia de Lisboa (Portugal) entre os anos de 2019-2021, foi pesquisador convidado no ICMAB (Espanha), UEx (Espanha) e KIT (Alemanha). Atualmente é pesquisador associado no Institute for Advanced Automotive Propulsion Systems na University of Bath, Inglaterra.

Felipe Costa, Felipe Costa, formado em Engenharia Mecânica, pós graduado em Engenharia mecatrônica (POLI/UFRJ), possui título de mestrado em Engenharia Mecânica (COPPE/UFRJ) obtido em 2018. Trabalhou no

projeto MagLev-Cobra de 2008 a 2020 como pesquisador e engenheiro de projetos desenvolvendo P&D nas áreas de criogenia, supercondutividade e transporte. Atualmente atua de forma independente como CEO da Maglev Company Brazil representando esta tecnologia de transporte frente ao mercado.

Richard M. Stephan, formado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 1976. Possui o título de M.Sc. pela COPPE/UFRJ (1980) e Dr.-Ing. pela Ruhr-Universität Bochum, Alemanha (1985), ambos em Sistemas de Controle. Concluiu MBA (2005) como bolsista Chevening do Conselho Britânico, UK, em Transferência e Comercialização de Inovações Tecnológicas. Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ desde 1997, trabalha com projetos nas áreas de Acionamento Eletrônico, Controle de Máquinas Elétricas, Levitação Magnética e Supercondutividade. Membro da SOBRAEP (Associação Brasileira de Eletrônica de Potência), da qual foi presidente no triênio 2007-2009, Pesquisador Sênior do CNPq e Membro da Academia Nacional de Engenharia.

Paulo R. da Costa, possui graduação em Engenharia Mecânica pela Fundação Técnico Educacional Souza Marques (1981), mestrado e doutorado em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004 e 2011 respectivamente. Atualmente é diretor da empresa Seahorse- Energia das Ondas Ltda. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica. Responsável técnico em dois projetos de geração de eletricidade pelas ondas do mar, junto à COPPE/UFRJ. Tem vinte e cinco anos de experiência na indústria mecânica de fabricação, particularmente nas áreas de projetos de máquinas e processos de fabricação como usinagem, soldagem, fundição e caldeiraria e dez anos de experiência didática.

Antônio C. Ferreira, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1987), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991) e doutorado em Engenharia Elétrica - University of Cambridge (1996). Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência.