



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MOTORES DE INDUÇÃO LINEARES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Isabela Fernanda Natal Batista Abreu

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Rio de Janeiro

DEZEMBRO de 2011

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MOTORES DE INDUÇÃO LINEARES  
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Isabela Fernanda Natal Batista Abreu

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA  
ELETRICISTA.

Examinada por:

---

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.  
(Orientador)

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.Ing.

---

Prof. Sebastião E. M. de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO de 2011

Aos meus pais, Márcia e Fernando, e à minha irmã, Beatriz.

Muito obrigada por todo o amor e dedicação!

Amo vocês!

# Agradecimentos

A Deus, pela minha vida e por estar sempre comigo, mesmo nos momentos mais difíceis. É dEle a vitória alcançada na minha vida.

À minha mãe, Márcia, minha melhor amiga, minha referência e meu alicerce, por “viver” a faculdade comigo, me incentivar e apoiar em todas as minhas escolhas e por me ensinar que mais importante que todo o conhecimento é o caráter e a retidão. Ao meu pai, Fernando, por ter despertado em mim o interesse pela engenharia e por seu apoio e carinho.

À minha irmã e amiga, Beatriz, por ser tão importante em minha vida, por compartilhar comigo todos os momentos. Por ser quem eu tenho de mais precioso.

Ao meu namorado, Thiago, por seu amor, carinho e apoio, e por ser meu grande amigo, dividindo comigo as experiências ao longo da nossa formação acadêmica.

Ao meu afilhado, Alexandre Júnior, pelo seu amor e pela sua pureza de criança.

Ao meu orientador, Antonio Carlos Ferreira, por sua orientação e incentivo e por sua grande contribuição em minha formação acadêmica.

À minha co-orientadora, Gisella Margarita Vizñhay Zambrano, que, mesmo à distância, não deixou de me orientar e acreditar em mim.

Ao Professor Richard Magdalena Stephan, por ter sido meu primeiro orientador e pelos seus ensinamentos. E a todos os alunos, engenheiros, professores e técnicos do LASUP, em especial Alan Endalécio, Daniel Henrique, Felipe Costa, Felipe Sass, Felliipe Lessa, Flávio Goulart, Guilherme Sotelo, Jardel Camelo, José Dálvio, Marcos Dantas, Ocione José, Renan Fernandes, e Rubens de Andrade, por todo o apoio, por serem sempre solícitos em me ajudar e pelo grande incentivo.

Ao engenheiro Ricardo Cerbino, pela ajuda ao longo das etapas de simulação.

Aos meus colegas de turma, Beatriz, Gustavo, João, Márcio e Pedro Sardella, com os quais compartilhei os momentos divertidos, e também os dias de cansaço fazendo trabalhos e relatórios. E especialmente ao amigo Leonardo Luiz, pela ajuda e parceria nos trabalhos em grupo e por sua amizade. E à amiga Sylmara Suellen pois, mesmo à distância, nossa amizade continua forte e sincera.

*"Mais ágil que todo o movimento, é a sabedoria: ela atravessa e penetra tudo, graças à sua pureza. Ela é um sopro do poder de Deus, uma irradiação límpida da glória do Todo-Poderoso; assim nenhuma mancha pode insinuar-se nela. É ela uma efusão da luz eterna, um espelho sem mancha da atividade de Deus, e uma imagem de sua bondade. Embora única, tudo pode; imutável em si mesma, renova todas as coisas."*

***Sabedoria 7, 24-27***

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista:

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MOTORES DE INDUÇÃO LINEARES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Isabela Fernanda Natal Batista Abreu

DEZEMBRO de 2011

Orientador: Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Os motores elétricos lineares são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, permitindo um movimento de translação dos aparatos que se desejam tracionar ou propulsionar. Os motores lineares podem ser utilizados para diversos fins, dentre eles a tração elétrica de trens de levitação magnética, como o Maglev-Cobra, trem de levitação magnética supercondutora desenvolvido no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da COPPE/UFRJ. Neste caso, não existe contato para a transmissão de força, motivo pelo qual são usados motores lineares.

Este trabalho tem como objetivos a comparação dos resultados de densidade de fluxo magnético obtidos via simulação com os valores medidos no M.I.L. de secundário do tipo placa de alumínio, presente no Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq) da UFRJ; a investigação do efeito da variação de alguns parâmetros no desempenho do motor; e a determinação das forças de tração e repulsão de Motores de Indução Lineares com diferentes características construtivas e elétricas. Para tanto, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos (M.E.F.), através do software comercial ANSYS®.

*Palavras-Chave:* Motor de Indução Linear; Método dos Elementos Finitos; Modelagem Matemática; Simulação

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2</b>	<b>MOTORES DE INDUÇÃO LINEARES .....</b>	<b>6</b>
2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....	6
2.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO .....	7
2.2.1	<i>Circuito Equivalente .....</i>	<i>9</i>
2.2.2	<i>Efeito Longitudinal de Extremidade .....</i>	<i>12</i>
<b>3</b>	<b>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>16</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	16
3.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO PROJETO.....	16
3.3	FORMULAÇÃO DO MEF EM PROBLEMAS DE ELETROMAGNETISMO – ANÁLISE BIDIMENSIONAL .....	17
3.4	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MALHA .....	19
3.5	MÉTODOS DE CÁLCULO DE FORÇA.....	20
3.5.1	<i>Lei de Força de Ampère .....</i>	<i>21</i>
3.5.2	<i>Método dos Tensores de Maxwell.....</i>	<i>21</i>
3.5.3	<i>Método do Trabalho Virtual.....</i>	<i>23</i>
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
4.2	MOTORES SIMULADOS.....	28
4.3	ETAPAS DA SIMULAÇÃO.....	29
4.3.1	<i>Simulação e Mapeamento da Densidade de Fluxo na Superfície do Motor 1 .....</i>	<i>29</i>
4.3.2	<i>Obtenção dos Resultados de Força para o Primário do Motor 2, com Secundário do Tipo Placa de Alumínio.....</i>	<i>34</i>

4.3.3	<i>Simulação do Motor 2 com Secundário do Tipo Gaiola de Esquilo e Comparação das Forças Simuladas com as Medidas</i>	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE I</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE II</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE III</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE IV</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE V</b>	<b>102</b>



## Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 – Motor de Indução Linear com enrolamento de estator em camada simples, para propulsão de uma boia. Protótipo presente no LabMaq –UFRJ. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.2 - Motor de Indução Linear com enrolamento de armadura em camada dupla e secundário do tipo gaiola de esquilo, para tração e levitação de um módulo do veículo Maglev-Cobra. Fonte:[4] .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.1 - Obtenção de um Motor de Indução Linear Plano a partir do Corte Radial de um Motor de Indução Rotativo. ....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2 - Circuito Equivalente de uma Máquina de Indução Linear Ideal, desprezando-se os Efeitos Longitudinais de Extremidade .....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.3 - Circuito Equivalente de Thévenin da Máquina de Indução Linear, visto dos terminais a e b ..</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.4 - Fluxo de Potência em um Motor de Indução Linear .....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.5 - Envoltórias das Curvas da Componente Normal da Densidade de Fluxo Magnético ao Longo do Eixo z para Diferentes Valores de Escorregamento .....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.1 - Eixos cartesianos x, y e z.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.2 - Definição da condição de contorno <math>A_z = 0</math> .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.3 - Elementos quadrilátero e triangular constituintes da malha para simulação bidimensional. Fonte [9] .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.1 - Vista frontal do M.I.L. construído para ensaios de propulsão de uma boia, presente no LabMaq (UFRJ). ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.2 - Curvas de Densidade de Fluxo Magnético [mT] versus a posição [cm] na superfície da placa de alumínio do M.I.L. para as 3 Séries de Medidas e para a Média Aritmética das mesmas.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.3 - Curvas de Densidade de Fluxo Magnético[mT] versus Posição na Superfície da Placa de Alumínio [cm] para a Média Aritmética das Séries de Medidas e para os Resultados obtidos via simulação em ANSYS. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.4 - Vista do Motor 2 simulado com secundário do tipo placa metálica de alumínio. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.5 - Vista em zoom de um trecho do “Motor 2” simulado com secundário em placa. Malha para solução pelo MEF.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.6 - Força de Tração[N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	

<i>para o Caso Base. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.7 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade</i>	
<i>Síncrona para o Caso Base. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.8 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	
<i>para tensão de alimentação variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.9 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade</i>	
<i>Síncrona para tensão de alimentação variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.10 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	
<i>para espessura de entreferro variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.11 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade</i>	
<i>Síncrona para espessura de entreferro variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.12 - Vista frontal da placa de alumínio do motor de indução linear com secundário do tipo placa</i>	
<i>metálica (e armadura do “Motor 2”), simulado em ANSYS. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.13 - Comportamento teórico das curvas de Força de Tração [N] versus velocidade de secundário</i>	
<i>em percentual da velocidade síncrona para diferentes valores de resistência secundária. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.14 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	
<i>para espessura do secundário variável e demais parâmetros constantes ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.15 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade</i>	
<i>Síncrona para espessura do secundário variável e demais parâmetros constantes ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.16 - Área Máxima de condutor do enrolamento de armadura, definida na simulação em ANSYS</i>	
<i>para a representação do primário do “Motor 2” ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.17 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	
<i>para bitola dos condutores do enrolamento de armadura variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.18 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade</i>	
<i>Síncrona para bitola dos condutores do enrolamento de armadura variável e demais parâmetros</i>	
<i>constantes. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.19 - Vista frontal em zoom de um trecho do primário do “Motor 2”, simulado em ANSYS. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.20 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona</i>	
<i>para passo polar variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 4.21 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para passo polar variável e demais parâmetros constantes. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.22 - Arranjo do Ensaio e Detalhe da Polia/Correia. Fonte: [4] .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.23 – Vista do Motor 2 simulado com secundário do tipo gaiola de esquilo. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.24 – Vista em zoom de um trecho do “Motor 2” simulado com secundário em gaiola. Malha para solução pelo MEF. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.25 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Motor 2, com entreferro de 8mm. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.26 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Motor 2, com entreferro de 16mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.27 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Trabalho Virtual com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 8mm. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.28 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Tensor de Maxwell com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 8mm. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.29 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Trabalho Virtual com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 16mm. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.30 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Tensor de Maxwell com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 16mm. ....</i>	<i>70</i>

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 4.1 - Características elétricas e construtivas dos Motores de Indução Lineares estudados .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4.2 - Séries de Medidas de Densidade de Fluxo Magnético [mT] para os 31 pontos mapeados na superfície do secundário do M.I.L. para propulsão de uma boia. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4.3 - Forças de Tração e Levitação para cada valor de escorregamento obtidos através de simulação em ANSYS para o Caso Base. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4.4 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de V=420V; V= 630V e V= 210V ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4.5 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de V=420V; V= 630V e V= 210V</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4.6 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de gap=16mm; 8mm e 20mm. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4.7 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de gap=16mm; 8mm e 20mm. .</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 4.8 - Erro percentual para o pior caso da razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1 e para os casos 3 e 1 .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 4.9 - Erro percentual para o pior caso da razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1 e para os casos 3 e 1 .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 4.10 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de espessura de secundário h = 19mm; 37.5mm e 9mm. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.11 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de espessura de secundário h = 19mm; 37.5mm e 9mm. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.12 - Força Normal Máxima [N] e escorregamento máximo para as 3 espessuras do secundário .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4.13 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de FE=0.9; 0.5 e 1.0.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 4.14 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de FE=0.9; 0.5 e 1.0 .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 4.15 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de passo polar =15.4cm; 12.7cm e 19cm. ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 4.16 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de passo polar =15.4cm; 12.7cm e 19cm. ....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4.17 – Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual (gap=8mm) .....</i>	<i>62</i>

<i>Tabela 4.18 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell</i>	
<i>(gap=8mm) .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.19 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual(gap=16mm)</i>	
<i>.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 4.20 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell</i>	
<i>(gap=16mm) .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 4.21 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual (gap=8mm)</i>	
<i>considerando a indutância de cabeça de bobina .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.22 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell</i>	
<i>(gap=8mm) considerando a indutância de cabeça de bobina .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.23 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual</i>	
<i>(gap=16mm) considerando a indutância de cabeça de bobina .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 4.24 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell</i>	
<i>(gap=16mm) considerando a indutância de cabeça de bobina .....</i>	<i>69</i>
 <i>Tabela AIII. 1 - Parâmetros do Motor 2 para o cálculo da indutância de cabeça de bobina. ....</i>	 <i>79</i>

# Capítulo 1

---

## 1 Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

O surgimento do primeiro Motor de Indução Linear (M.I.L.) é datado da segunda metade do século XIX, antes do desenvolvimento das primeiras máquinas rotativas por Tesla, em 1888. No entanto, foi a partir de meados do século XX que o emprego das máquinas lineares tornou-se mais notório. [1]

A partir das décadas de 1960 e 1970, com a descoberta de novos materiais e o advento da eletrônica de potência, surgiram novos estudos e novas aplicações para os motores lineares, dentre as quais podemos citar o trem de levitação magnética (Maglev), que já tem algumas linhas de transporte coletivo e/ou de teste em países como Japão, Alemanha e China [2] e que tem sido pesquisado no Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP), da COPPE/UFRJ e, dentro de alguns anos, será implantado no Brasil, inicialmente para transporte de passageiros entre dois prédios do Centro de Tecnologia da UFRJ.

No ambiente industrial, a utilização de motores elétricos e de atuadores pneumáticos e hidráulicos para acionamento de processos que envolvem movimentos lineares é expressiva.

Entretanto, a despeito de seu emprego, tais motores e atuadores podem apresentar alguns problemas, a saber: necessidade de manutenção intensa; ruído elevado; necessidade de operação com bombas, engrenagens, correias e equipamentos auxiliares, que diminuem sua confiabilidade e aumentam seus custos finais.

Quando se fazem necessárias atividades que demandem deslocamento linear,

forças de tração ou de levitação, baixa manutenção e operação silenciosa, como no caso do Maglev-Cobra, trem de levitação magnética supercondutora desenvolvido pelos pesquisadores do LASUP – COPPE/UFRJ, os motores rotativos e atuadores tradicionais não são utilizados. Em substituição, opta-se pelos Motores de Indução Lineares, uma vez que permitem a tração elétrica mesmo não havendo contato físico para a transmissão da força e possibilitam a operação em baixa velocidade (no caso do Maglev-Cobra, planejado para transporte urbano, as velocidades são de até 80 km/h).

Uma outra aplicação em que pode ser observado o uso dos M.I.L.s é em brinquedos, tais como montanhas-russas. A utilização dos Motores, neste caso, se dá com o objetivo de propulsionar o vagão, formando uma espécie de alavanca. São criados dois campos magnéticos (um sobre a pista e outro na porção inferior do trem), que são atraídos entre si. O trem fica sujeito a um efeito similar ao de uma catapulta, a alta velocidade [3]. Ainda no âmbito das possíveis aplicações em parques, uma outra alternativa seria a tração e propulsão de uma boia em um parque aquático. Pelo que se sabe, existe um único modelo similar no mundo, nos Estados Unidos e, no presente trabalho, são feitos alguns estudos e simulações para aperfeiçoamento de um M.I.L. para tal finalidade.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

O presente trabalho tem como objetivos a simulação de diferentes configurações de M.I.L.s, por meio do software computacional ANSYS®, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolução dos problemas propostos e determinação de grandezas, tais como força e densidade de fluxo magnético.

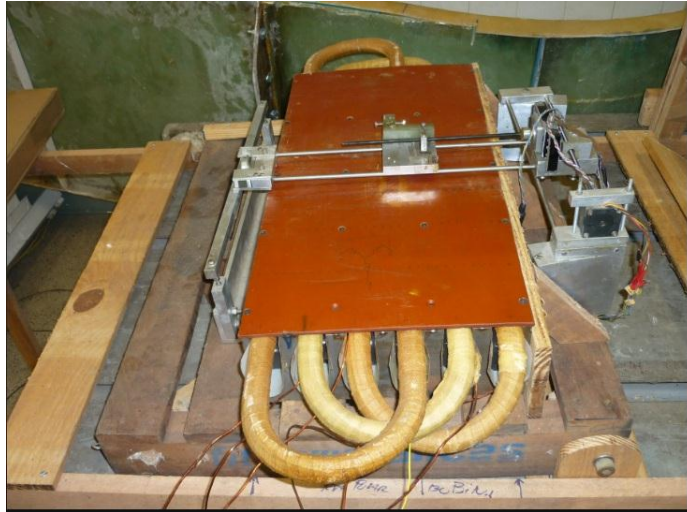
Para as simulações propostas, foram desenvolvidas rotinas e códigos

[APÊNDICES IV e V], com as linhas de comando que são lidas no ANSYS e convertidas na interface gráfica do programa, que fornece as grandezas desejadas.

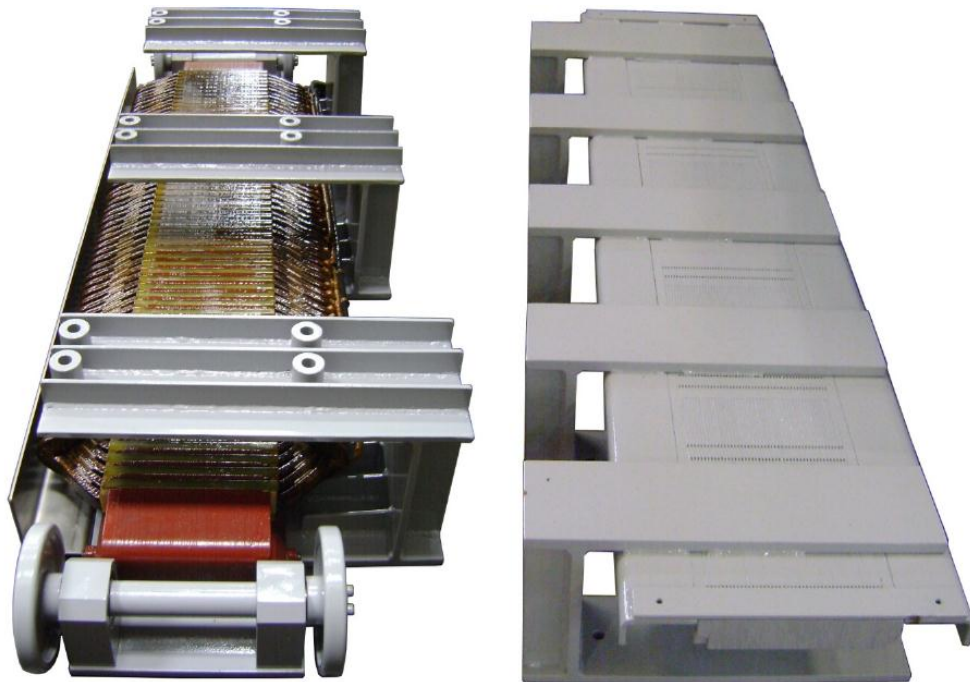
Nas primeiras etapas do trabalho, realizaram-se simulações de um Motor de Indução Linear de topologia bastante simples, com um par de pólos, enrolamento de estator em camada simples e secundário caracterizado por uma placa de alumínio, como mostrado na Figura 1.1. Os resultados de densidade de fluxo magnético obtidos via simulação foram comparados aos medidos no motor linear presente no Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq) da UFRJ, construído para estudo e projeto de um brinquedo caracterizado pela propulsão de uma boia em um parque aquático.

Foram realizadas, ainda, simulações para um motor linear com enrolamento de estator em dupla camada, inicialmente com secundário constituído por uma placa de alumínio. Para esta topologia, foram obtidos, via simulação, os resultados de forças de tração e de levitação, variando-se alguns parâmetros elétricos ou construtivos, como a tensão de alimentação; o comprimento do entreferro de ar; a espessura da placa de alumínio do secundário e a bitola dos condutores do enrolamento de armadura. Em seguida, substituiu-se o secundário do tipo placa metálica por um do tipo gaiola de esquilo, para representar mais fielmente o motor ilustrado na Figura 1.2, presente no LabMaq e desenvolvido para testes para a propulsão/frenagem do Maglev-Cobra.





**Figura 1.1 – Motor de Indução Linear com enrolamento de estator em camada simples, para propulsão de uma boia. Protótipo presente no LabMaq –UFRJ.**



**Figura 1.2 - Motor de Indução Linear com enrolamento de armadura em camada dupla e secundário do tipo gaiola de esquilo, para tração e levitação de um módulo do veículo Maglev-Cobra. Fonte:[4]**

### **1.3 Organização do Trabalho**

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: “*Introdução*”, que contém as considerações iniciais do trabalho, bem como seus objetivos e estrutura;

- Capítulo 2: “*Motores de Indução Lineares*”. Neste capítulo, é descrita a Teoria e Modelagem Matemática de Motores de Indução Lineares, por meio de equações.

- Capítulo 3: “*Método dos Elementos Finitos*”. Neste capítulo é feita uma revisão teórica e matemática do Método dos Elementos Finitos, associando esta ferramenta à sua utilização durante as etapas de simulação.

- Capítulo 4: “*Simulações e Resultados*”, onde são apresentados os resultados de força ou de densidade de fluxo magnético obtidos via simulação pelo Método dos Elementos Finitos para os motores lineares estudados. As simulações são divididas em três etapas distintas e independentes entre si. Neste capítulo, são feitas análises dos valores resultantes das simulações e comparações destes resultados com grandezas medidas.

- Capítulo 5: “*Conclusão e Trabalhos Futuros*”, em que são apresentadas, de forma sucinta, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

- “*Referências Bibliográficas*”, com a lista de fontes pesquisadas e consultadas.

- APÊNDICE I: “*Configuração do Primário do Motor 2*”.

- APÊNDICE II: “*Dimensões do Primário e do Secundário do Motor 2*”.

- APÊNDICE III: “*Determinação da Indutância da Cabeça de Bobina*”, onde é mostrado, em linhas gerais, o cálculo da indutância das conexões terminais.

- APÊNDICE IV: Rotinas em linguagem própria do software ANSYS®, usadas na segunda etapa de simulação.

- APÊNDICE V: Rotinas em linguagem própria do software ANSYS®, usadas na terceira etapa de simulação.

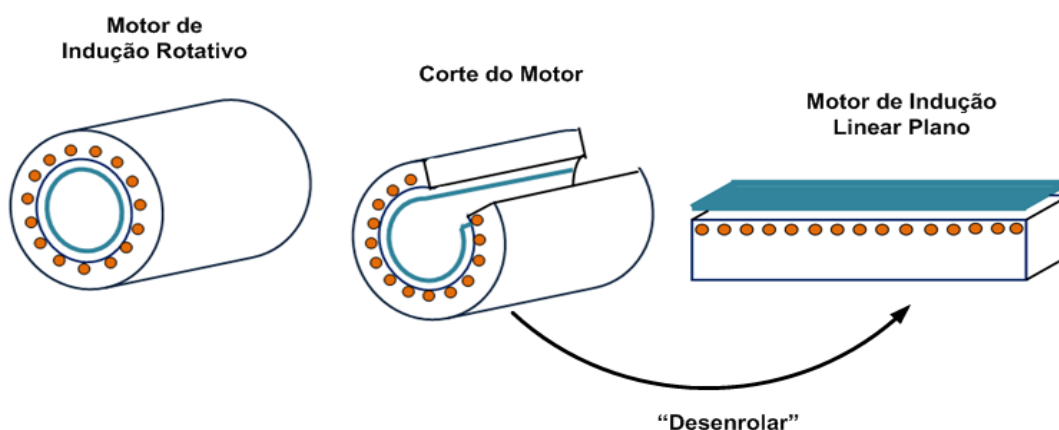
# Capítulo 2

## 2 Motores de Indução Lineares

### 2.1 Aspectos Construtivos

Em relação aos seus aspectos construtivos, o Motor Linear Plano pode ser enxergado como um Motor Rotativo que teve o primário e o secundário cortados ao longo da direção radial e que, em seguida, foi aberto (desenrolado), de modo a se tornar uma estrutura com simetria cartesiana ao invés de cilíndrica.

A Figura 2.1 mostra a obtenção de um motor de indução linear plano a partir de uma máquina rotativa, no que tange ao seu aspecto construtivo.



**Figura 2.1 - Obtenção de um Motor de Indução Linear Plano a partir do Corte Radial de um Motor de Indução Rotativo.**

O secundário de um M.I.L. consiste de uma placa plana metálica, em geral de cobre ou alumínio, ou de uma estrutura do tipo gaiola de esquilo. O secundário em gaiola é constituído por uma estrutura ferromagnética laminada, com barras de cobre ou de alumínio curto-circuitadas entre si.

Em relação aos seus aspectos construtivos, dependendo do comprimento relativo entre o primário e o secundário, um M.I.L. pode ser classificado como sendo de

primário curto ou de secundário curto. Além desse critério, os Motores de Indução Lineares podem ser classificados quanto ao número de estatores presentes em sua estrutura (estator simples ou duplo). Deste modo, há 4 possíveis disposições do primário em relação ao secundário para um Motor de Indução Linear, a saber [5]:

- Primário curto – Estator Duplo
- Primário curto – Estator Simples
- Secundário curto – Estator Duplo
- Secundário curto – Estator Simples

## **2.2 Modelagem Matemática de Máquinas de Indução**

Assim como em máquinas de indução rotativas, o campo magnético no entreferro de uma máquina de indução linear é um campo viajante. Entretanto, ao contrário do presente nos motores rotativos, o campo no entreferro de um M.I.L é geralmente composto por uma componente em avante, predominante e responsável pela força produzida pela interação com as correntes induzidas no secundário, outra à ré e outra pulsante, decorrente de descontinuidades no circuito magnético. Ainda diferindo da máquina rotativa correspondente, na qual a parte que se move é o rotor (secundário), um M.I.L. pode ser caracterizado por um primário móvel (com secundário fixo) ou por ter seu primário fixo e o secundário com liberdade de deslocamento. [5],[6].

A teoria básica sobre máquinas de indução rotativas pode ser encontrada em [7],[8].

Em [9], GIERAS descreve as relações matemáticas fundamentais na teoria de máquinas de indução lineares, que servem de base para o desenvolvimento deste trabalho.

A velocidade linear da componente fundamental da força magnetomotriz viajante

produzida pelo enrolamento primário é chamada de velocidade síncrona, ou seja:

$$v_s = \frac{2\tau}{T} = 2f\tau = \frac{\omega}{\pi}\tau \quad (2.1)$$

Em que  $\tau$  é o passo polar;  $f = 1/T$  é a frequência de alimentação do primário;  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular de alimentação.

Como pode ser visto pela equação (2.1), a velocidade síncrona de um M.I.L. depende da frequência de alimentação do primário e do passo polar.

Tanto em máquinas rotativas quanto em máquinas lineares, a frequência de alimentação e o passo polar são quem define a velocidade da onda de fluxo magnético. Em máquinas rotativas, para um dado diâmetro interno de estator, o passo polar está diretamente relacionado ao número de polos. Para as máquinas lineares, no entanto, o número de polos, sozinho, não fornece todas as informações necessárias ao cálculo da velocidade, motivo pelo qual, neste caso, se utiliza o passo polar e não apenas o número de pólos.

O secundário se move com uma velocidade linear  $v$  ao longo da direção longitudinal. O escorregamento é dado por:

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (2.2)$$

A velocidade do campo viajante do secundário no referencial do próprio secundário será, então:

$$v_r = sv_s = v_s - v \quad (2.3)$$

### 2.2.1 Circuito Equivalente

As Máquinas de Indução caracterizam-se por dois circuitos fisicamente independentes porém acoplados magneticamente. Deste modo, podem ser representadas pelo circuito da Figura 2.2, em que as grandezas são referidas ao primário, a partir da relação de transformação do número de espiras entre o estator e o secundário e também o escorregamento.

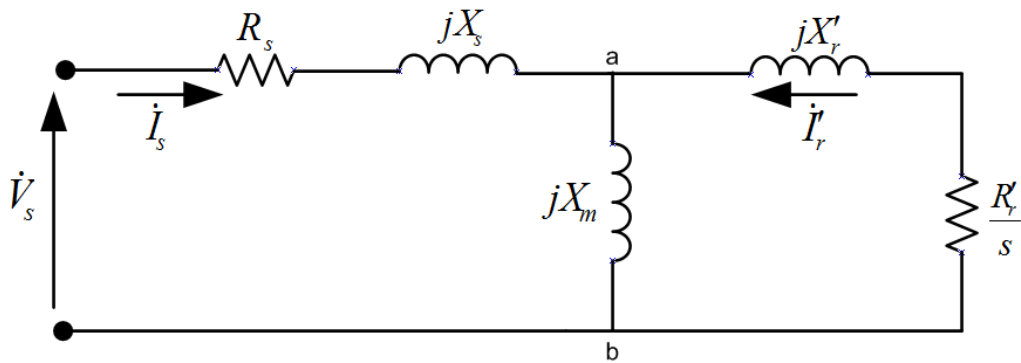


Figura 2.2 - Circuito Equivalente de uma Máquina de Indução Linear Ideal, desprezando-se os Efeitos Longitudinais de Extremidade

Em que:

- $\dot{V}_s$  é a tensão de alimentação do primário.
- $\dot{I}_s$  é a corrente estatórica.
- $\dot{I}'_r$  é a corrente “rotórica” referida ao primário.
- $X_s$  é a reatância de dispersão do primário, definida na frequência síncrona.
- $X'_r$  é a reatância de dispersão do secundário referida ao primário, definida na frequência síncrona.
- $X_m$  é a reatância de magnetização, definida na frequência síncrona.
- $R_s$  é a resistência do enrolamento primário.
- $R'_r$  é a resistência do secundário refletida ao primário.

A relação de transformação é dada por:

$$a = \frac{N_s}{N_r} = \frac{\dot{I}_r}{\dot{I}'_r} \quad (2.5)$$

Em que  $\dot{I}'_r$  é a corrente rotórica.

Obtendo-se o Equivalente de Thévenin entre os terminais  $a$  e  $b$  da Figura 2.2, chega-se ao circuito da Figura 2.3.

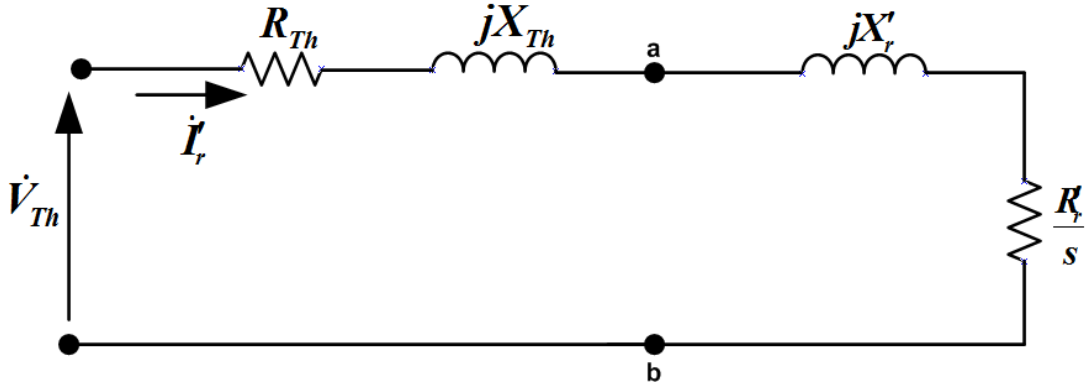


Figura 2.3 - Circuito Equivalente de Thévenin da Máquina de Indução Linear, visto dos terminais  $a$  e  $b$

Em que:

- $X'_r$  é a reatância de dispersão do secundário referida ao primário, definida na frequência síncrona.
- $R'_r$  é a resistência do secundário refletida ao primário.
- $X_{Th}$  é a reatância de Thévenin.
- $R_{Th}$  é a resistência de Thévenin.
- $V_{Th}$  é a tensão de Thévenin.

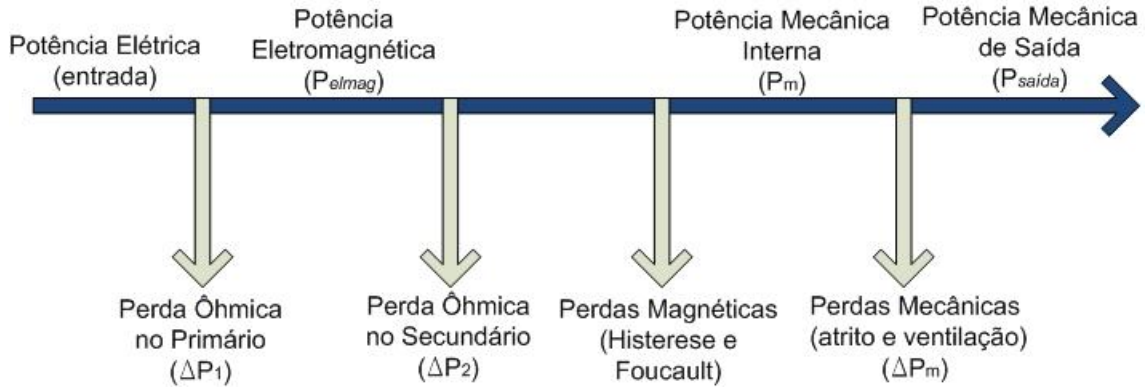
Com base nos circuitos das Figuras 2.2 e 2.3, obtém-se a impedância de Thévenin a corrente de secundário referida ao primário e a tensão de Thévenin, dadas por (2.6), (2.7) e (2.8), respectivamente.

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \frac{(R_s + jX_s) \cdot (jX_m)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (2.6)$$

$$\dot{I}'_r = \frac{\dot{V}_{Th}}{\left(R_{Th} + \frac{R'_r}{s}\right) + j(X_{Th} + X'_r)} \quad (2.7)$$

$$\dot{V}_{Th} = \dot{V}_s \times \frac{jX_m}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (2.8)$$

O Fluxo de Potência nos Motores de Indução Lineares é descrito na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Fluxo de Potência em um Motor de Indução Linear**

A potência eletromagnética transmitida pelo primário ao secundário através do entreferro é dada por:

$$P_{elmag} = \frac{3R'_r I_r'^2}{s} = P_m + \Delta P_2 + \Delta P_{mag} = F v_s \quad (2.9)$$

Em que:

$P_m$  é a potência mecânica interna;  $\Delta P_2$  são as perdas ôhmicas no secundário;  $\Delta P_{mag}$  são as perdas magnéticas por histerese e por correntes de Foucault (estas perdas serão consideradas desprezíveis);  $F$  é a força eletromagnética desenvolvida.

Por sua vez, a potência mecânica em um M.I.L. é:

$$P_m = P_{saída} + \Delta P_m = F v \quad (2.10)$$

Em que:

$P_{saída}$  é a potência líquida fornecida pelo motor, já excluídas as perdas;  $\Delta P_m$  são as perdas mecânicas ;  $F$  é a força eletromagnética desenvolvida.

A equação (2.11) mostra a relação entre a força eletromagnética  $F$  e a força útil  $F_x$ , sendo  $\Delta F_m$  a parcela de força proporcional às perdas mecânicas.



$$F = F_x + \Delta F_m = \frac{P_{saída}}{v} + \frac{\Delta P_m}{v} \quad (2.11)$$

As equações (2.9) e (2.10) fornecem uma relação análoga à das máquinas de indução rotativas, isto é:

$$P_m = \frac{v}{v_s} P_{elmag} = (1 - s) P_{elmag} \quad (2.12)$$

Com base nas equações (2.8), (2.9) e (2.12), e desprezando-se as perdas mecânicas, conclui-se que a força  $F$  resultante será dada por:

$$F = \frac{3R'_r}{s} \frac{V_{Th}^2}{\left(R_{Th} + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{Th} + X'_r)^2} \frac{1}{v_s} \therefore F \propto V_{Th}^2 \therefore F \propto V_s^2 \quad (2.13)$$

Se a resistência primária for desprezada, e se o circuito magnético não estiver saturado, a força eletromagnética pode ser expressa como função do escorregamento, pela Fórmula de Kloss.

$$F = \frac{2F_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \quad (2.14)$$

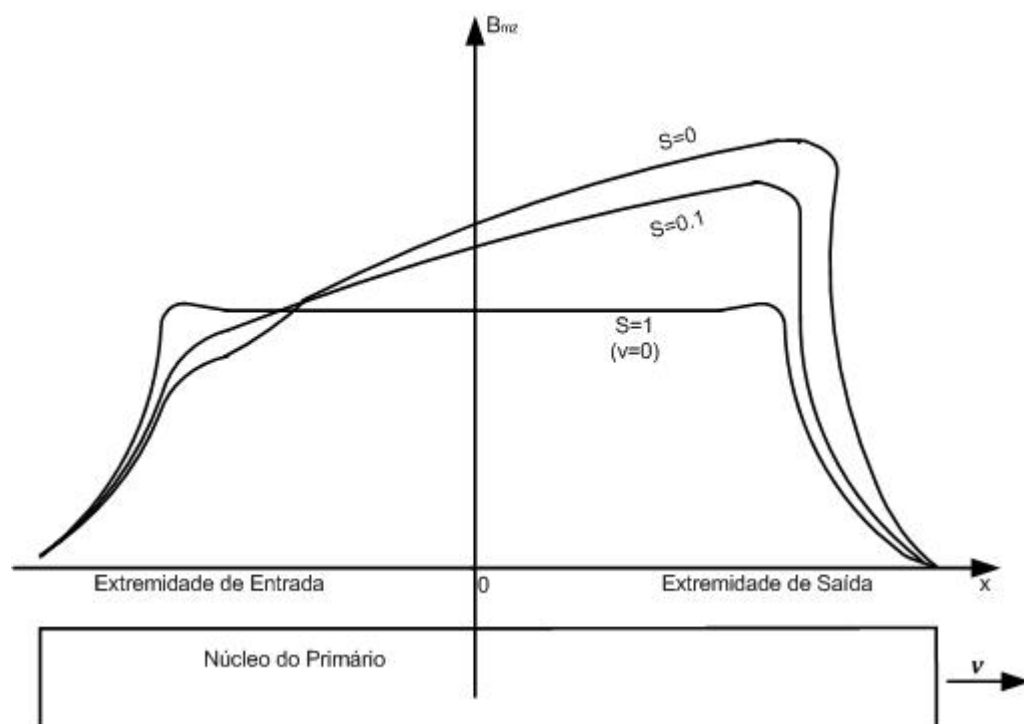
Em que  $s_{max}$  é o escorregamento para o qual a força é máxima ( $F_{max}$ ).

### 2.2.2 Efeito Longitudinal de Extremidade

Na Seção 2.2.1, foi elaborada a modelagem matemática de um M.I.L. ideal, i.e., de primário muito longo, desprezando-se algumas de suas características elétricas, magnéticas e construtivas fundamentais, com representação por equações análogas às das máquinas rotativas. Em [5], CREPPE diz que a característica mais importante no estudo dos Motores de Indução Lineares é o fato de estes apresentarem um primário dotado de extremidades (diferindo dos motores rotativos, cuja topologia é circular),

favorecendo o aparecimento de perturbações no fluxo das regiões de entrada (Efeito Longitudinal de Extremidade de Entrada) e de saída (Efeito Longitudinal de Extremidade de Saída) do motor. Deste modo, a principal diferença entre um motor de indução rotativo e um M.I.L. é o comprimento finito dos circuitos elétrico e magnético do motor linear ao longo da direção do campo viajante, exceto para o caso de primário muito longo.

Os Efeitos Longitudinais de Extremidade são efeitos parasitas. Em [10], YAMAMURA prova que para um M.I.L. com secundário se deslocando a uma velocidade  $v$  na direção longitudinal, na extremidade de entrada a componente normal da densidade de fluxo magnético do entreferro,  $B_{mz}$ , é enfraquecida e na extremidade de saída, ela é amplificada. A Figura 2.5 mostra o que ocorre com a componente normal da densidade de fluxo magnético  $B_z$  para diferentes valores de escorregamento, ao longo do estator de um M.I.L..



**Figura 2.5 - Envoltórias das Curvas da Componente Normal da Densidade de Fluxo Magnético ao Longo do Eixo  $z$  para Diferentes Valores de Escorregamento**

Quanto maior a velocidade  $v$ , maior a influência dos Efeitos Longitudinais de Extremidade. Para velocidades  $v \neq 0$ , a distribuição da componente normal da densidade de fluxo magnético torna-se aproximadamente trapezoidal . Conforme a velocidade aumenta, a diferença entre as bases do trapézio também aumenta, como mostrado na Figura 2.5.

Os efeitos Longitudinais de Extremidade aparecem sob a seguinte forma:

- Distribuição de densidade de fluxo magnético no entreferro não-uniforme e variante com a velocidade;
- Distribuição de corrente induzida não uniforme e variante com a velocidade no secundário;
- Correntes de fase desbalanceadas;
- Forças parasitas frenantes, se opondo ao movimento relativo do secundário em relação ao primário.

O Efeito Longitudinal de Extremidade é causado pelo “corte” da onda viajante em cada extremidade do M.I.L.

Os Efeitos observados nas extremidades do estator propagam-se através do entreferro, distorcendo o campo magnético de translação em regiões distantes das extremidades. Entretanto, a penetração da perturbação de fluxo em função dos efeitos de extremidades está diretamente relacionada à extremidade do M.I.L.. Nos dispositivos de alta velocidade, o comprimento da penetração da perturbação que ocorre na extremidade de entrada é muito maior que o presente na saída. Deste modo, o comprimento de penetração da perturbação na entrada do M.I.L. é o principal responsável pela modificação do seu desempenho. [6]

Para motores de baixas velocidades, o Efeito Longitudinal de Extremidade de

Entrada é atenuado mais rapidamente, ao passo que para os motores de alta velocidade, sua influência na alteração do desempenho pode ser mais facilmente observada.

# Capítulo 3

---

## 3 Método dos Elementos Finitos

### 3.1 Introdução

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em um método numérico para análise de fenômenos físicos em meios contínuos. É utilizado na solução numérica de equações diferenciais parciais a partir de condições de contorno pré-definidas.

Na solução dos mais diversos problemas de engenharia com condições de fronteira, pode-se verificar a utilização do MEF para determinação das grandezas desejadas.

Em aplicações que envolvam o projeto e análise de equipamentos eletromagnéticos, o emprego do MEF permite o estudo de casos distintos, por meio da variação de parâmetros elétricos ou de aspectos construtivos, visando à obtenção de um modelo ótimo. Desta forma, torna-se possível chegar a uma conclusão acerca do dispositivo analisado antes de serem construídos protótipos que não apresentem o desempenho desejado, possibilitando a redução dos gastos envolvidos no experimento, bem como do desperdício de tempo.

### 3.2 Aplicação do Método dos Elementos Finitos no Projeto

Tendo em vista a ampla utilização do MEF para diversas finalidades, alguns softwares comerciais foram desenvolvidos para resolver problemas físicos utilizando tal método. Para realização do presente trabalho, usou-se o software ANSYS®, da ANSOFT, na simulação harmônica de Máquinas de Indução Lineares.[11]

Para aplicações de engenharia relacionadas ao eletromagnetismo, três tipos de análise podem ser utilizados [12]:

- Análise Estática (magnetostática);
- Análise harmônica;
- Análise transitória.

A análise estática considera que as variáveis de entrada do problema, como a densidade de corrente aplicada a uma região, bem como as variáveis de saída, como vetor potencial e campo magnético, não variam no tempo. Na análise harmônica, admite-se a variação senoidal das grandezas envolvidas, permitindo a representação de problemas em regime permanente, como, por exemplo, uma máquina operando com velocidade constante ou na condição de rotor bloqueado. A análise variante no tempo considera o comportamento transitório, como na alimentação da máquina por fontes de tensão ou correntes não-senoidais.

### **3.3 Formulação do MEF em Problemas de Eletromagnetismo – Análise Bidimensional**

Para o cálculo de grandezas pelo Método dos Elementos Finitos, é necessário definir um domínio, o qual caracteriza o problema em termos de sua geometria, propriedades dos materiais em cada região e condições de contorno (correspondentes às condições de contorno das equações diferenciais resolvidas). Na abordagem utilizada no presente trabalho, as condições de fronteira são definidas pela formulação de Vetor Potencial Magnético (VPM), mostrado por MOREIRA em [12].

Para esta formulação, a condição de fronteira que garante uma solução unívoca é a que define o valor do vetor potencial magnético em cada ponto da fronteira do problema. No caso bidimensional, considera-se que o campo magnético  $\vec{H}$  e a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  têm componentes nas direções  $x$  e  $y$ , ao passo que a densidade de corrente  $\vec{J}$  e o vetor potencial magnético  $\vec{A}$  têm componentes apenas na direção  $z$ ,  $J_z$  e

$A_z$ , respectivamente.

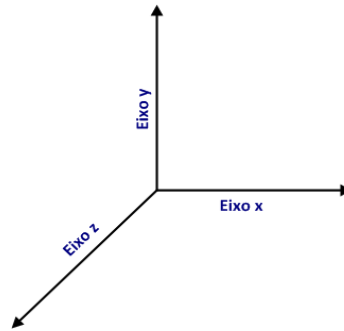


Figura 3.1 - Eixos cartesianos x, y e z.

A Figura 3.1 mostra a direção dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A força desenvolvida ao longo do eixo  $x$ ,  $F_x$ , será denominada, ao longo deste trabalho, como “força de tração” e a desenvolvida no eixo  $y$ ,  $F_y$ , será denominada “força de levitação”, podendo ser tanto de atração quanto de repulsão.

A análise pelo MEF fornece resultados por metro de profundidade (isto é, para  $z = 1m$ ). Por isto, para algumas grandezas, deve-se multiplicar o resultado obtido pela profundidade real do modelo simulado.

Em todas as simulações realizadas neste projeto, a condição de fronteira utilizada foi  $A_z = 0$ , como exemplificado na Figura 3.2, na qual está representada uma das geometrias simuladas.

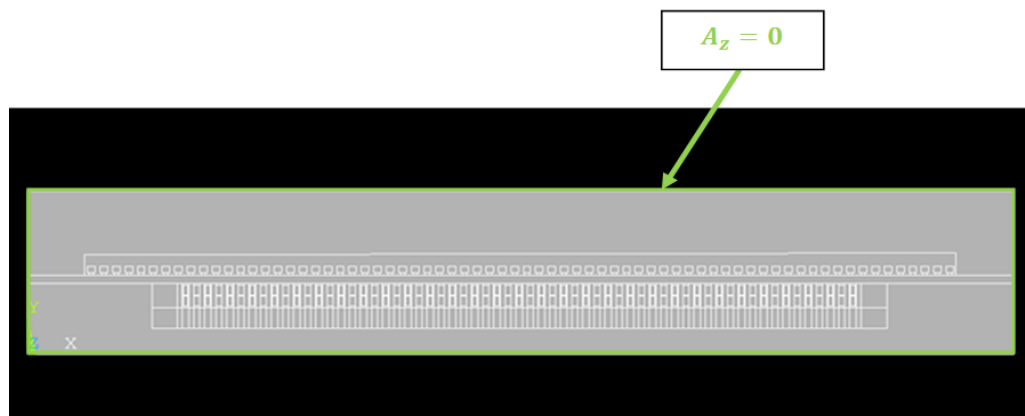


Figura 3.2 - Definição da condição de contorno  $A_z = 0$

### 3.4 Definição e Caracterização da Malha

Após a definição do domínio, é preciso discretizá-lo em divisões menores, denominadas elementos, os quais são constituídos por nós, que podem estar nos vértices ou nas partes intermediárias das arestas dos elementos. No caso bidimensional, estes podem ser triangulares ou quadriláteros, como na Figura 3.3, que mostra um elemento quadrilátero com 8 nós (representados na figura pelas letras I, J, K, L, M, N, O e P) e um elemento triangular com 6 nós (I, J, L, M, N e P). [11] O Método dos Elementos Finitos consiste na aproximação da solução do problema com os valores de fronteira descritos por equações diferenciais ordinárias ou por equações diferenciais parciais através da subdivisão da geometria nos elementos, permitindo a obtenção da solução global do domínio pela interpolação de soluções aproximadas. [13]

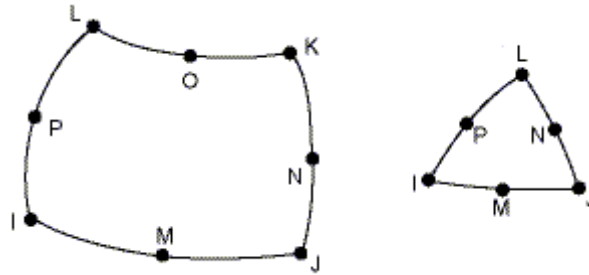


Figura 3.3 - Elementos quadrilátero e triangular constituintes da malha para simulação bidimensional.  
Fonte [9]

Admitindo-se as considerações indicadas na Seção 3.3, isto é, caso bidimensional, considerando-se que o campo magnético  $\vec{H}$  e a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  têm componentes nas direções  $x$  ( $B_x$ ) e  $y$  ( $B_y$ ), ao passo que a densidade de corrente  $\vec{J}$  e o vetor potencial magnético  $\vec{A}$  têm componentes apenas na direção  $z$ ,  $J_z$  e  $A_z$ , respectivamente, temos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (3.1)$$



Para análise magnetostática, em cada elemento da malha, a equação (3.1) é discretizada, de modo que a solução numérica fornece inicialmente o vetor potencial magnético ( $A_z$ ), seguido pela densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ), do vetor campo magnético ( $\vec{H}$ ) e, por último, das forças magnéticas. [12]. É possível concluir, portanto, que os resultados de força convergem mais lentamente que os de densidade de fluxo magnético para o mesmo domínio simulado.

### 3.5 Métodos de Cálculo de Força

Um dos principais objetivos dos Motores de Indução Lineares é produzir forças de tração e/ou de levitação, de modo a assegurar a propulsão e frenagem dos dispositivos que se deseja movimentar.

Em tese, as forças geradas pelos M.I.L.s podem ser calculadas, a partir da solução de campo local, de diversas formas. Entretanto, os resultados de campo magnético convergem para uma malha menos refinada que os resultados de força. Deste modo, simulações que levam a resultados de campo magnético coerentes com os previstos teoricamente podem implicar em um cálculo de forças resultantes incorreto, em função de uma malha mal refinada para a obtenção das forças. Portanto, os métodos empregados na determinação de força podem levar a resultados distintos para simulações idênticas, isto é, para a mesma configuração geométrica, com os mesmos parâmetros elétricos, sob as mesmas condições de contorno.

Dentre os métodos utilizados, no presente estudo serão consideradas três categorias de solução de força, a saber:

- Lei de Força de Ampère (Força de Lorentz);
- Método dos Tensores de Maxwell;
- Método do Trabalho Virtual.

Os três métodos listados podem ser usados para calcular a força total em um objeto. No entanto, para a determinação da distribuição de forças, nem o Trabalho Virtual tampouco o Tensor de Maxwell podem ser utilizados, apenas a Lei de Força de Ampère que, em contrapartida, pode ser aplicada apenas para condutores não-ferromagnéticos.[14]

### 3.5.1 Lei de Força de Ampère

A Lei de Força de Ampère é um método matemático simples para cálculo de força. Por este método, conhecendo-se o valor da densidade de fluxo,  $\vec{B}$ , e da densidade de corrente,  $\vec{J}$ , presentes na região onde há indução de corrente, pode-se calcular o vetor de força local, dado por:

$$d\vec{F} = \vec{J} \times d\vec{B} \quad (3.2)$$

A equação (3.2) é bastante usada para a determinação da força em condutores não-ferromagnéticos. Contudo, para análise de força resultante no secundário de motores de indução lineares do tipo gaiola de esquilo, nos quais o núcleo é constituído de material ferromagnético, pode-se usar um dos demais métodos ou substituir este material magnético na formulação matemática por uma distribuição de cargas magnéticas,  $q_m$ , de forma que:

$$\vec{F} = q_m (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.3)$$

### 3.5.2 Método dos Tensores de Maxwell

O Método dos Tensores de Maxwell pode ser obtido utilizando-se a Lei de Forças de Ampère e uma distribuição de corrente fictícia equivalente, de modo a simular um material ferromagnético como se o mesmo não o fosse.

Este Método fornece resultados iguais aos calculados via Trabalho Virtual apenas

para alguns casos estudados.

Um volume  $v$  de material ferromagnético pode ser substituído por uma distribuição superficial de corrente  $J_s$  e por uma densidade volumétrica de corrente  $J_v$ , definidas respectivamente como:

$$J_s = \frac{M_t}{\mu_0} \hat{a}_t \quad (3.4)$$

$$J_v = \frac{\nabla \times M}{\mu_0} \quad (3.5)$$

Onde  $\hat{a}_t$  é o vetor unitário na direção tangencial à superfície do material ferromagnético,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $M$  é o vetor de magnetização, dado por:

$$M = B - \mu_0 H \quad (3.6)$$

Aplicando estas fórmulas, pode-se substituir o material magnético por uma corrente equivalente. Deste modo, calcula-se a densidade de força,  $p_v$ , tal que:

$$p_v = J \times B \quad (3.7)$$

Usando-se a Lei de Ampère conclui-se que:

$$p_v = (\nabla \times H) \times B = \left( \nabla \times \frac{B}{\mu_0} \right) \times B \quad (3.8)$$

SALON[14], por meio de um equacionamento matemático que vai além do escopo deste trabalho, chega a:

$$p_v = \nabla \cdot T \quad (3.9)$$

Onde  $T$  é a Matriz dos Tensores de Maxwell.

Logo, a força total é dada por:

$$F = \int \nabla \cdot T \, dv = \oint_S T \cdot dS \quad (3.10)$$

Após manipulações algébricas, conclui-se que o incremento de força é dado por:

$$dF = T \cdot dS \quad (3.11)$$

Que pode ser decomposto em suas componentes normal e tangencial,  $dF_n$  e  $dF_t$ , respectivamente:

$$dF_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} \, dl \quad (3.12)$$

$$dF_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} \, dl \quad (3.13)$$

Onde  $B_n$  é a densidade de fluxo magnético na direção normal à superfície,  $B_t$  é a componente da densidade de fluxo tangencial e  $dl$  é a profundidade, ao longo da mesma direção da corrente, do volume onde está sendo calculada a força.

Deste modo, a densidade de força obtida por meio do Método dos Tensores de Maxwell, decomposta em suas componentes normal e tangencial, é dada por:

$$p_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} \quad (3.14)$$

$$p_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} \quad (3.15)$$

### 3.5.3 Método do Trabalho Virtual

O Método do Trabalho Virtual é adequado à análise por elementos finitos, uma vez que, no MEF, o ponto inicial é geralmente a minimização de uma expressão de energia magnética armazenada. [14]. Como a energia magnética armazenada é uma

variável global, ela é menos sensível a erros locais, os quais podem ser decorrentes de malhas pouco refinadas ou de arredondamentos e aproximações.

O Método dos Trabalhos Virtuais baseia-se na relação entre força e energia, estabelecida pelo Princípio de Conservação da Energia [15]. A força que age na parte móvel de um dispositivo pode ser calculada a partir da variação da energia magnética em relação à posição, para um enlace de fluxo constante, ou a partir da variação da co-energia em relação à posição, para corrente constante. As duas formas do Método do Trabalho Virtual são aplicadas da mesma maneira. Quando o dispositivo opera na região de magnetização linear, isto é, sem estar saturado, a energia e a co-energia magnética armazenadas são numericamente iguais.

Para uma dada configuração de fontes de corrente e materiais, resolve-se o Método dos Elementos Finitos e computa-se a co-energia magnética,  $W'_1$ . Em seguida, computa-se a força para um deslocamento infinitesimal,  $\Delta s$ , na direção em que se deseja calcular a força, resolve-se novamente o problema, para os mesmos valores de corrente e encontra-se o novo valor de co-energia,  $W'_2$ . Deste modo, a força na direção  $s$  será dada por (3.16).

$$F_s = \frac{W'_2 - W'_1}{\Delta s} \quad (3.16)$$

Para aplicar o Método do Trabalho Virtual a problemas de eletromagnetismo, para regiões onde não há saturação, a formulação matemática se dá, em linhas gerais, como mostrado nas equações (3.17) a (3.23).

$$W_{mag} = \iiint \frac{1}{2} B \cdot H \, dv \quad (3.17)$$

Onde:  $W_{mag}$  é a energia magnética armazenada no dispositivo.

Restringindo o problema a uma análise bi-dimensional:

$$W_{mag} = \iint \frac{1}{2} B \cdot H \, dS = \iint \frac{1}{2\mu} B^2 \, dS \quad (3.18)$$

Substituindo o valor da densidade de fluxo magnético pelo potencial vetor magnético, temos:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (3.19)$$

Como visto na Seção 3.3, no caso de força decomposta em duas direções,  $x$  e  $y$ , como no presente trabalho, o potencial vetor magnético tem apenas uma componente,  $A_z$ , na direção  $z$ . Neste caso, a densidade de fluxo pode ser reescrita como em (3.20).

$$B^2 = \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \quad (3.20)$$

A partir de (3.18), para a análise bidimensional, chega-se a:

$$W_{mage} = \iint \frac{1}{2} B \cdot H \, dS = \iint \frac{1}{2\mu} B^2 \, dx dy = \frac{1}{2\mu} B^2 A_{el} \quad (3.21)$$

Onde  $W_{mage}$  é a energia magnética armazenada em um elemento e  $A_{el}$  é a área de cada elemento da malha.

A contribuição de cada elemento da malha para a força será obtida derivando a equação (3.21) em relação à direção da força. Deste modo, as suas componentes em  $x$ ,  $F_{xel}$ , e  $y$ ,  $F_{yel}$ , fornecidas por um elemento, serão:

$$F_{xel} = - \left. \frac{\partial W_{mage}}{\partial x} \right|_{\text{enlace de fluxo constante}} \quad (3.22)$$

$$F_{yel} = - \frac{\partial W_{mage}}{\partial y} \Big|_{enlace\ de\ fluxo\ constante} \quad (3.23)$$

A força total pode ser obtida somando-se as contribuições de todos os elementos da malha.

# Capítulo 4

---

## 4 Simulações e Resultados

### 4.1 Considerações Iniciais

Nos capítulos anteriores, estudaram-se, separadamente, os fundamentos matemáticos que modelam as Máquinas de Indução Lineares e o Método dos Elementos Finitos.

O capítulo 2 forneceu o resumo teórico necessário ao estudo e entendimento da teoria de Máquinas de Indução Lineares, ao passo que o capítulo 3 explicou, em linhas gerais, o Método dos Elementos Finitos e os diferentes métodos de cálculo de força através do MEF.

No presente capítulo, serão apresentados os resultados de força obtidos por meio da modelagem computacional em duas dimensões de Motores de Indução Lineares de topologias e parâmetros elétricos distintos. Para tanto, foi utilizado o software ANSYS, que emprega o Método dos Elementos Finitos na resolução de problemas físicos. Neste trabalho, o MEF foi usado para calcular as forças de tração e levitação no secundário dos motores estudados, bem como a densidade de fluxo magnético no M.I.L. com secundário do tipo placa de alumínio.

As simulações se deram em três diferentes etapas, a saber:

1. Simulação de um Motor de Indução Linear com secundário do tipo placa de alumínio; 1 par de pólos e enrolamento de armadura em camada simples. Nesta etapa, os resultados de densidade de fluxo obtidos via simulação foram comparados aos valores medidos no protótipo construído em laboratório.



2. Simulação de um Motor de Indução Linear com secundário tipo placa de alumínio e enrolamento de armadura em camada dupla. Nesta etapa, os resultados de força de tração e levitação desenvolvidas no secundário foram obtidos através da variação de parâmetros elétricos e/ou construtivos do motor, mantendo-se todos os demais parâmetros constantes. Deste modo, pode-se perceber a influência dos parâmetros analisados em relação à força.
3. Simulação de um Motor de Indução Linear com armadura idêntica à simulada na etapa 2, porém com secundário do tipo gaiola de esquilo, ao invés de placa metálica. Nesta etapa tentou-se reproduzir o M.I.L. construído pela Empresa Equacional para o sistema de propulsão e frenagem do módulo do Maglev-Cobra, presente no LabMaq (UFRJ).

A Figura 4.1 mostra a direção das coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Por meio delas, podemos entender o sentido das forças

## 4.2 Motores Simulados

Tendo em vista os aspectos construtivos descritos na seção 2.1, os Motores de Indução Lineares presentes no Laboratório de Máquinas Elétricas da UFRJ – LabMaq e estudados neste trabalho possuem algumas características topológicas comuns e outras distintas. A Tabela 4.1 mostra alguns aspectos elétricos e construtivos dos dois motores de indução lineares que são objetos de estudo do presente trabalho.

Ao longo deste capítulo, serão usadas as denominações “*Motor 1*” e “*Motor 2*” para designar o M.I.L. para propulsão de uma bóia e o M.I.L. para tração e frenagem do módulo do Maglev-Cobra, respectivamente.

**Tabela 4.1 - Características elétricas e construtivas dos Motores de Indução Lineares estudados**

<b>Característica</b>	<b>Motor</b>	
	<b>Motor de Indução Linear para Propulsão de uma Boia em um Parque Aquático (Motor 1)</b>	<b>Motor de Indução Linear para Tração e Frenagem de um Módulo do Maglev Cobra (Motor 2)</b>
Tipo do Secundário	Placa de Alumínio	Gaiola de Esquilo
Número de Fases	3	3
Enrolamento de Armadura	Em camada simples	Em camada dupla
Número de Polos	1 par	6 pares
Número de Ranhuras por Polo por Fase	1	3
Profundidade	50 cm	20.5 cm
Passo Polar ( $\tau$ )	14 cm	15.4 cm *
Frequência Síncrona	60Hz	25Hz

*\*Passo polar =  $(8 \times 0.79 + 8 \times 1.19) \text{ cm} = 15.4 \text{ cm}$ . Ver APÊNDICES I e II*

### 4.3 Etapas da Simulação

#### 4.3.1 Simulação e Mapeamento da Densidade de Fluxo na Superfície do

##### **Motor 1**

Na primeira etapa de simulações, foi modelado um Motor de Indução Linear, com enrolamento de armadura em camada simples e secundário do tipo placa de alumínio, pelo Método dos Elementos Finitos. Visou-se, nesta fase do projeto, representar o M.I.L. da Figura 1.1, presente no LabMaq (UFRJ).

O M.I.L. ilustrado na Figura 4.1 foi construído para possibilitar ensaios para a propulsão de uma boia em uma atração de um parque aquático.



Figura 4.1 - Vista frontal do M.I.L. construído para ensaios de propulsão de uma boia, presente no LabMaq (UFRJ).

Nas simulações realizadas no ANSYS, mapeou-se, para a configuração do protótipo construído, a densidade de fluxo magnético no modelo simulado.

#### ***4.3.1.1 Mapeamento da Densidade de Fluxo na superfície do M.I.L.***

Para a realização do mapeamento da densidade de fluxo magnético na superfície do M.I.L. da Figura 4.1 , procedeu-se da seguinte forma:

- Foram feitas medidas com a alimentação do motor em corrente contínua, já que, deste modo, as medidas são estáticas e não variáveis no tempo como ocorre na alimentação em corrente alternada;
- Conectaram-se os enrolamentos das fases “A” e “C” em paralelo e em seguida em série com o enrolamento de fase “B”;
- Aplicou-se uma tensão contínua de 100V, de modo a obter 10 A no enrolamento de fase “B” e 5 A em cada um dos enrolamentos de fase “A” e “C”;
- Mediu-se a densidade de fluxo na superfície do M.I.L.

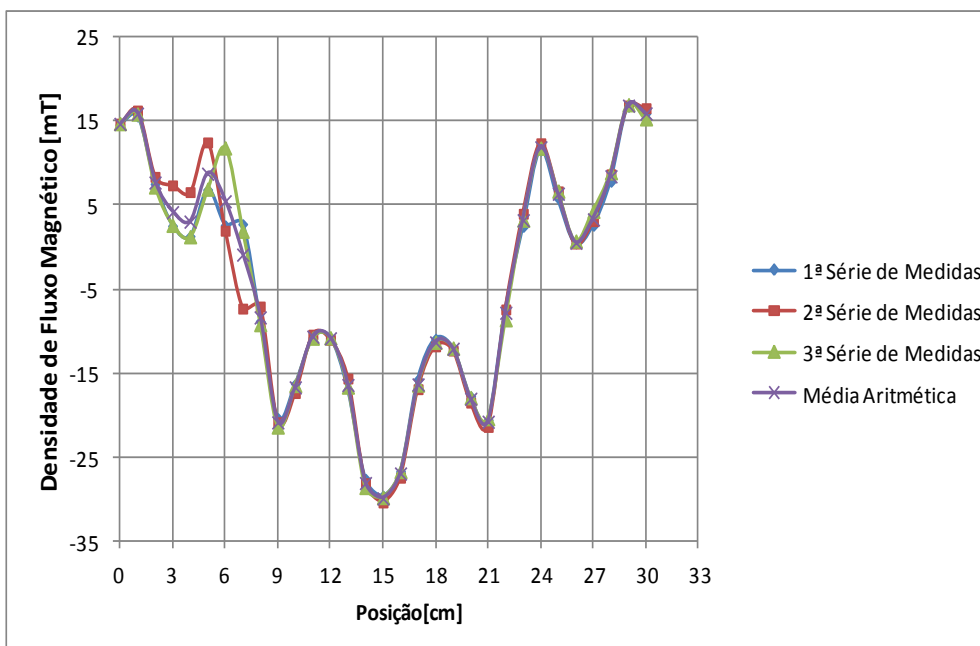
As medidas de bancada foram feitas com os equipamentos:

- Alicata BK PRECISION LEM. Modelo Analyst 2060; Patrimônio:466985 (usado como amperímetro);
- Multímetro ICEL AD-8800, na posição DC- temperatura;
- Gaussímetro F.W. BELL. Modelo 5080.

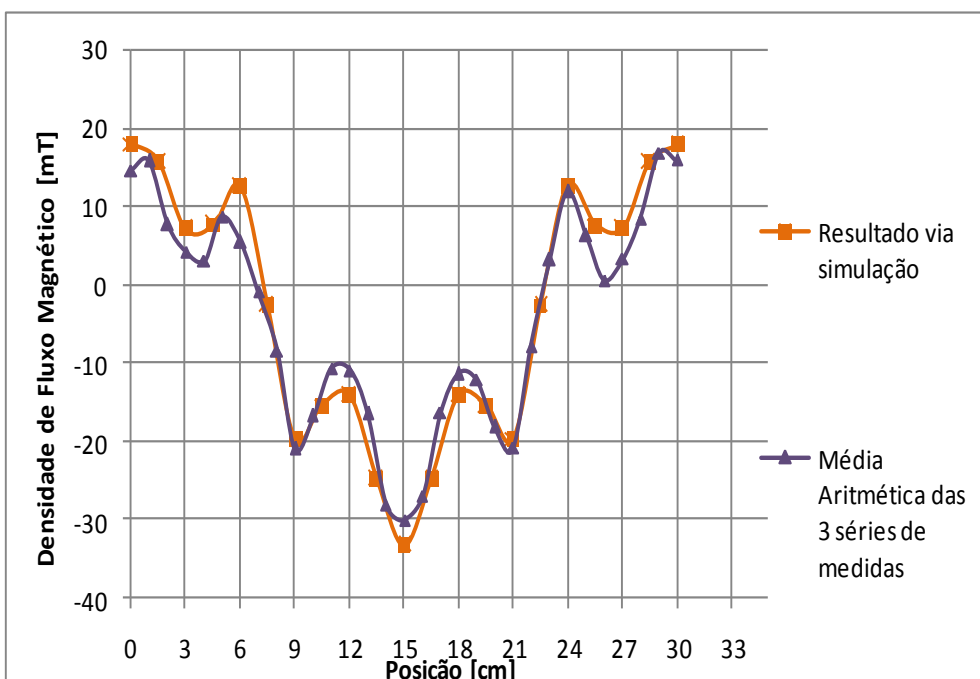
Para medir a densidade de fluxo na superfície do M.I.L., foram considerados 31 pontos discretos, distantes 1cm dos pontos adjacentes, perfazendo toda a largura do núcleo da armadura. Além disto, todos os pontos mapeados encontram-se a uma profundidade de 24cm (metade da profundidade total do motor), a contar da extremidade frontal do secundário. Na Figura 4.1, pode-se observar, além do motor, um objeto metálico, posicionado em cima da placa de alumínio. Tal equipamento é um sistema de medida com dois graus de liberdade, utilizado para auxiliar o posicionamento da ponteira do gaussímetro sobre os 31 pontos a serem mapeados. Tendo em vista a possível ocorrência de incertezas nas medidas como consequência de erros humanos, principalmente os relacionados à baixa precisão do posicionamento da ponta do gaussímetro nos pontos desejados, efetuaram-se três séries de medidas de densidade de fluxo (em miliTesla) para cada uma das 31 posições mapeadas. Em seguida, considerou-se a média aritmética dos três valores como referência para a comparação com os resultados obtidos via simulação.

**Tabela 4.2 - Séries de Medidas de Densidade de Fluxo Magnético [mT] para os 31 pontos mapeados na superfície do secundário do M.I.L. para propulsão de uma boia.**

Ponto	Densidade de Fluxo [mT]			
	1ª Medida	2ª Medida	3ª Medida	Média Aritmética
0	14.63	14.74	14.75	14.71
1	15.57	16.3	15.89	15.92
2	7.55	8.40	7.20	7.72
3	2.56	7.38	2.63	4.19
4	1.33	6.58	1.27	3.06
5	6.87	12.5	6.94	8.77
6	2.63	1.98	11.85	5.49
7	2.77	-7.30	1.93	-0.87
8	-8.80	-7.05	-9.20	-8.35
9	-20.33	-20.84	-21.40	-20.86
10	-16.25	-17.36	-16.45	-16.69
11	-10.75	-10.40	-10.81	-10.65
12	-10.73	-11.02	-10.77	-10.84
13	-16.94	-15.63	-16.64	-16.40
14	-27.56	-28.10	-28.60	-28.09
15	-29.58	-30.40	-29.8	-29.93
16	-26.70	-27.45	-26.7	-26.95
17	-15.72	-16.90	-16.40	-16.34
18	-10.88	-11.80	-11.30	-11.33
19	-11.97	-12.30	-12.00	-12.09
20	-17.75	-18.50	-17.90	-18.05
21	-20.55	-21.40	-20.40	-20.78
22	-7.38	-7.40	-8.62	-7.80
23	2.43	4.00	3.25	3.23
24	11.53	12.40	11.82	11.92
25	5.79	6.67	6.70	6.39
26	0.45	0.45	0.75	0.55
27	2.56	3.12	4.30	3.33
28	7.80	8.70	8.90	8.47
29	16.73	16.9	17	16.88
30	15.97	16.58	15.32	15.96



**Figura 4.2 - Curvas de Densidade de Fluxo Magnético [mT] versus a posição [cm] na superfície da placa de alumínio do M.I.L. para as 3 Séries de Medidas e para a Média Aritmética das mesmas.**



**Figura 4.3 - Curvas de Densidade de Fluxo Magnético[mT] versus Posição na Superfície da Placa de Alumínio [cm] para a Média Aritmética das Séries de Medidas e para os Resultados obtidos via simulação em ANSYS.**

### ❖ Conclusões Parciais

Pela análise da Tabela 4.2 e da Figura 4.2, pode-se concluir que as três séries de medidas apresentaram algumas variações nos valores de densidade de fluxo magnético obtidos. As discrepâncias foram mais significativas do ponto 3 ao ponto 7. Tais variações foram consideradas ao se adotar como referência a média aritmética dos valores registrados para cada posição analisada.

Pela Figura 4.3, constata-se que os valores de densidade de fluxo magnético obtidos via simulação aproximaram-se, para toda a largura do motor, dos valores mapeados. Portanto, comparando-se os resultados simulados com a média aritmética das séries de medidas, é possível validar o modelo de simulação adotado, já que os resultados simulados foram bastante satisfatórios frente aos reais.

#### **4.3.2 Obtenção dos Resultados de Força para o Primário do Motor 2, com Secundário do Tipo Placa de Alumínio**

Na segunda etapa de simulações, buscou-se modelar a armadura do Motor 2. O primário do M.I.L. em questão está mostrado no APÊNDICE I Nesta fase do projeto, o modelo simulado possui secundário do tipo placa de alumínio ao invés de gaiola de esquilo, como é no motor real, ilustrado na Figura 1.2.

O objetivo desta fase do trabalho foi avaliar a sensibilidade de alguns parâmetros na determinação das forças de tração e levitação para armadura do *Motor 2* com secundário em placa metálica, como descrito anteriormente. Para tanto, foram realizadas simulações em ANSYS.

#### **4.3.2.1 Características da Simulação**

As simulações realizadas nesta etapa valeram-se de algumas configurações comuns, determinadas através das linhas de comando empregadas, a saber:

- ✓ Análise Bi-dimensional (2D);
- ✓ Análise harmônica;
- ✓ Cálculo da força via Lei de Ampère;

Como o secundário modelado é do tipo placa metálica não-ferromagnética, o cálculo de forças foi feito através da Lei de Lorentz (Lei de Força de Ampère), cuja teoria está descrita na Seção 3.5.1.

Para cada simulação, foram obtidos os resultados de força de tração e levitação para 21 valores distintos de escorregamento, de 0.001 a 1.001, com passo de 0.05.

#### **4.3.2.2 Estudo dos Casos**

Foram realizadas simulações para analisar o comportamento das curvas de força de tração e de levitação em função da velocidade do secundário em pu na base da velocidade síncrona. A partir de um caso base, comum a todas as análises, foram feitas comparações para dois outros casos, para cada um dos quatro parâmetros de interesse, a saber:

- Tensão de Alimentação;
- Espessura do secundário;
- Bitola dos Condutores do Enrolamento de Armadura;
- Comprimento do entreferro (*gap*).

Todos os demais parâmetros foram mantidos inalterados ao longo do processo de simulação.



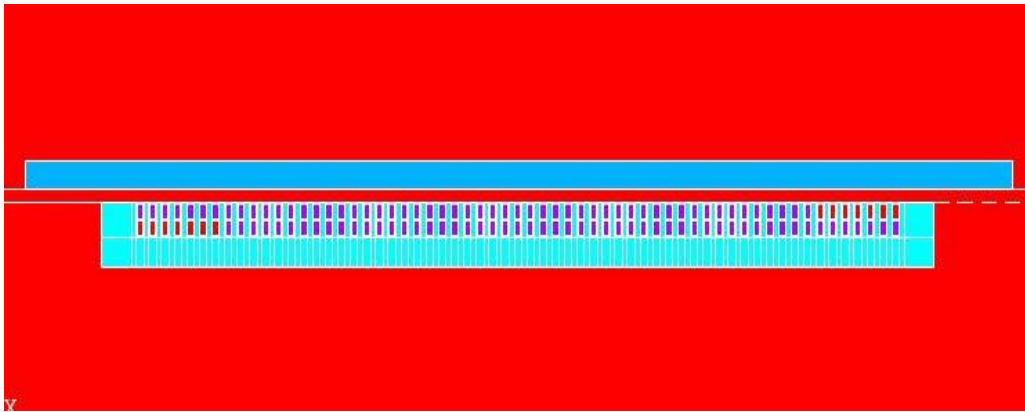


Figura 4.4 - Vista do Motor 2 simulado com secundário do tipo placa metálica de alumínio.

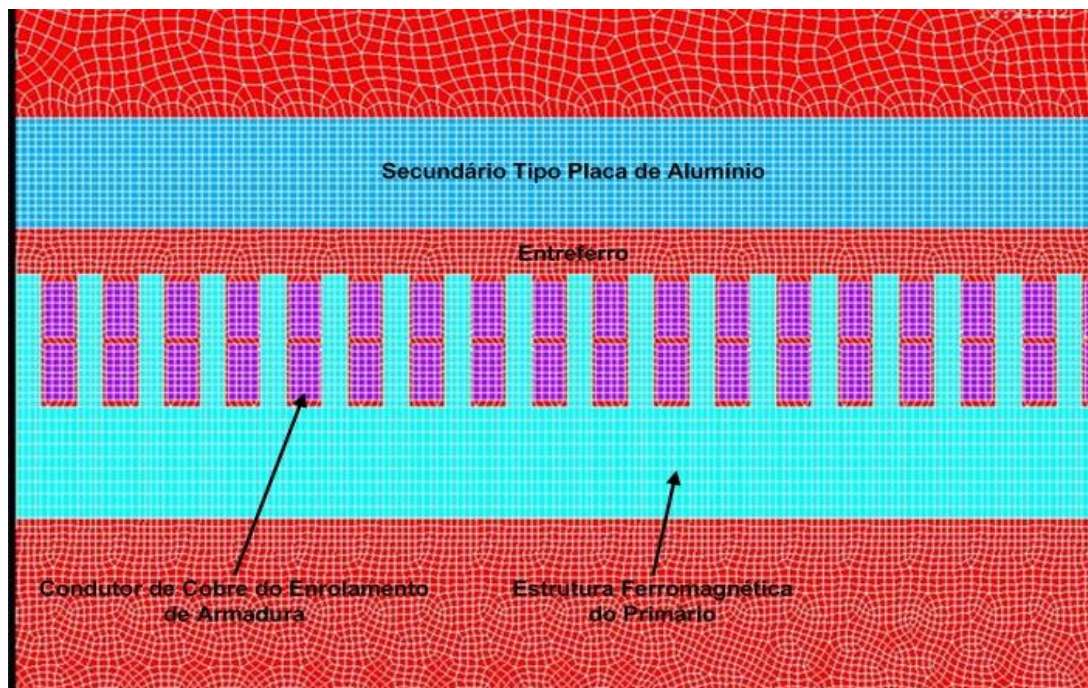


Figura 4.5 - Vista em zoom de um trecho do “Motor 2” simulado com secundário em placa. Malha para solução pelo MEF.

A Figura 4.4 mostra a vista frontal do motor simulado (com primário igual ao do *Motor 2*, mas secundário do tipo placa metálica), onde as diferentes cores representam os diferentes materiais e suas propriedades eletromagnéticas, como permeabilidade magnética e resistividade. A Figura 4.5 mostra, em zoom, um trecho do motor da Figura 4.4, com a indicação de cada parte constitutiva do mesmo. Mostra ainda a malha criada para a resolução do problema pelo Método dos Elementos Finitos. Pode-se perceber que

na região de maior interesse, isto é, na placa metálica do secundário e no seu entorno, a malha é mais refinada, pois é nesta região que se deseja calcular as forças.

#### 4.3.2.2.1 Caso Base

No caso base foi simulado o primário do *Motor 2*, mostrado no APÊNDICE I, com as seguintes características:

- ❖ Tensão de Alimentação: 420V - Y (tensão eficaz entre fases);
- ❖ Frequência Síncrona: 25Hz;
- ❖ Espessura do Secundário: 19 mm
- ❖ Comprimento do Entreferro (*gap*): 16 mm
- ❖ Bitola dos Condutores do Enrolamento Primário:  $1.3 \times 9.2 \times 0.9 = 10.76 \text{ mm}^2$ , correspondente ao fator de enchimento 0.9.
- ❖ Número de Espiras no Enrolamento de Armadura por Bobina por Fase: 13
- ❖ Comprimento do passo polar: 15.4cm

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente, os valores das Forças de Tração e de Levitação obtidos através das simulações pelo MEF para o M.I.L. do caso base.

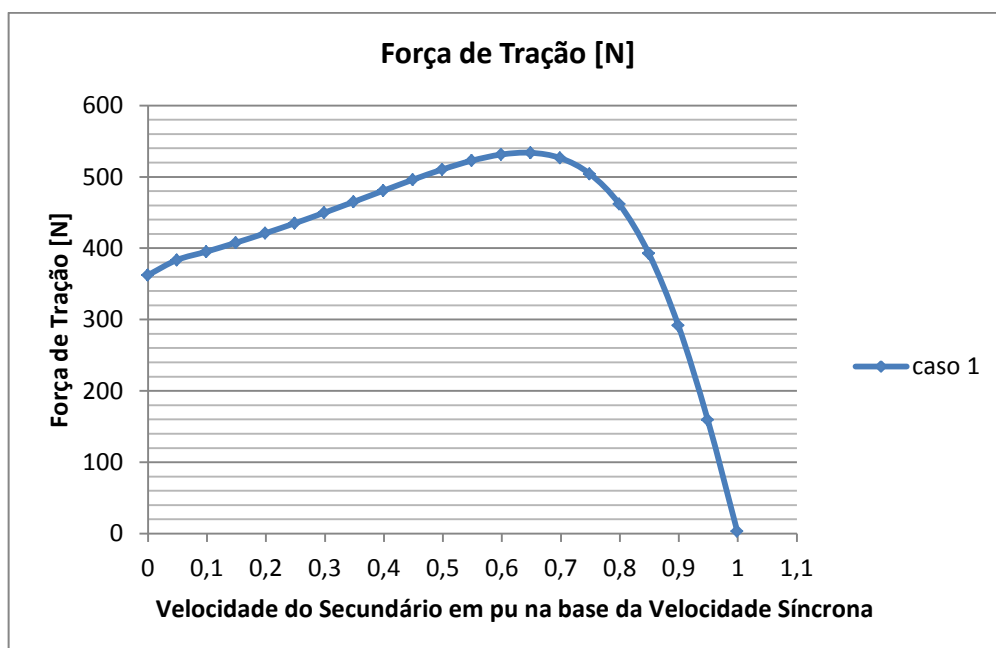


Figura 4.6 - Força de Tração[N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Caso Base.

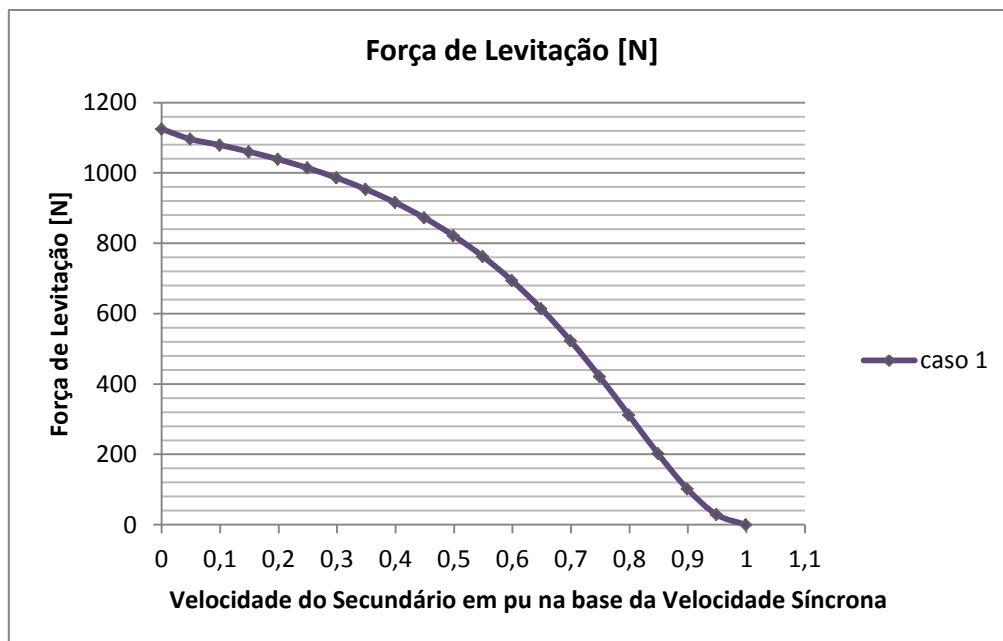


Figura 4.7 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Caso Base.

Tabela 4.3 - Forças de Tração e Levitação para cada valor de escorregamento obtidos através de simulação em ANSYS para o Caso Base.

Força de Tração [N]	Força de Levitação [N]	$F_y[N]/F_x[N]$	Escorregamento	1-s
3.255	0.09521	0.03	0.001	0.999
159.4	28.83	0.19	0.051	0.949
291.9	101.8	0.35	0.101	0.899
392.6	201.6	0.51	0.151	0.849
461.8	311.9	0.68	0.201	0.799
504.2	421.3	0.84	0.251	0.749
526.3	523.1	0.99	0.301	0.699
533.7	614.2	1.15	0.351	0.649
531.3	693.9	1.31	0.401	0.599
522.7	762.8	1.46	0.451	0.549
510.4	821.9	1.61	0.501	0.499
496.0	872.6	1.76	0.551	0.449
480.6	916.2	1.91	0.601	0.399
465.1	953.7	2.05	0.651	0.349
449.8	986.1	2.19	0.701	0.299
435.0	1014	2.33	0.751	0.249
421.0	1039	2.47	0.801	0.199
407.7	1060	2.60	0.851	0.149
395.2	1079	2.73	0.901	0.099
383.5	1096	2.86	0.951	0.049
362.5	1125	3.10	1.001	-0.001

Pela análise da Tabela 4.3, pode-se perceber que a força de tração máxima para o caso base ocorre para escorregamento  $s_{m\acute{a}x} = 0.35$  e é igual a 533.7 N. Já a força de levitação é máxima na partida do motor ( $s = 1$ ) e decresce conforme a velocidade do secundário se aproxima da velocidade síncrona. Para valores de escorregamento em torno de  $s_{m\acute{a}x}$ , as forças de tração e levitação apresentam aproximadamente o mesmo valor.

A partir do caso base puderam ser feitas as análises comparativas, variando o parâmetro para o qual se deseja conhecer a influência na determinação das forças de tração e levitação, enquanto os demais parâmetros foram mantidos constantes em relação ao caso base:

- **Análise das Forças de Tração e Levitação para Tensão Variável e Demais Parâmetros Fixos**

Para o estudo do comportamento das forças em relação à tensão de alimentação, foram consideradas três simulações, com tensões primárias (entre fases, valor rms) dadas por:

$$\begin{cases} V_1 = 420V \text{ (caso base)} \\ V_2 = 630V \\ V_3 = 210V \end{cases}$$

Deste modo, temos as seguintes relações de tensão:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{630}{420} = 1.5 \therefore \frac{V_2^2}{V_1^2} = 2.25 \quad \& \quad \frac{V_3}{V_1} = \frac{210}{420} = 0.5 \therefore \frac{V_3^2}{V_1^2} = 0.25 \quad (4.1)$$

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, os resultados de Força de Tração e Levitação obtidos via simulação pelo MEF para um M.I.L. com o primário similar ao do *Motor 2* e secundário do tipo placa de alumínio, para as tensões  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ .

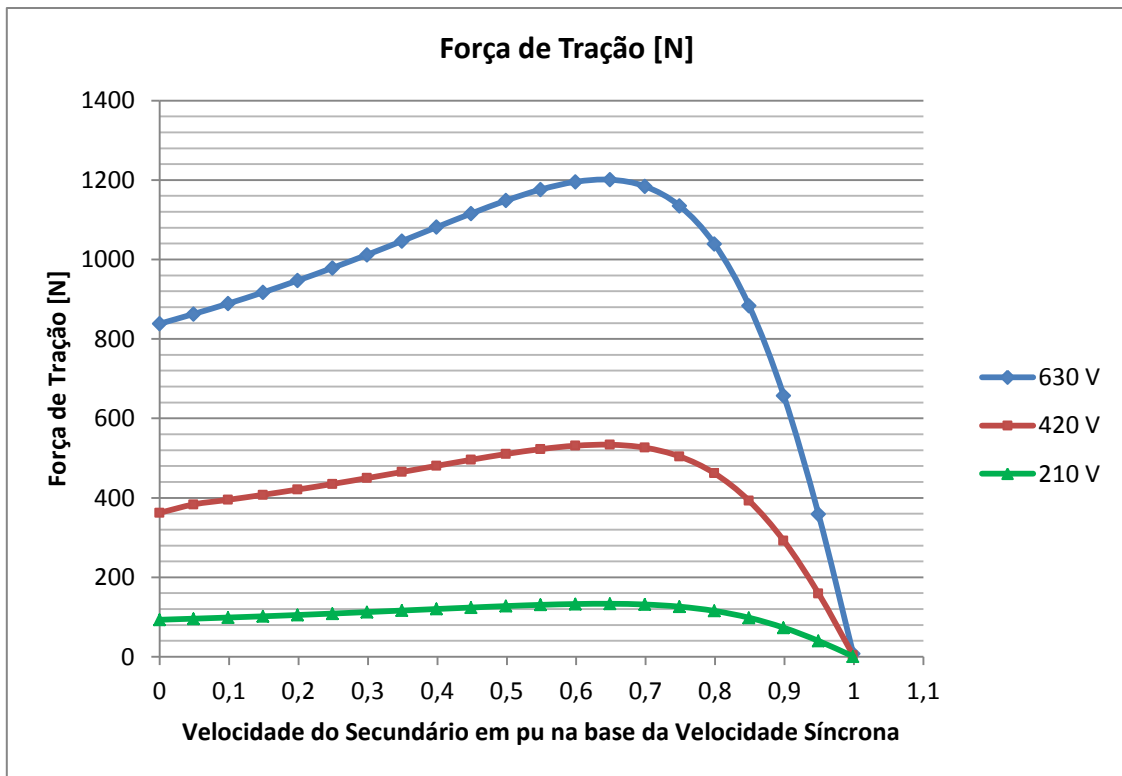


Figura 4.8 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para tensão de alimentação variável e demais parâmetros constantes.

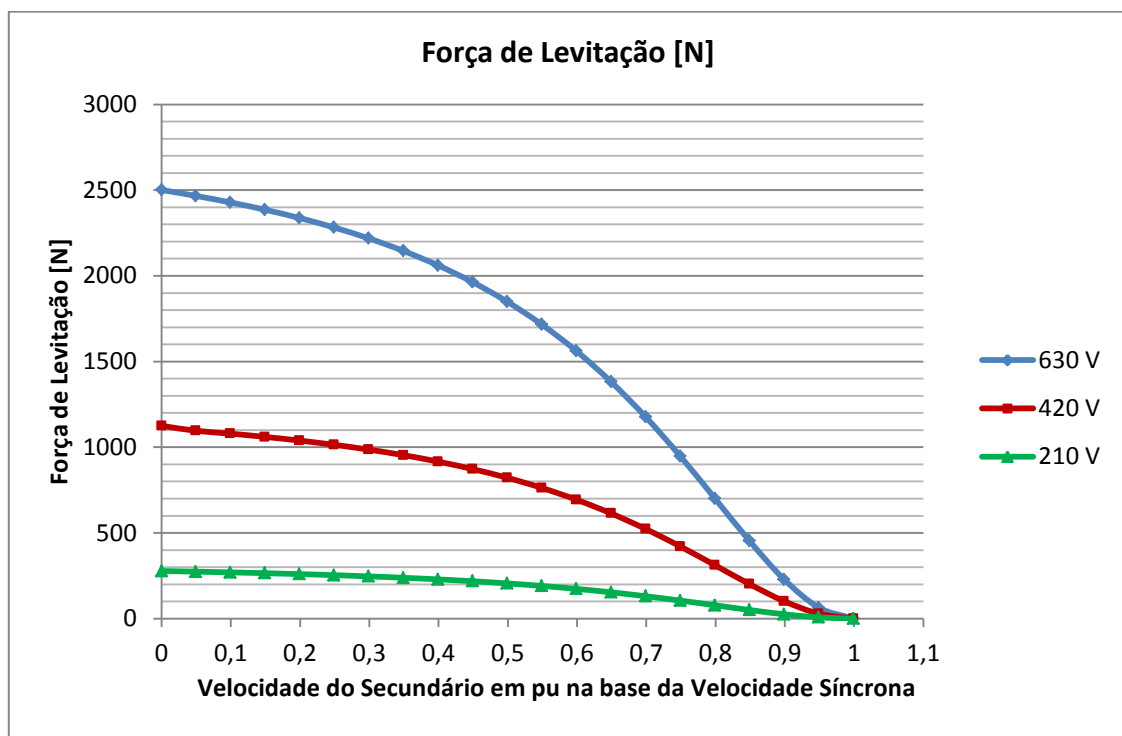


Figura 4.9 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para tensão de alimentação variável e demais parâmetros constantes.

**Tabela 4.4 - Força de Tração[ N] pelo escorregamento para os casos de V=420V; V= 630V e V= 210V**

<b>Força de Tração [N]</b>			<b>Razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de tração para os casos 3 e 1</b>	<b>Escorregamento</b>
<b>Caso 1: V=420 V</b>	<b>Caso 2: V=630 V</b>	<b>Caso 3: V=210 V</b>			
3.255	7.3	0.8	2.25	0.25	0.001
159.4	358.7	39.90	2.25	0.25	0.051
291.9	656.8	73.00	2.25	0.25	0.101
392.6	883.4	98.22	2.25	0.25	0.151
461.8	1039	115.5	2.25	0.25	0.201
504.2	1135	126.1	2.25	0.25	0.251
526.3	1184	131.6	2.25	0.25	0.301
533.7	1201	133.4	2.25	0.25	0.351
531.3	1196	132.8	2.25	0.25	0.401
522.7	1176	130.7	2.25	0.25	0.451
510.4	1148	127.6	2.25	0.25	0.501
496.0	1116	124.0	2.25	0.25	0.551
480.6	1081	120.2	2.25	0.25	0.601
465.1	1046	116.3	2.25	0.25	0.651
449.8	1012	112.5	2.25	0.25	0.701
435.0	978.9	108.8	2.25	0.25	0.751
421.0	947.2	105.2	2.25	0.25	0.801
407.7	917.3	101.9	2.25	0.25	0.851
395.2	889.2	98.80	2.25	0.25	0.901
383.5	862.9	95.90	2.25	0.25	0.951
362.4	838.3	93.15	2.31	0.25	1.001

**Tabela 4.5 - Força de Levitação[ N] pelo escorregamento para os casos de V=420V; V= 630V e V= 210V**

<b>Força de Levitação [N]</b>			<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 3 e 1</b>	<b>Escorregamento</b>
<b>Caso 1: V=420 V</b>	<b>Caso 2: V=630 V</b>	<b>Caso 3: V=210 V</b>			
0.09521	0.2	0	2.25	0.25	0.001
28.8	64.9	7.2	2.25	0.25	0.051
101.8	229.1	25.4	2.25	0.25	0.101
201.6	453.6	50.4	2.25	0.25	0.151
311.9	701.8	78.0	2.25	0.25	0.201
421.3	948.0	105.3	2.25	0.25	0.251
523.1	1177	130.8	2.25	0.25	0.301
614.2	1382	153.5	2.25	0.25	0.351
693.9	1561	173.5	2.25	0.25	0.401
762.8	1716	190.7	2.25	0.25	0.451
821.9	1850	205.5	2.25	0.25	0.501
872.6	1963	218.2	2.25	0.25	0.551
916.2	2061	229.0	2.25	0.25	0.601
953.7	2146	238.4	2.25	0.25	0.651
986.1	2219	246.5	2.25	0.25	0.701
1014	2282	253.6	2.25	0.25	0.751
1039	2337	259.7	2.25	0.25	0.801
1060	2386	265.1	2.25	0.25	0.851
1079	2429	269.9	2.25	0.25	0.901
1096	2467	274.1	2.25	0.25	0.951
1125	2501	277.8	2.23	0.25	1.001

Com base nas Tabelas 4.4 e 4.5, e nas equações (2.13) e (4.1), pode-se concluir que a relação entre as forças de tração e levitação obtidas por meio da simulação corresponde à prevista em teoria.

- **Análise das Forças de Tração e Levitação para Gap Variável e Demais**

**Parâmetros Fixos**

Para o estudo do comportamento das forças em relação ao comprimento do entreferro, foram consideradas três simulações, com comprimentos do *gap* dados por:

$$\begin{cases} gap_1 = 16mm \text{ (caso base)} \\ gap_2 = 8mm \\ gap_3 = 20mm \end{cases}$$

Deste modo, temos as seguintes relações entre os *gaps*:

$$\frac{gap_2}{gap_1} = \frac{8}{16} = 0.5 \therefore \sqrt{\frac{gap_2}{gap_1}} = 0.707 \therefore \sqrt{\frac{gap_1}{gap_2}} = 1.414 \quad (4.2)$$

$$\frac{gap_3}{gap_1} = \frac{20}{16} = 1.5 \therefore \sqrt{\frac{gap_3}{gap_1}} = 1.224 \therefore \sqrt{\frac{gap_1}{gap_3}} = 0.816 \quad (4.3)$$

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram, respectivamente, os resultados de Força de Tração e Levitação obtidos via simulação pelo MEF para um M.I.L. com o primário similar ao do *Motor 2* e secundário do tipo placa de alumínio, para as espessuras de entreferro dadas por  $gap_1$ ,  $gap_2$  e  $gap_3$ .

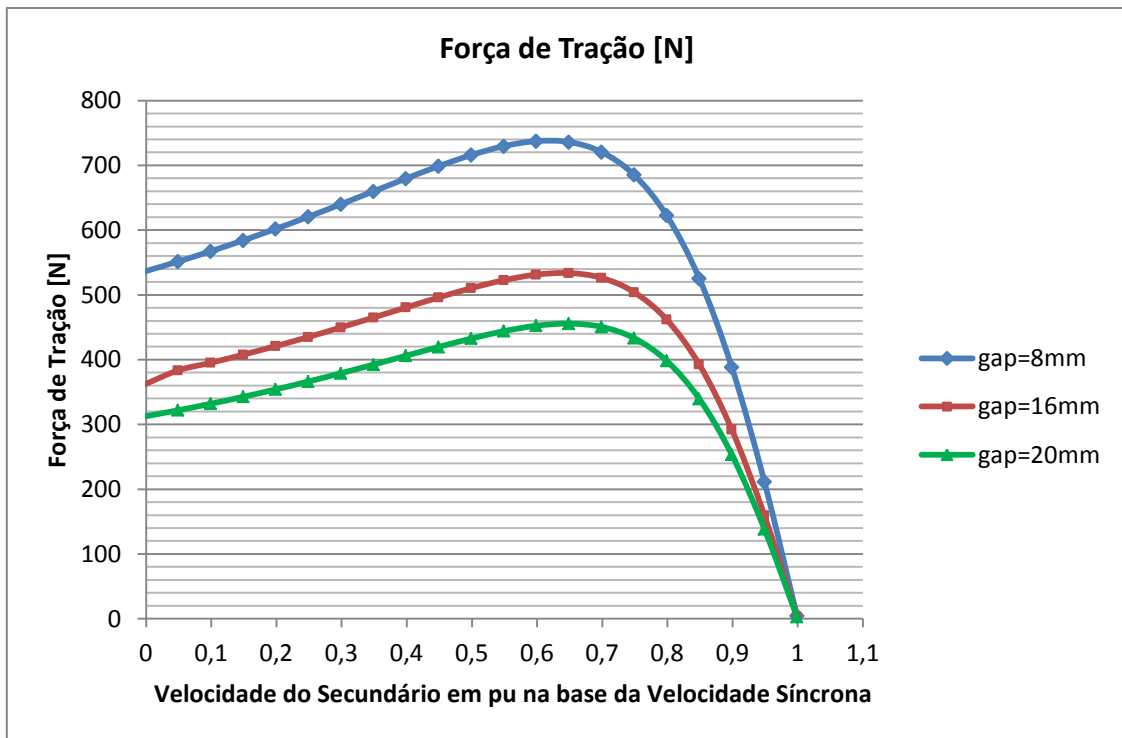


Figura 4.10 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para espessura de entreferro variável e demais parâmetros constantes.

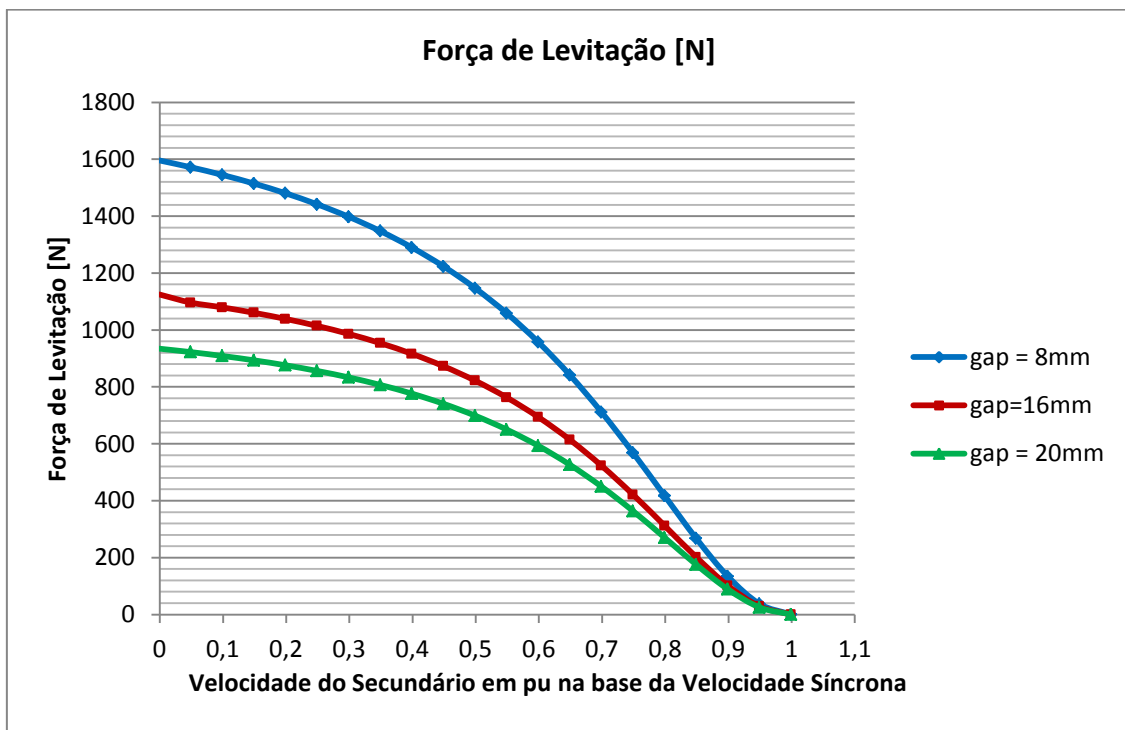


Figura 4.11 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para espessura de entreferro variável e demais parâmetros constantes.



**Tabela 4.6 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de gap=16mm; 8mm e 20mm.**

<b>Força de Tração [N]</b>			<b>Razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de tração para os casos 3 e 1</b>	<b>Escorregamento</b>
<b>Caso 1: gap=16mm</b>	<b>Caso 2: gap=8mm</b>	<b>Caso 3: gap=20mm</b>			
3.255	4.324	2.826	1.32	0.86	0.001
159.4	211.4	138.5	1.33	0.87	0.051
291.9	388.3	253.2	1.33	0.87	0.101
392.6	525.4	339.6	1.34	0.87	0.151
461.8	622.6	398.1	1.35	0.85	0.201
504.2	685.2	433.2	1.36	0.85	0.251
526.3	720.6	450.6	1.37	0.86	0.301
533.7	736.0	455.6	1.38	0.86	0.351
531.3	737.4	452.4	1.39	0.86	0.401
522.7	729.6	444.0	1.40	0.85	0.451
510.4	715.9	432.6	1.40	0.85	0.501
496.0	698.7	419.7	1.41	0.85	0.551
480.6	679.7	406.1	1.41	0.84	0.601
465.1	659.9	392.4	1.42	0.84	0.651
449.8	640.1	379.1	1.42	0.84	0.701
435.0	620.7	366.3	1.43	0.84	0.751
421.0	602.0	354.1	1.43	0.84	0.801
407.7	584.2	342.7	1.43	0.84	0.851
395.2	567.4	331.9	1.43	0.84	0.901
383.5	551.5	321.9	1.44	0.84	0.951
362.4	536.6	312.6	1.48	0.86	1.001

**Tabela 4.7 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de gap=16mm; 8mm e 20mm.**

<b>Força de Levitação [N]</b>			<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 3 e 1</b>	<b>Escorregamento</b>
<b>Caso 1: gap=16mm</b>	<b>Caso 2: gap=8mm</b>	<b>Caso 3: gap=20mm</b>			
0.09521	0.09694	0.09243	1.02	0.97	0.001
28.83	37.61	25.31	1.31	0.88	0.051
101.8	134.0	88.82	1.32	0.87	0.101
201.6	267.3	175.2	1.33	0.87	0.151
311.9	417.1	270.1	1.34	0.87	0.201
421.3	568.2	363.5	1.35	0.86	0.251
523.1	711.3	449.6	1.36	0.86	0.301
614.2	841.6	526.2	1.37	0.86	0.351
693.9	957.3	592.8	1.38	0.85	0.401
762.8	1059	650.0	1.39	0.85	0.451
821.9	1147	698.9	1.40	0.85	0.501
872.6	1223	740.6	1.40	0.85	0.551
916.2	1290	776.3	1.41	0.85	0.601
953.7	1348	806.9	1.41	0.85	0.651
986.1	1398	833.3	1.42	0.85	0.701
1014	1442	856.1	1.42	0.84	0.751
1039	1480	876.0	1.43	0.84	0.801
1060	1515	893.4	1.43	0.84	0.851
1079	1545	908.7	1.43	0.84	0.901
1096	1572	922.3	1.43	0.84	0.951
1125	1596	934.4	1.42	0.83	1.001

As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram as razões entre as forças de tração e levitação entre os casos 2 ( $gap_2 = 8mm$ ) e o caso base ( $gap_1 = 16mm$ ) e entre o caso 3 ( $gap_3 = 20mm$ ) e o caso base esperados teoricamente e os valores simulados mais distantes dos teóricos.

**Tabela 4.8 - Erro percentual para o pior caso da razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1 e para os casos 3 e 1**

	<b>Razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de tração para os casos 3 e 1</b>
<b>Valor esperado</b>	1.41	0.82
<b>Pior valor obtido via simulação</b>	1.32	0.87
<b>Pior Erro Percentual*</b>	6.4%	6.1%

**Tabela 4.9 - Erro percentual para o pior caso da razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1 e para os casos 3 e 1**

	<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1</b>	<b>Razão entre as forças de levitação para os casos 3 e 1</b>
<b>Valor esperado</b>	1.41	0.82
<b>Pior valor obtido via simulação</b>	1.31 **	0.88
<b>Pior Erro Percentual*</b>	7.1%	7.3%

\* Dado por:  $\left| \frac{\text{pior valor obtido} - \text{valor esperado}}{\text{valor esperado}} \right| \times 100\%$

\*\*Não foi considerado o resultado obtido para escorregamento 0.051.

Observando as Tabelas 4.6 e 4.7 e as equações (4.2) e (4.3), pode-se constatar que os resultados de força obtidos via simulação variam com a raiz quadrada do inverso da espessura de entreferro. Com base nas Tabelas 4.8 e 4.9, percebe-se que os erros percentuais obtidos via simulação (em relação à consideração de proporcionalidade das forças ao inverso da raiz quadrada do  $gap$ ) são inferiores a 7.3%.

- **Análise das Forças de Tração e Levitação para Espessura do Secundário**  
**Variável e Demais Parâmetros Fixos**

Para o estudo do comportamento das forças em relação à espessura do secundário, foram consideradas três simulações, com espessuras da placa de alumínio dadas por:

$$\begin{cases} h_1 = 19mm \text{ (caso base)} \\ h_2 = 37.5m \\ h_3 = 9mm \end{cases}$$

A resistência elétrica  $R$  de um material de área de seção transversal  $A_{seção}$ , resistividade elétrica  $\rho$  e comprimento  $l$ , é dada pela equação (4.4).

$$R = \frac{\rho l}{A_{seção}} \quad (4.4)$$

No caso do Motor de Indução Linear simulado, a resistência da placa do secundário é dada em função da profundidade do motor ( $l$ ), da resistividade do alumínio ( $\rho$ ) e da área da seção transversal, que está ilustrada na Figura 4.12, plotada em ANSYS, e calculada por meio da equação (4.5).

$$A_{seção} = (\text{largura da placa}) \times (\text{espessura da placa}) \quad (4.5)$$



Figura 4.12 - Vista frontal da placa de alumínio do motor de indução linear com secundário do tipo placa metálica (e armadura do “Motor 2”), simulado em ANSYS.

Substituindo a equação (4.4) em (4.5), pode-se concluir que a resistência do secundário é inversamente proporcional à sua espessura. Deste modo, quanto mais espesso o secundário, menor a sua resistência.

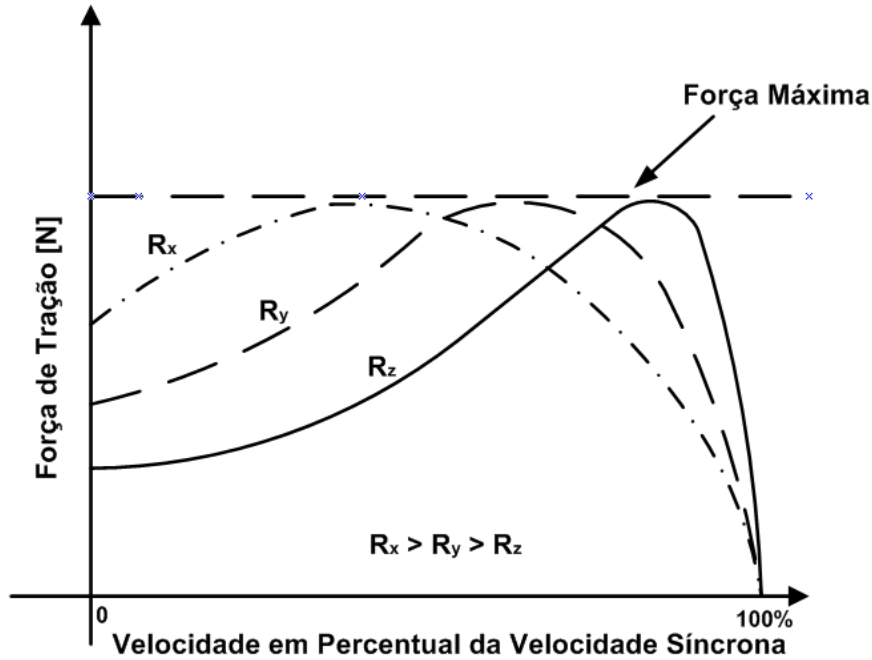


Figura 4.13 - Comportamento teórico das curvas de Força de Tração [N] versus velocidade de secundário em percentual da velocidade síncrona para diferentes valores de resistência secundária.

A Figura 4.13 mostra o comportamento teórico da Força de Tração [N] pela velocidade do secundário em pu na base da velocidade síncrona. Pode-se perceber que para todos os valores de resistência, a força normal máxima atingida tem o mesmo valor. Entretanto, o escorregamento  $s_{m\acute{a}x}$ , para o qual esta força é máxima, varia em função da resistência do secundário. Quanto maior a resistência, maior o valor de  $s_{m\acute{a}x}$ . Deste modo, espera-se que para o M.I.L. simulado a maior resistência do secundário seja associada a  $h_3 = 9mm$ , seguida da relativa a  $h_1 = 19mm$  e a menor resistência seja referente a  $h_2 = 37.5mm$ . Em suma, espera-se, teoricamente, que:

$$s_{m\acute{a}x3} > s_{m\acute{a}x1} > s_{m\acute{a}x2}$$

Relativos, respectivamente, a  $h_3 = 9mm$ ,  $h_1 = 19mm$  e  $h_2 = 37.5mm$ .

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, os resultados de Força de Tração e Levitação obtidos via simulação pelo MEF para um M.I.L. com o primário similar ao do *Motor 2* e secundário do tipo placa de alumínio, para  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ .

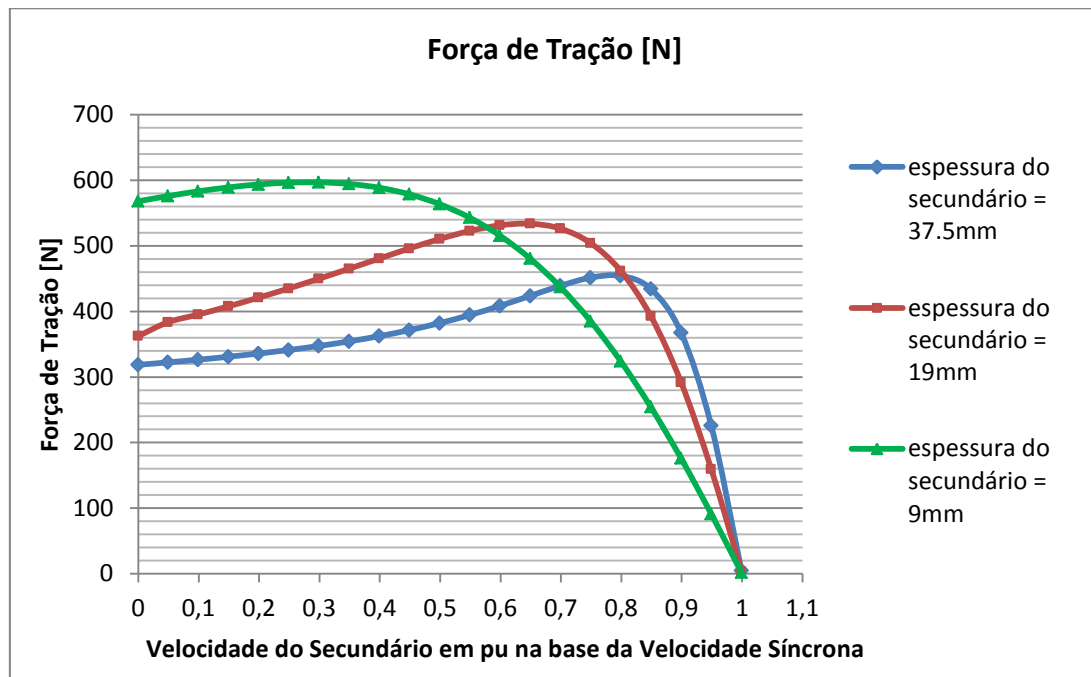


Figura 4.14 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para espessura do secundário variável e demais parâmetros constantes

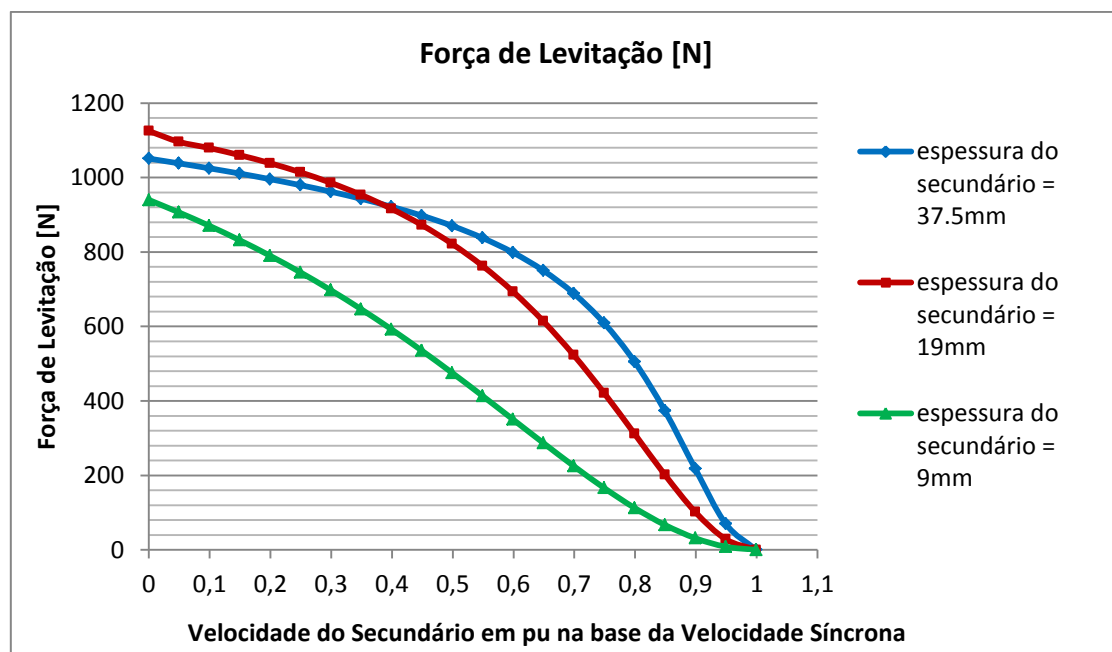


Figura 4.15 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para espessura do secundário variável e demais parâmetros constantes

**Tabela 4.10 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de espessura de secundário h = 19mm; 37.5mm e 9mm.**

Força de Tração [N]			Escorregamento
Caso 1: h=19mm	Caso 2: h=37.5mm	Caso 3: h=9mm	
3.255	4.895	1.813	0.001
159.4	225.7	91.12	0.051
291.9	367.5	175.9	0.101
392.6	434.2	254.0	0.151
461.8	454.3	324.0	0.201
504.2	451.5	385.2	0.251
526.3	439.0	437.3	0.301
533.7	423.7	480.5	0.351
531.3	408.5	515.5	0.401
522.7	394.5	542.9	0.451
510.4	382.2	563.6	0.501
496.0	371.5	578.6	0.551
480.6	362.3	588.6	0.601
465.1	354.3	594.4	0.651
449.8	347.3	596.8	0.701
435.0	341.2	596.3	0.751
421.0	335.8	593.6	0.801
407.7	330.9	589.1	0.851
395.2	326.4	583.1	0.901
383.5	322.3	575.9	0.951
362.4	318.5	567.9	1.001

**Tabela 4.11 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de espessura de secundário h = 19mm; 37.5mm e 9mm.**

Força de Levitação [N]			Escorregamento
Caso 1: h=19mm	Caso 2: h=37.5mm	Caso 3: h=9mm	
0.09521	0.1734	0.04617	0.001
28.80	70.31	8.510	0.051
101.8	217.9	31.40	0.101
201.6	373.5	67.10	0.151
311.9	505.6	112.8	0.201
421.3	609.1	166.3	0.251
523.1	688.7	225.1	0.301
614.2	750.2	287.1	0.351
693.9	798.7	350.3	0.401
762.8	837.8	413.5	0.451
821.9	870.3	475.4	0.501
872.6	897.9	535.2	0.551
916.2	921.8	592.5	0.601
953.7	943.1	646.7	0.651
986.1	962.2	697.8	0.701
1014	979.7	745.7	0.751
1039	995.8	790.4	0.801
1060	1011	832.1	0.851
1079	1025	870.8	0.901
1096	1038	906.7	0.951
1125	1051	940.0	1.001

Da Tabela 4.10, infere-se que a força de tração máxima para as diferentes espessuras de secundário e os escorregamentos  $s_{m\acute{a}x}$  para os quais elas ocorrem são dadas de acordo com a Tabela 4.12.

**Tabela 4.12 - Força Normal Máxima [N] e escorregamento máximo para as 3 espessuras do secundário**

	Caso 1: $h_1 = 19mm$	Caso 2: $h_2 = 37.5mm$	Caso 3: $h_3 = 9mm$
<b>Força Normal Máxima [N]</b>	533.7	454.3	596.8
<b>Escorregamento (<math>s_{m\acute{a}x}</math>)</b>	0.351	0.201	0.701

A partir da Tabela 4.12, conclui-se que  $s_{m\acute{a}x3} > s_{m\acute{a}x1} > s_{m\acute{a}x2}$ , conforme previsto teoricamente. Contudo, os valores máximos da força normal desenvolvida diferem entre si, a saber:

- ✓ Diferença percentual em relação ao caso base entre a força normal máxima obtida para os casos 1 ( $h_1 = 19mm$ ) e 2 ( $h_2 = 37.5mm$ ):

$$\frac{533.7-454.3}{533.7} \times 100\% = \mathbf{14.9\%}$$

- ✓ Diferença percentual em relação ao caso base entre a força normal máxima obtida para os casos 1 ( $h_1 = 19mm$ ) e 3 ( $h_3 = 9mm$ ):

$$\frac{596.8-533.7}{533.7} \times 100\% = \mathbf{11.8\%}$$

- ✓ Diferença percentual em relação ao caso base entre a força normal máxima obtida para os casos 2 ( $h_2 = 37.5mm$ ) e 3 ( $h_3 = 9mm$ ):

$$\frac{596.8-454.3}{533.7} \times 100\% = \mathbf{26.7\%}$$

Esta diferença percentual entre os picos de força de tração para cada uma das três espessuras pode ser entendida se for considerada também a variação da reatância para cada espessura (e não apenas da resistência) e o decaimento do fluxo magnético à medida em que se aumenta a espessura da placa de alumínio.

- **Análise das Forças de Tração e Levitação para Bitola dos Condutores do Enrolamento de Armadura Variável e Demais Parâmetros Fixos**

Para o estudo do comportamento das forças em relação à bitola dos condutores, foram consideradas três simulações, fatores de enchimento dados por:

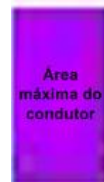
$$\begin{cases} FE_1 = 0.9 \text{ (caso base)} \\ FE_2 = 0.5 \\ FE_3 = 1.0 \end{cases}$$

O fator de enchimento é a representação utilizada nas linhas de comando do programa em ANSYS para expressar a bitola dos condutores. É dado pela razão entre a área ocupada pelo condutor efetivamente e a área máxima disponível para alocá-lo.

No enrolamento de armadura do motor considerado, em todos os casos simulados foram consideradas 13 espiras de seção reta por bobina. Deste modo, o fator de enchimento define a bitola utilizada, como mostrado na equação (4.6).

$$FE = \frac{A_{ocupada}}{A_{máxima}} = \frac{(NE) \times (b_1)}{(NE) \times (b_{max1})} = \frac{b_1}{b_{max1}} \quad (4.6)$$

Onde:  $FE$  é o fator de enchimento;  $A_{ocupada}$  é a área ocupada realmente pelos condutores;  $A_{máxima}$  é a área máxima de condutores, mostrada na Figura 4.16 (ampliada a partir da Figura 4.4);  $NE$  é o número de espiras;  $b_1$  é a bitola dos condutores simulados e  $b_{max1}$  é a bitola máxima dos condutores que pode ser empregada na área definida para o enrolamento.



**Figura 4.16 - Área Máxima de condutor do enrolamento de armadura, definida na simulação em ANSYS para a representação do primário do "Motor 2"**

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram, respectivamente, os resultados de Força de



Tração e Levitação obtidos via simulação pelo MEF para um M.I.L. com o primário similar ao do *Motor 2* e secundário do tipo placa de alumínio, para  $FE_1$ ,  $FE_2$  e  $FE_3$ .

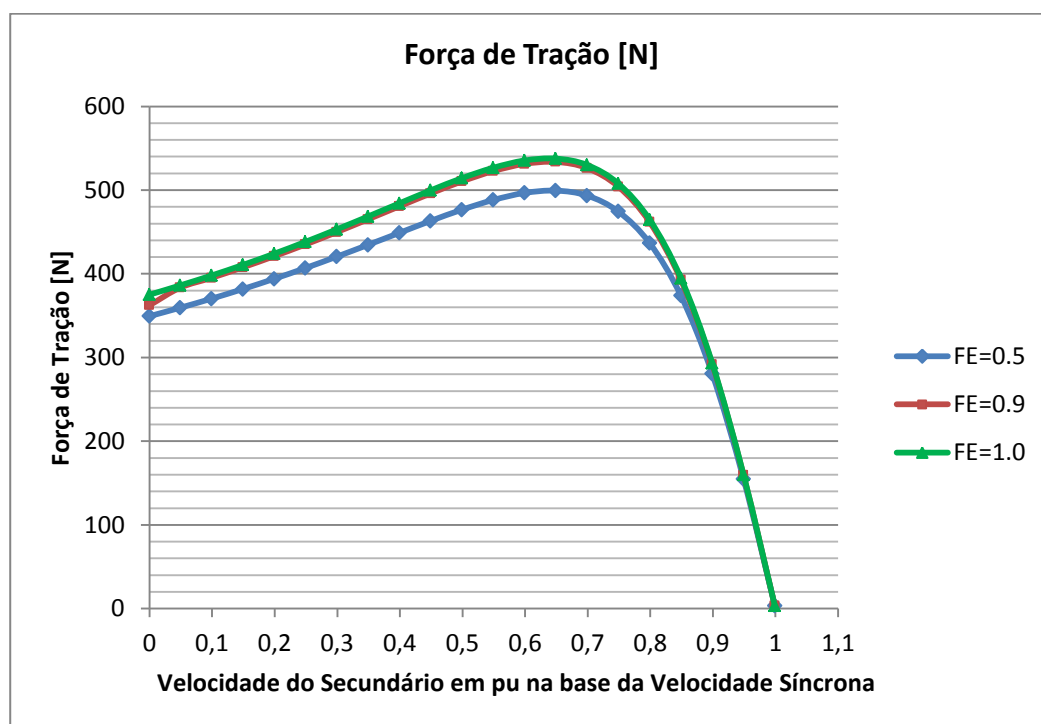


Figura 4.17 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para bitola dos condutores do enrolamento de armadura variável e demais parâmetros constantes.

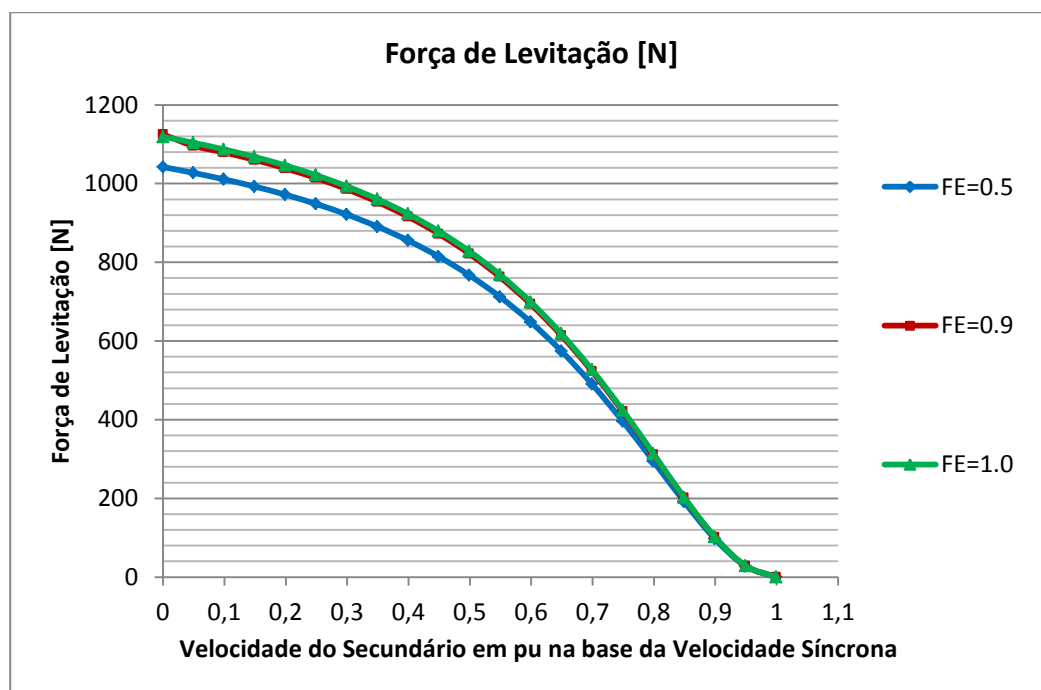


Figura 4.18 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para bitola dos condutores do enrolamento de armadura variável e demais parâmetros constantes.

Tabela 4.13 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de FE=0.9; 0.5 e 1.0

Força de Tração [N]			Razão entre as forças de tração para os casos 2 e 1	Razão entre as forças de tração para os casos 3 e 1	Escorregamento
Caso 1: FE=0.9	Caso 2: FE=0.5	Caso 3: FE=1.0			
3.25	3.2	3.3	0.99	1.02	0.001
159.4	154.9	159.9	0.9724	1.003	0.051
291.9	280.5	293.2	0.961	1.004	0.101
392.6	373.8	394.8	0.952	1.006	0.151
461.8	436.7	464.7	0.946	1.006	0.201
504.2	474.4	507.8	0.941	1.007	0.251
526.3	493.5	530.1	0.938	1.007	0.301
533.7	499.4	537.7	0.936	1.007	0.351
531.3	496.6	535.4	0.935	1.008	0.401
522.7	488.2	526.7	0.934	1.008	0.451
510.4	476.6	514.3	0.934	1.008	0.501
496.0	463.2	499.7	0.934	1.007	0.551
480.6	448.9	484.2	0.934	1.007	0.601
465.1	434.6	468.5	0.935	1.007	0.651
449.8	420.5	453.1	0.935	1.007	0.701
435.0	406.9	438.2	0.935	1.007	0.751
421.0	394.0	424.0	0.936	1.007	0.801
407.7	381.8	410.6	0.936	1.007	0.851
395.2	370.3	398.0	0.937	1.007	0.901
383.5	359.5	386.2	0.937	1.007	0.951
362.4	349.4	375.1	0.964	1.035	1.001

Tabela 4.14 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de FE=0.9; 0.5 e 1.0

Força de Levitação [N]			Razão entre as forças de levitação para os casos 2 e 1	Razão entre as forças de levitação para os casos 3 e 1	Escorregamento
Caso 1: FE=0.9	Caso 2: FE=0.5	Caso 3: FE=1.0			
0.1	0.1	0.1	1	1	0.001
28.80	27.90	28.90	0.969	1.003	0.051
101.8	97.70	102.3	0.960	1.005	0.101
201.6	191.8	202.7	0.951	1.005	0.151
311.9	294.7	313.9	0.945	1.006	0.201
421.3	396.2	424.3	0.940	1.007	0.251
523.1	490.3	526.9	0.937	1.007	0.301
614.2	574.5	618.8	0.935	1.007	0.351
693.9	648.2	699.2	0.934	1.008	0.401
762.8	712.1	768.6	0.934	1.008	0.451
821.9	767.2	828.2	0.933	1.008	0.501
872.6	814.7	879.3	0.934	1.008	0.551
916.2	855.6	923.1	0.934	1.008	0.601
953.7	891.0	960.8	0.934	1.007	0.651
986.1	921.7	993.3	0.935	1.007	0.701
1014	948.5	1022	0.935	1.007	0.751
1039	972.0	1046	0.936	1.007	0.801
1060	992.7	1068	0.936	1.007	0.851
1079	1011	1087	0.937	1.007	0.901
1096	1027	1104	0.937	1.007	0.951
1125	1042	1119	0.927	0.995	1.001

Pela análise das Tabelas 4.13 e 4.14, pode-se perceber que as forças de tração e levitação não são muito sensíveis à variação da bitola dos condutores. Pelos resultados obtidos, conclui-se que a razão entre as forças para as diferentes bitolas varia aproximadamente com a raiz sexta da razão entre os fatores de enchimento e, portanto, também das seções retas dos condutores do enrolamento de armadura (da bitola dos fios). Nas simulações, realiza-se alimentação por imposição de tensão e não de corrente. Como o secundário é do tipo placa de alumínio, espera-se que a corrente seja mais limitada por resistência que por reatância. Isto faz com que a intensidade da corrente não varie de forma tão expressiva com a variação da bitola dos condutores do enrolamento de armadura, o que justifica o fato de o Fator de Enchimento não exercer grande influência nos resultados de força para os casos simulados.

- **Análise das Forças de Tração e Levitação para Passo Polar Variável e Demais Parâmetros Fixos**

Para o estudo do comportamento das forças em relação ao passo polar, foram consideradas três simulações, com comprimentos do passo polar dados por:

$$\begin{cases} \tau_1 = 15.4cm \text{ (caso base)} \\ \tau_2 = 12.7cm \\ \tau_3 = 19.0cm \end{cases}$$

Para levantamento das curvas e resultados, modificou-se a largura do dente do primário, enquanto a bitola dos condutores e as ranhuras permaneceram inalteradas.

A partir do caso base, correspondente a uma largura  $l_{dente1} = 7.9mm$ , os outros dois valores de passo polar foram obtidos através da multiplicação da largura do dente por 0.5 e por 2, correspondendo a  $l_{dente2} = 3.95mm$  e  $l_{dente3} = 15.8mm$ , respectivamente.

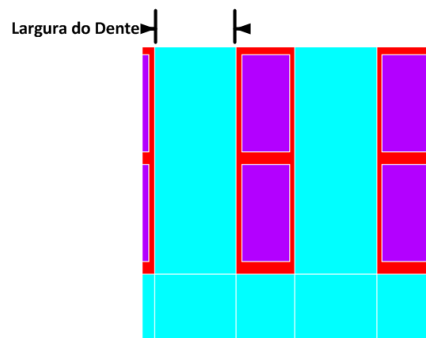


Figura 4.19 - Vista frontal em zoom de um trecho do primário do “Motor 2”, simulado em ANSYS.

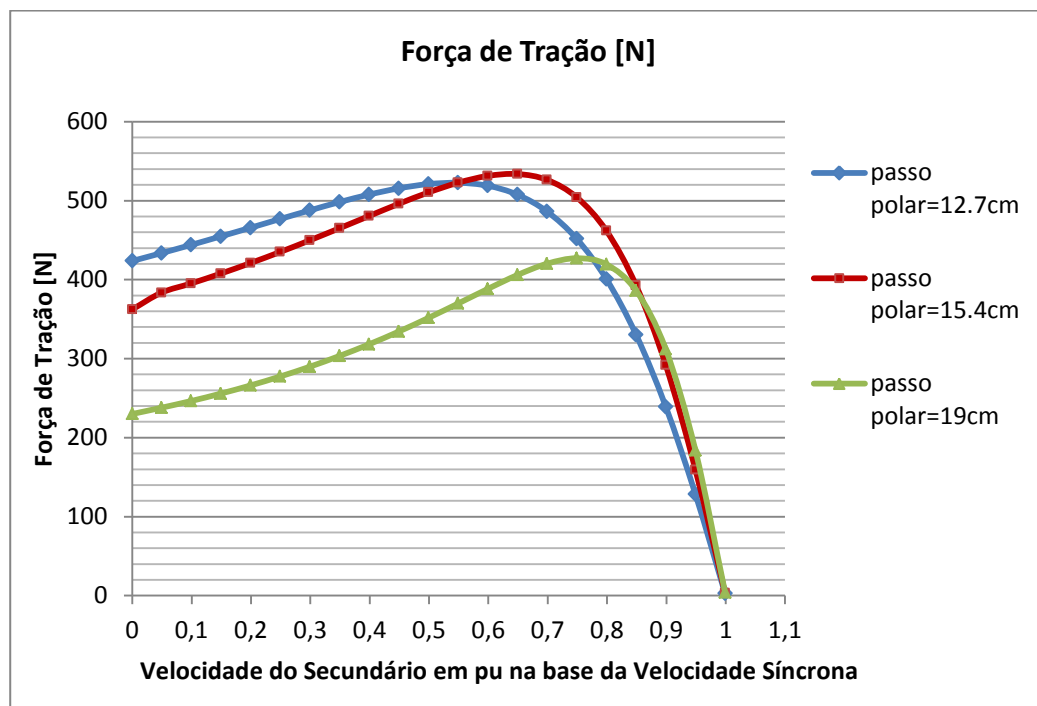


Figura 4.20 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para passo polar variável e demais parâmetros constantes.

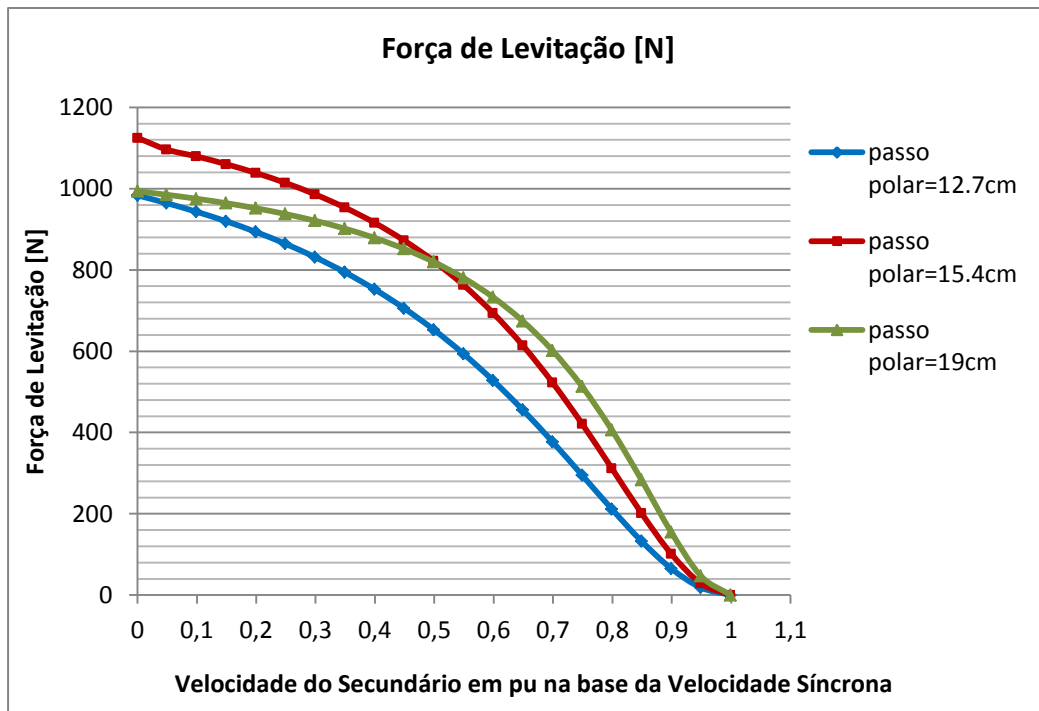


Figura 4.21 - Força de Levitação [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para passo polar variável e demais parâmetros constantes.

Tabela 4.15 - Força de Tração [N] pelo escorregamento para os casos de passo polar =15.4cm; 12.7cm e 19cm.

Força de Tração [N]			Escorrega- mento
Caso 1: $\tau = 15.4cm$	Caso 2: $\tau = 12.7cm$	Caso 3: $\tau = 19cm$	
3.255	2.606	3.959	0.001
159.4	128.3	183.9	0.051
291.9	239.2	311.9	0.101
392.6	330.3	386.0	0.151
461.8	400.6	419.4	0.201
504.2	451.6	427.1	0.251
526.3	486.2	420.2	0.301
533.7	507.6	405.9	0.351
531.3	518.9	388.3	0.401
522.7	522.6	369.8	0.451
510.4	521.0	351.6	0.501
496.0	515.6	334.3	0.551
480.6	507.7	318.2	0.601
465.1	498.2	303.4	0.651
449.8	487.7	289.8	0.701
435.0	476.8	277.4	0.751
421.0	465.7	266.1	0.801
407.7	454.8	255.8	0.851
395.2	444.0	246.4	0.901
383.5	433.6	237.9	0.951
362.4	423.7	230.0	1.001

**Tabela 4.16 - Força de Levitação [N] pelo escorregamento para os casos de passo polar =15.4cm; 12.7cm e 19cm.**

<b>Força de Levitação [N]</b>			<b>Escorrega- mento</b>
<b>Caso 1: <math>\tau = 15.4cm</math></b>	<b>Caso 2: <math>\tau = 12.7cm</math></b>	<b>Caso 3: <math>\tau = 19cm</math></b>	
0.1	0.07932	0.08684	0.001
28.80	18.4	47.1	0.051
101.8	65.5	155.1	0.101
201.6	132.8	283.4	0.151
311.9	211.7	406.2	0.201
421.3	294.9	513.1	0.251
523.1	377.3	601.8	0.301
614.2	455.6	674.1	0.351
693.9	528.0	732.8	0.401
762.8	593.9	780.6	0.451
821.9	653.1	819.7	0.501
872.6	705.8	852.1	0.551
916.2	752.8	879	0.601
953.7	794.5	901.8	0.651
986.1	831.5	921.1	0.701
1014	864.4	937.6	0.751
1039	893.7	951.9	0.801
1060	919.9	964.4	0.851
1079	943.3	975.3	0.901
1096	964.4	985	0.951
1125	983.4	993.6	1.001

Na teoria, prevê-se que quanto menor o passo polar, mais vertical é o fluxo magnético, o que leva a menores forças de levitação e maiores forças de tração conforme se diminui o comprimento do passo polar. Com base nas Figuras 4.20 e 4.21 e nas Tabelas 4.15 e 4.16, pode-se perceber que os resultados obtidos via simulação condizem com o esperado, sendo o passo polar do motor real ( $\tau = 15.4cm$ ) um valor já otimizado.

### ❖ **Conclusões Parciais**

No projeto de um motor, a investigação do efeito da variação dos parâmetros é de grande valia ao estudo do seu desempenho.

A partir das simulações realizadas, verifica-se que maiores valores de força são obtidos para maiores tensões de alimentação e menores espessuras de entreferro de ar. O decréscimo da espessura do secundário é responsável principalmente pela modificação do valor de escorregamento para o qual a força é máxima (uma vez que o

aumento da espessura da placa de alumínio representa a diminuição da resistência) e, em segundo plano, pelo aumento nos valores de força obtidos, já que também a reatância do secundário sofre alterações. A bitola do condutor, dentre os parâmetros avaliados, é o que menos influencia os resultados de força.

Para os casos simulados, portanto, a configuração do M.I.L. que fornece valores de força de tração e de levitação mais elevados é:

- ❖ Tensão de Alimentação: 630V (tensão eficaz entre fases);
- ❖ Espessura do Secundário: 9 mm
- ❖ Comprimento do Entreferro (*gap*): 8 mm
- ❖ Bitola dos Condutores do Enrolamento Primário:  $1.3 \times 9.2 \times 1.0 = 11.96\text{mm}^2$ , correspondente ao fator de enchimento 1.0.
- ❖ Passo Polar: 15.4cm

#### **4.3.3 Simulação do Motor 2 com Secundário do Tipo Gaiola de Esquilo e Comparação das Forças Simuladas com as Medidas**

Na terceira etapa, foram realizadas modificações nas rotinas utilizadas, visando à simulação do *Motor 2*, com secundário em gaiola de esquilo.

O objetivo desta fase do trabalho foi comparar os resultados de força de tração obtidos via simulação em ANSYS com os medidos pela empresa Equacional, responsável pela construção e ensaios para especificação do M.I.L. mostrado na Figura 1.2.

##### **4.3.3.1 Medidas de Força Transversal no Motor Real**

A força transversal desenvolvida pelo M.I.L. da Figura 1.2 foi medida pela Empresa Equacional.

Em [4], CHABU detalha o procedimento realizado no processo de medição, descrito, em linhas gerais, da seguinte forma:

Com o secundário do motor já com as suas barras alocadas nas ranhuras e curto-circuitadas entre si, fixou-se, na extremidade do secundário, uma massa por meio de uma correia. Com tal massa em uma balança e o secundário se movendo num sentido de alívio da mesma, o valor da força transversal foi medido pela diferença de peso. O levantamento da curva Força *versus* Escorregamento foi realizado de forma estática, impondo a frequência secundária por meio da alimentação primária, simulando o ponto de escorregamento.

Foram impostas as frequências secundárias de 5, 10, 15, 20 e 25Hz através da alimentação primária. A partir dos resultados obtidos, tomou-se como escorregamento unitário o valor correspondente à frequência de 25Hz e os demais como frações do mesmo, isto é,  $s = 0.2; 0.4; 0.6$  e  $0.8$  para  $f=5\text{Hz}; 10\text{Hz}; 15\text{Hz}$  e  $20\text{Hz}$ , respectivamente.

Nas simulações, variou-se o escorregamento, mantendo-se constante a frequência em 25Hz e a tensão em 420V (valor rms entre fases).



**Figura 4.22 - Arranjo do Ensaio e Detalhe da Polia/Correia. Fonte: [4]**

A Figura 4.22 mostra o arranjo experimental montado no ensaio para determinação da força de tração do motor real.



#### 4.3.3.2 Características da Simulação

As simulações realizadas nesta etapa valeram-se de algumas configurações comuns, determinadas através das linhas de comando empregadas, a saber:

- ✓ Análise Bi-dimensional (2D);
- ✓ Análise harmônica;
- ✓ Cálculo das forças por 2 métodos: Tensores de Maxwell e Trabalho Virtual.

Nesta etapa de simulações, o secundário modelado é do tipo gaiola de esquilo, caracterizado por 70 barras de alumínio curto-circuitadas envolvidas por uma estrutura ferromagnética. Deste modo, não se pode aplicar a lei de Ampère para calcular a força, como visto na Seção 3.5. Por este motivo, as simulações foram feitas via Tensor de Maxwell e Trabalho Virtual, cujas revisões teóricas estão descritas nas Seções 3.5.2 e 3.5.3, respectivamente.

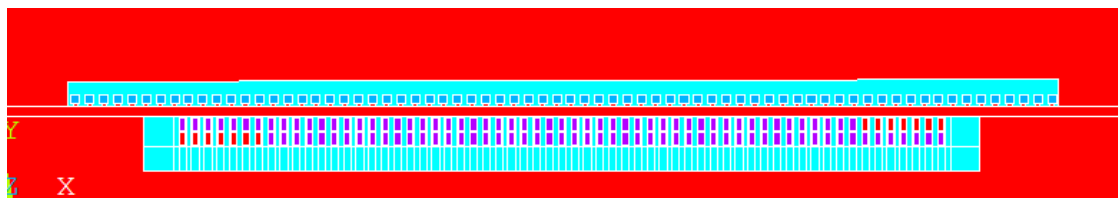
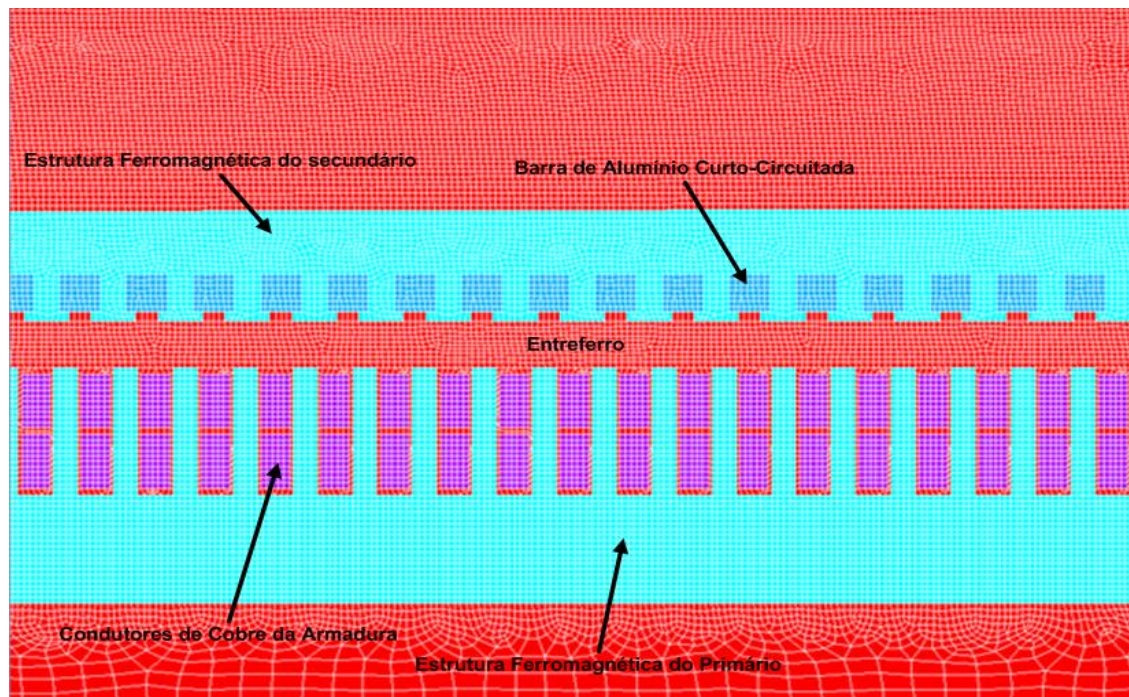


Figura 4.23 – Vista do Motor 2 simulado com secundário do tipo gaiola de esquilo.



**Figura 4.24 – Vista em zoom de um trecho do “Motor 2” simulado com secundário em gaiola. Malha para solução pelo MEF.**

A Figura 4.23 mostra a vista frontal do motor simulado com primário e secundário (este em gaiola de esquilo) como no *Motor 2*. Na imagem, extraída da interface gráfica do ANSYS, as diferentes cores representam os diferentes materiais e suas propriedades eletromagnéticas, como permeabilidade magnética e resistividade. A Figura 4.24 mostra, em zoom, um trecho do motor da Figura 4.23, com a indicação de cada parte constitutiva do mesmo. Mostra ainda a malha criada para a resolução do problema pelo Método dos Elementos Finitos. Pode-se perceber que na região de maior interesse, isto é, em todo o secundário e no seu entorno, a malha é mais refinada, pois é nesta região que se deseja calcular as forças.

Em relação à malha, duas observações devem ser feitas. Primeiramente, o alto grau de refinamento e a maior complexidade do domínio nesta etapa do projeto levaram a simulações mais lentas que nas etapas anteriores. Foram testadas algumas possibilidades de confecção da malha, chegando-se à ilustrada na Figura 4.24, que apresentou a melhor relação tempo *versus* resultados para o domínio estudado. Além

disto, como explicado, as simulações foram feitas contemplando dois métodos de resolução distintos, Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell, que, para a configuração de malha adotada, forneceram resultados de força coerentes, próximos, porém diferentes, como mostrado nas próximas seções.

#### 4.3.3.2.1 Simulações sem a Consideração da Indutância de Cabeça de Bobina

Nas primeiras simulações realizadas para determinação das forças de tração para o *Motor 2*, os efeitos das indutâncias de conexão terminal foram considerados desprezíveis.

Foram avaliadas as configurações com entreferros de 8mm e 16mm. Os resultados obtidos via simulação pelo Método dos Trabalhos Virtuais e pelo Método dos Tensores de Maxwell foram comparados com os resultados medidos no motor real [4],[16], ilustrado na Figura 1.2.

##### ➤ **Entreferro de 8 mm**

As Tabelas 4.17 e 4.18 mostram as forças de tração obtidas, via Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell, respectivamente, e as forças medidas, para um *gap* de 8mm. As curvas de Força[N] *versus* Velocidade do secundário em pu na base da velocidade síncrona estão plotadas na Figura 4.25.

**Tabela 4.17 – Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual (gap=8mm)**

Para gap=8mm			
Força de Tração [N] Obtida Via Trabalho Virtual	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escoregamento
48.08	0	-----	0
3794	-----	-----	0.1
5544	2596	113.6%	0.2
5541	3539	56.6%	0.4
4610	3760	22.6%	0.6
3823	3342	14.4%	0.8
3242	3166	2.40%	1

\* Dado por:  $\left( \frac{\text{Força Medida} - \text{Força Obtida via Simulação}}{\text{Força Medida}} \right) \times 100\%$

Tabela 4.18 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell (gap=8mm)

Para gap=8mm			
Força de Tração [N] Obtida Via Tensor de Maxwell	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
545.9	0	-----	0
4113	-----	-----	0.1
6001	2596	131.2%	0.2
5884	3539	66.3%	0.4
4783	3760	27.2%	0.6
3871	3342	15.8%	0.8
3203	3166	1.16%	1

\* Dado por:  $\left( \frac{\text{Força Medida} - \text{Força Obtida via Simulação}}{\text{Força Medida}} \right) \times 100\%$

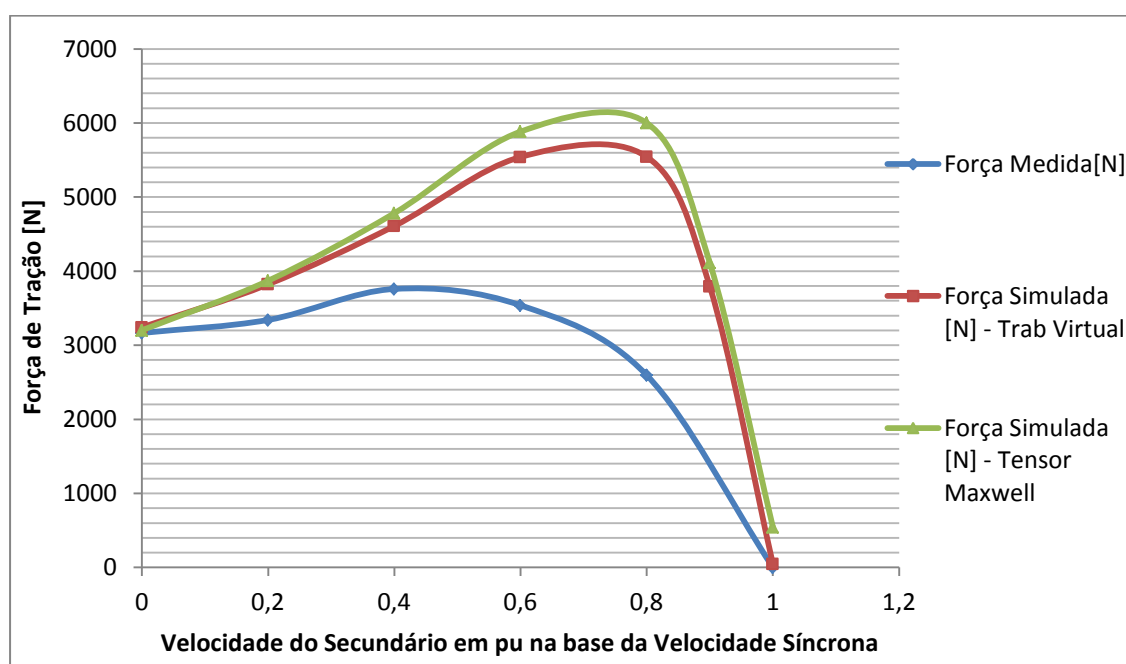


Figura 4.25 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Motor 2, com entreferro de 8mm.

### ➤ Entreferro de 16 mm

As Tabelas 4.19 e 4.20 mostram as forças de tração obtidas, via Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell, respectivamente, e as forças medidas, para um gap de 16 mm. As

curvas de Força[N] *versus* Velocidade do secundário em pu na base da velocidade síncrona estão plotadas na Figura 4.26.

**Tabela 4.19 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual(gap=16mm)**

Para gap=16mm			
Força de Tração [N] Obtida via Trabalho Virtual	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
0.3662	0	-----	0
372.0	-----	-----	0.01
4380	1871	134.1%	0.2
4214	2579	63.4%	0.4
3438	2845	20.8%	0.6
2822	2728	3.43%	0.8
2378	2295	3.63%	1

**Tabela 4.20 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell (gap=16mm)**

Para gap=16mm			
Força de Tração [N] Obtida via Tensor de Maxwell	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
40.8	0	-----	0
380.6	-----	-----	0.01
4886.4	1871	161.2%	0.2
4651.8	2579	80.4%	0.4
3747.6	2845	31.7%	0.6
3036.4	2728	11.3%	0.8
2526.4	2295	10.1%	1

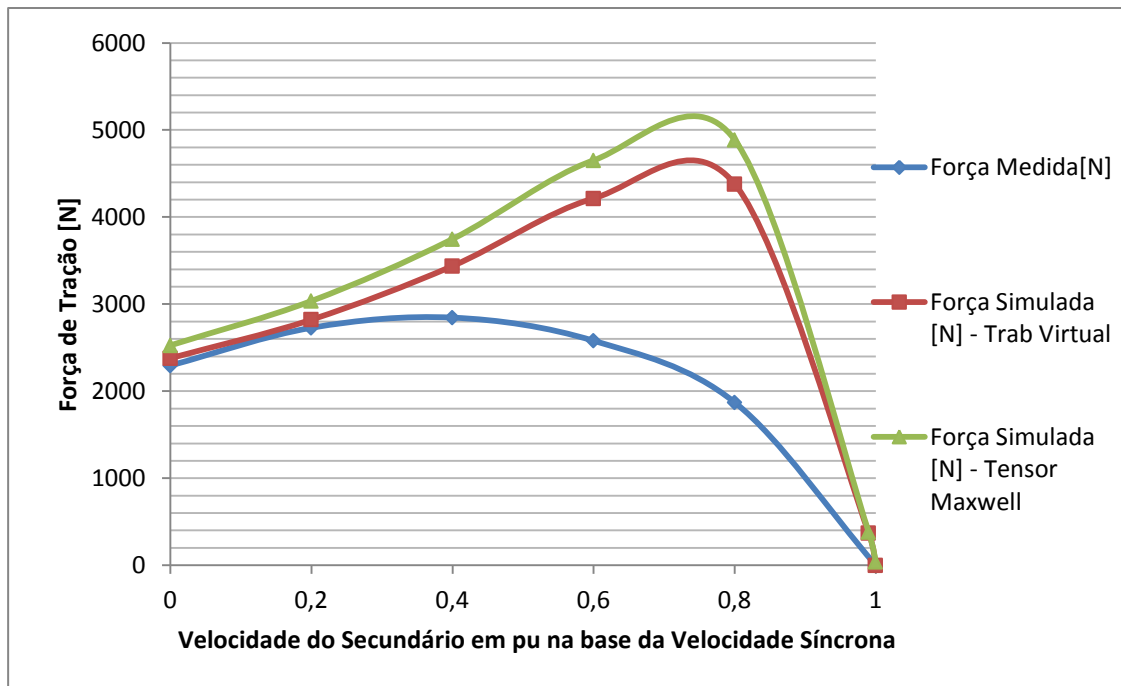


Figura 4.26 - Força de Tração [N] versus Velocidade do Secundário em pu na base da Velocidade Síncrona para o Motor 2, com entreferro de 16mm.

### ❖ Conclusões Parciais

A partir das Tabelas 4.17 a 4.20, pode-se concluir, para os dois valores de entreferro, que:

- As forças calculadas pelo Método dos Trabalhos Virtuais apresentam maior convergência em relação à grandeza medida quando comparadas às obtidas através dos Tensores de Maxwell, porém ainda muito diferentes das forças medidas;
- Para valores de escorregamento entre 0,1 e 0,4, as forças resultantes dos dois métodos de simulação apresentaram erros elevados, atingindo 160% para o caso de solução via Tensor de Maxwell para  $gap = 16\text{mm}$ , em relação aos valores medidos;
- Para valores de escorregamento elevados, i.e., acima de 0,8, ou para escorregamentos próximos a zero, observa-se que, em todos os 4 casos ( $gap$  de 8

ou 16 mm, com simulação via Trabalho Virtual ou Tensor de Maxwell), as forças calculadas reproduziram fielmente as medidas.

A partir das duas últimas conclusões citadas, cogitou-se, num primeiro momento, a hipótese de que o M.I.L. da Figura 1.2 poderia estar sujeito ao Efeito Longitudinal de Extremidade, como revisado na Seção 0. No entanto, a velocidade síncrona do motor é dada por:

$$v_s = \frac{2\tau}{T} = 2f\tau = 2 \times 25 \times 0.154 = 7.52 \text{ m/s} = \mathbf{27.1 \text{ km/h}}$$

Como a velocidade do motor é baixa, conclui-se que o Efeito Longitudinal de Extremidade não é, provavelmente, o principal responsável pelas discrepâncias entre os valores medidos e os simulados.

Uma outra hipótese considerada é a inserção da indutância de conexão terminal nas rotinas de simulação.

#### 4.3.3.2.2 Simulações Considerando a Indutância de Cabeça de Bobina

A partir da indutância de cabeça de bobina calculada no APÊNDICE III, realizaram-se novas simulações, com o intuito de avaliar o efeito da inserção desta impedância no cálculo de força.

##### ➤ **Entreferro de 8 mm**

As Tabelas 4.21 e 4.22 mostram as forças de tração obtidas, via Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell, respectivamente, e as forças medidas, para um *gap* de 8mm. As curvas de Força[N] *versus* Velocidade do secundário em pu na base da velocidade síncrona estão plotadas nas Figuras 4.27 e 4.28.

**Tabela 4.21 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual (gap=8mm) considerando a indutância de cabeça de bobina**

Para gap=8mm			
Força de Tração [N] Obtida via Trabalho Virtual	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
12.37	0	-----	0
2765	-----	-----	0.1
4200	2596	61.8%	0.2
4434	3539	25.3%	0.4
3794	3760	0.90%	0.6
3192	3342	-4.48%	0.8
2913	3166	-7.99%	1

**Tabela 4.22 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell (gap=8mm) considerando a indutância de cabeça de bobina**

Para gap=8mm			
Força de Tração [N] Obtida via Tensor de Maxwell	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
104.28	0		0
2986.8	-----	-----	0.1
4479.8	2596	72.5%	0.2
4737.2	3539	33.9%	0.4
4020	3760	6.91%	0.6
3306.2	3342	-1.07%	0.8
2958.4	3166	-6.56%	1



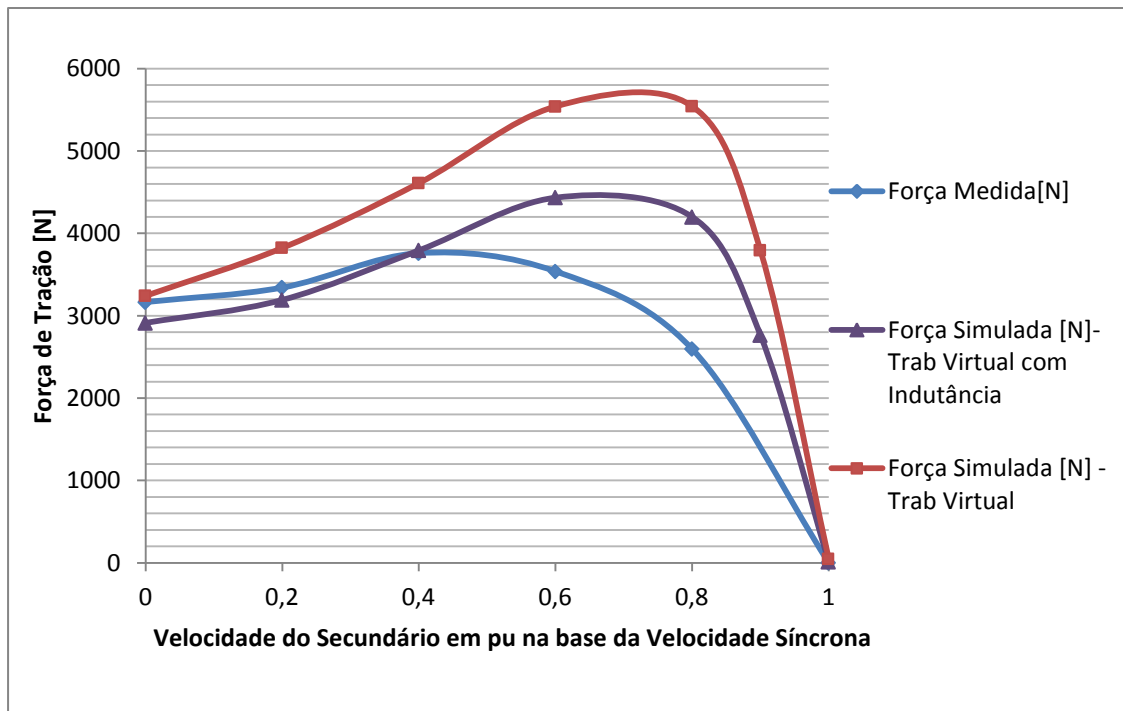


Figura 4.27 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Trabalho Virtual com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 8mm.

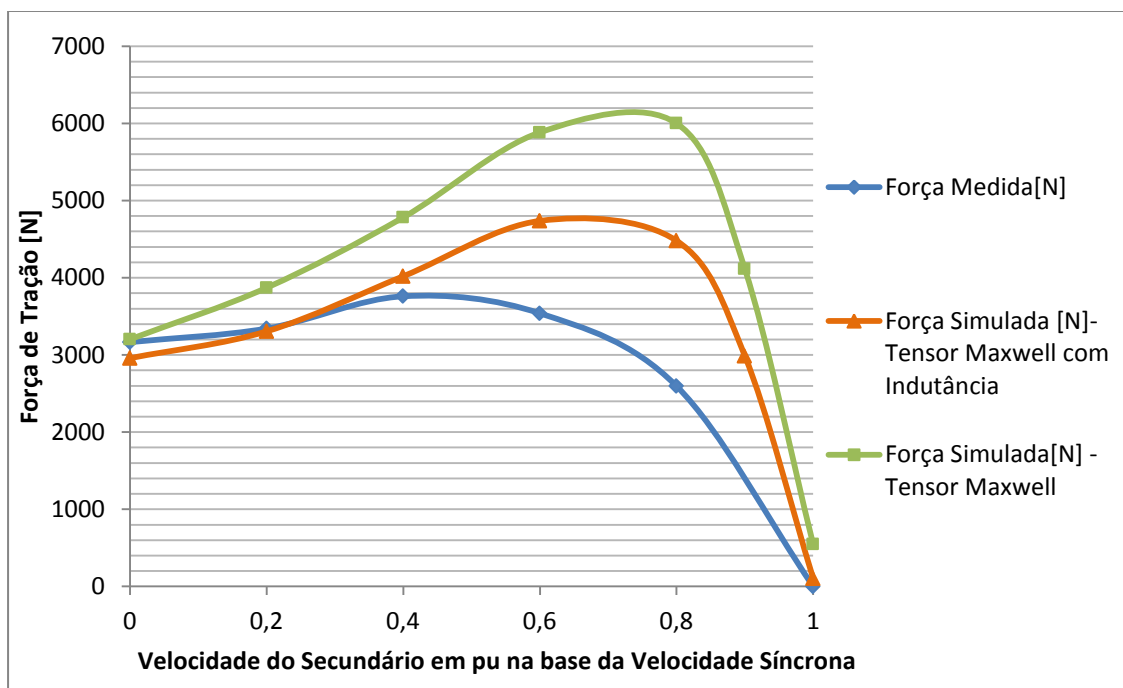


Figura 4.28 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Tensor de Maxwell com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 8mm.

➤ **Entreferro de 16 mm**

As Tabelas 4.23 e 4.24 mostram as forças de tração obtidas, via Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell, respectivamente, e as forças medidas, para um *gap* de 16 mm. As curvas de Força[N] *versus* Velocidade do secundário pu na base da velocidade síncrona estão plotadas nas Figuras 4.29 e 4.30.

**Tabela 4.23 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Trabalho Virtual (gap=16mm) considerando a indutância de cabeça de bobina**

Para gap=16mm			
Força de Tração [N] via Trabalho Virtual com Indutância de Cabeça de Bobina	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
1.028	0	-----	0
2147	-----	-----	0.1
3207	1871	71.4%	0.2
3353	2579	30.0%	0.4
2867	2845	0.76%	0.6
2426	2728	11.1%	0.8
2149	2295	6.36%	1

**Tabela 4.24 - Comparação entre as Forças de Tração Medidas e Obtidas via Tensor de Maxwell (gap=16mm) considerando a indutância de cabeça de bobina**

Para gap=16mm			
Força de Tração [N] via Tensor Maxwell com Indutância de Cabeça de Bobina	Força de Tração [N] Medida	Erro Percentual*	Escorregamento
36.42	0		0
2397	-----	-----	0.1
3587	1871	91.7%	0.2
3765	2579	46.0%	0.4
3152	2845	10.8%	0.6
2600	2728	4.70%	0.8
2180	2295	5.01%	1

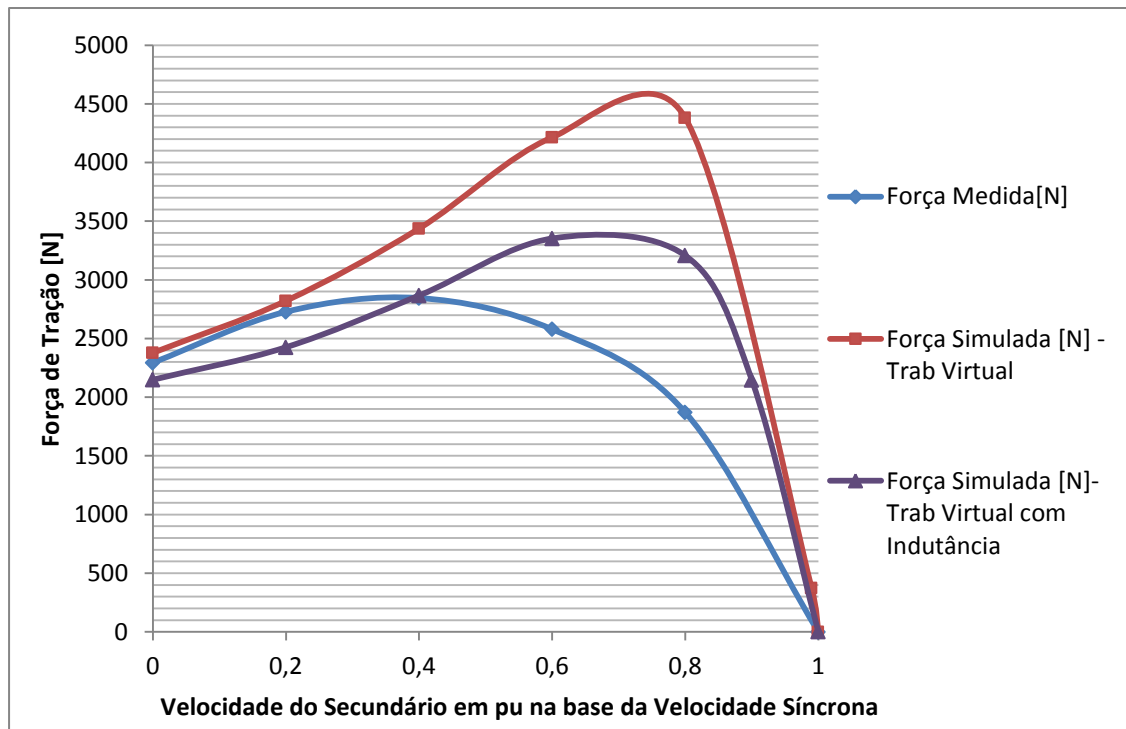


Figura 4.29 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Trabalho Virtual com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 16mm.

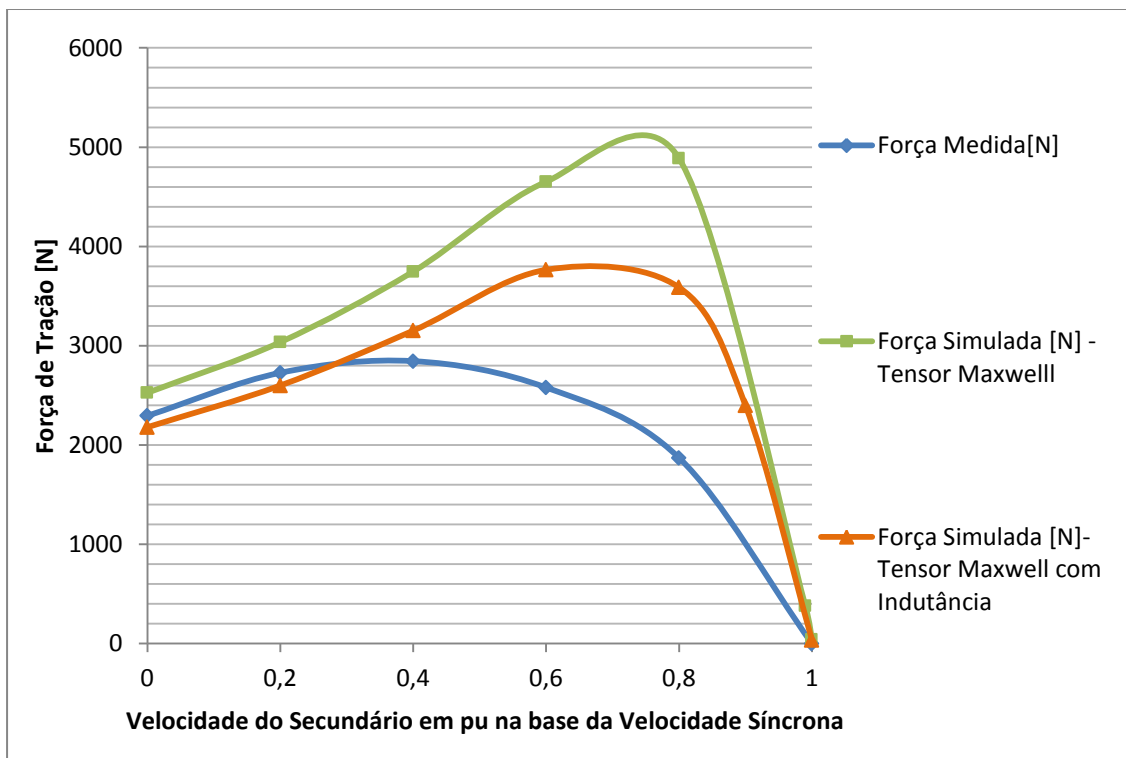


Figura 4.30 - Comparação entre a Força de Tração [N] medida e as simuladas via Tensor de Maxwell com e sem indutância para o Motor 2, com entreferro de 16mm.

### ❖ *Conclusões Parciais*

Com base nas Figuras 4.27 a 4.30, observa-se que a inserção da impedância de cabeça de bobina reduziu consideravelmente o erro das forças obtidas via simulação em relação às medidas, para os 2 valores de entreferro, para os 2 métodos considerados, especialmente para escorregamentos entre 0.1 e 0.6.

Entretanto, as simulações ainda apresentaram erros significativos. Para tentar reproduzir com maior fidelidade o motor estudado, pode-se tentar aperfeiçoar as rotinas criadas ou mesmo fazer uma análise tri-dimensional, medidas que vão além das propostas deste trabalho.

# Capítulo 5

---

## 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho consistiu na modelagem computacional de Máquinas de Indução Lineares (M.I.L.s). Inicialmente, foi feito um breve histórico, no qual se mostrou a evolução das máquinas lineares no mundo, bem como as aplicações em que mais são utilizadas na prática. Em seguida, foram apresentadas as equações básicas que descrevem o comportamento das máquinas de indução e também as características da resolução de problemas eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos. Posto isto, partiu-se para as etapas de simulação e análise de resultados.

Foram modelados dois motores lineares com características elétricas e construtivas bastante distintas e com finalidades também diferentes. Na primeira etapa de simulações, pôde-se concluir, pela comparação da densidade de fluxo magnético medida com a obtida via simulação, que o modelo matemático presente nas rotinas utilizadas foi validado, pois levou a resultados bastante satisfatórios, por conseguirem reproduzir de forma verossímil a máquina real estudada.

Na segunda etapa, pôde-se observar a maior complexidade para simulação do *Motor 2*, ainda que com secundário do tipo placa, em relação ao *Motor 1*. Esta etapa foi de grande valia, visto que permitiu a análise do comportamento das forças em relação a alguns parâmetros elétricos ou geométricos, a partir de um caso base. Todos os resultados obtidos foram coerentes com as previsões teóricas, permitindo a validação do modelo de análise harmônica e bidimensional para o cálculo de forças transversais e longitudinais pelo Método de Força de Lorentz.

Na terceira etapa, modelou-se novamente o *Motor 2*, porém com secundário em gaiola, o que levou a grandes modificações em relação às rotinas desenvolvidas na

segunda etapa. As simulações iniciais apresentaram erros significativos para valores de escorregamento entre 0.1 e 0.4 em relação às forças medidas. Uma primeira análise levou a conclusões que poderiam associar tais discrepâncias ao chamado Efeito Longitudinal de Extremidade. Entretanto, com a avaliação acerca da velocidade do motor, que pode ser considerada baixa, concluiu-se que as diferenças entre os resultados medidos e simulados não seriam predominantemente causadas por este efeito. Contudo, a inserção do efeito das indutâncias de cabeça de bobina em cada uma das fases, mesmo no modelo bidimensional, possibilitou uma redução significativa do erro gerado pelas simulações. Provavelmente, resultados ainda melhores podem ser obtidos através de uma análise tridimensional, muito mais complexa, desde a geometria, passando pela geração da malha, até os acoplamentos eletromagnéticos do motor. Esta modelagem tridimensional, fora do escopo do presente trabalho.

Deste modo, despontam como ideias de trabalhos futuros as seguintes sugestões:

- Aprimoramento das rotinas de simulação pelo método dos elementos finitos com análise harmônica bi-dimensional no software ANSYS, por meio da investigação de outras possíveis causas das discrepâncias entre os valores medidos e simulados;
- Modelagem harmônica bi-dimensional dos motores estudados através do software MAXWELL®, também da ANSOFT, pelo Método dos Elementos Finitos e comparação com os resultados obtidos por meio do ANSYS;
- Modelagem harmônica tri-dimensional dos motores estudados em ANSYS;
- Realização de medidas de força para o Motor de Indução Linear do Maglev-Cobra, presente no LabMaq (*Motor 2*), e comparação com os valores obtidos via simulação.

# Capítulo 6

---

## Referências Bibliográficas

- [1] SERNI, P.J.A., *Uma Contribuição ao Estudo do Motor de Indução Linear Acionado por Inversor (VSI) com Corrente Controlada*. Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1999.
- [2] *A Tecnologia Maglev em Uso*. Disponível em:  
<<http://ciencia.hsw.uol.com.br/trens-maglev2.htm>> Acesso em: 17 nov 2011, 15:30:00
- [3] *A Engenharia por trás das Montanhas-Russas*. Disponível em:  
<[http://www.cbmr.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=871:engenharia-tras-mrs&catid=10:cbmr&Itemid=33](http://www.cbmr.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=871:engenharia-tras-mrs&catid=10:cbmr&Itemid=33)> Acesso em: 17 nov 2011, 20:50:00
- [4] CHABU, I.E, GOMES, D.R, *Relatório Técnico*. Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, v. 1, p. 3-17, São Paulo, Brasil, 2009.
- [5] CREPPE, R. C., *Uma Contribuição à Modelagem de Máquinas de Indução Lineares*. Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1997.
- [6] NASAR, S. A., BOLDEA, I., *Linear Motion Electric Machines*. 1ed. New York, John Wiley & Sons, 1976.
- [7] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C., UMANS, S.D., *Electric Machinery*. 6ed. New York, McGraw-Hill, 2003.
- [8] LIMA, D. B., *A Máquina de Indução em Cascata de Dupla Alimentação na Geração de Energia Elétrica em Velocidade Variável e Outras Aplicações*. Projeto Final de Graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [9] GIERAS, J .F, *Linear Induction Drives*. 1ed. New York, Oxford Science

Publications, 1994.

[10] YAMAMURA, S. *Theory of Linear Induction Motors*. 2ed. Tokio, University of Tokio Press, 1978.

[11] *Ansys v11.0 User's Manual*.

[12] MOREIRA, M. A. C., *Projeto de Motor Linear com Auxílio do Método dos Elementos Finitos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

[13] *Método dos Elementos Finitos*. Disponível em:

<[http://www.demar.eel.usp.br/metodos/mat\\_didatico/Metodo\\_dos\\_Elementos\\_Finitos.pdf](http://www.demar.eel.usp.br/metodos/mat_didatico/Metodo_dos_Elementos_Finitos.pdf)>. Acesso em: 01 nov 2011, 20:20:00.

[14] SALON, J. S., *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. USA, Kluwer Academic Publishers, 1995.

[15] NOGUEIRA, A. F. L., “ Cálculo de Forças Eletromecânicas pelos Métodos de Trabalho Virtual e Tensor de Maxwell”, Universidade do Estado de Santa Catarina. Disponível em:

<[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais/For\\_a\\_Eletromec\\_nica.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais/For_a_Eletromec_nica.pdf)>. Acesso em: 28/12/11, 11:45:00.

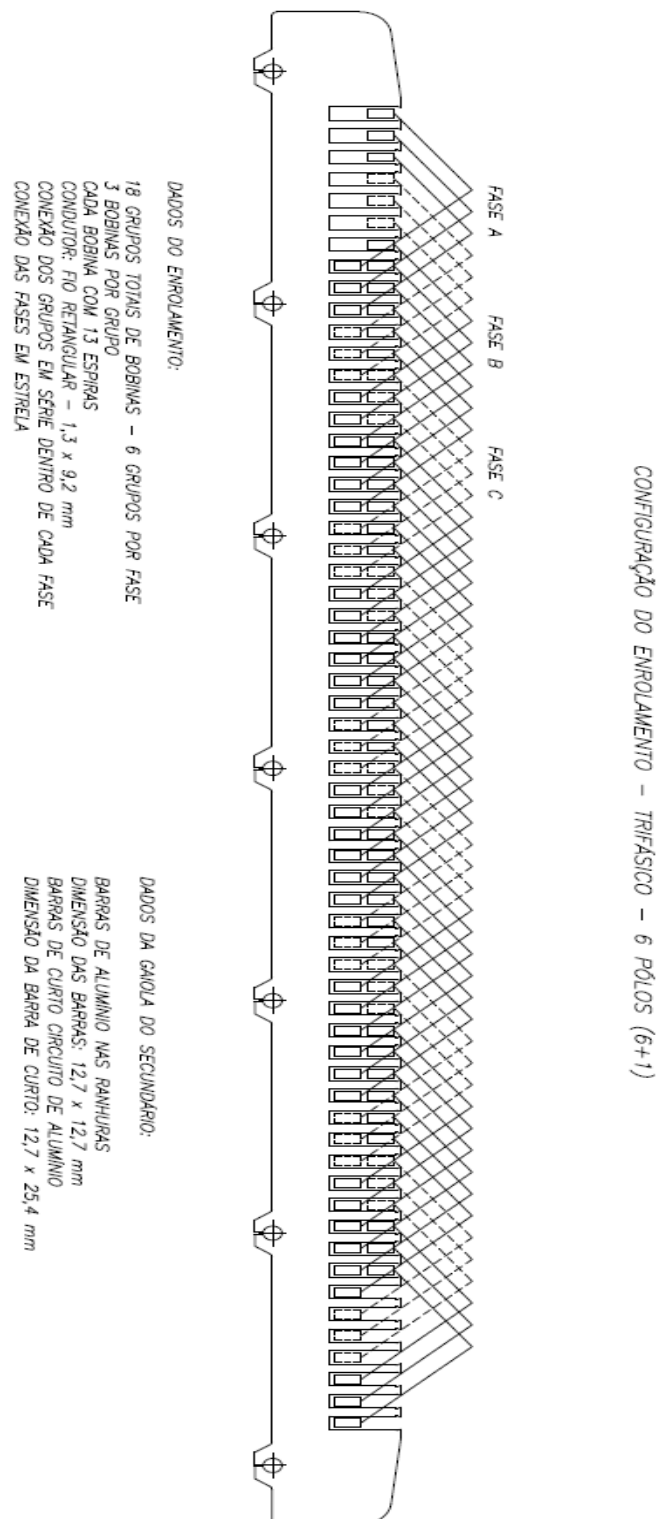
[16] LOAIZA, A. E. L., *Operação Sincronizada de Motores Lineares de Tração para um Veículo de Levitação Magnética*. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

[17] KUHLMANN, J., *Design of Electrical Apparatus*. 2ed. New York, John Wiley & Sons, 1940.



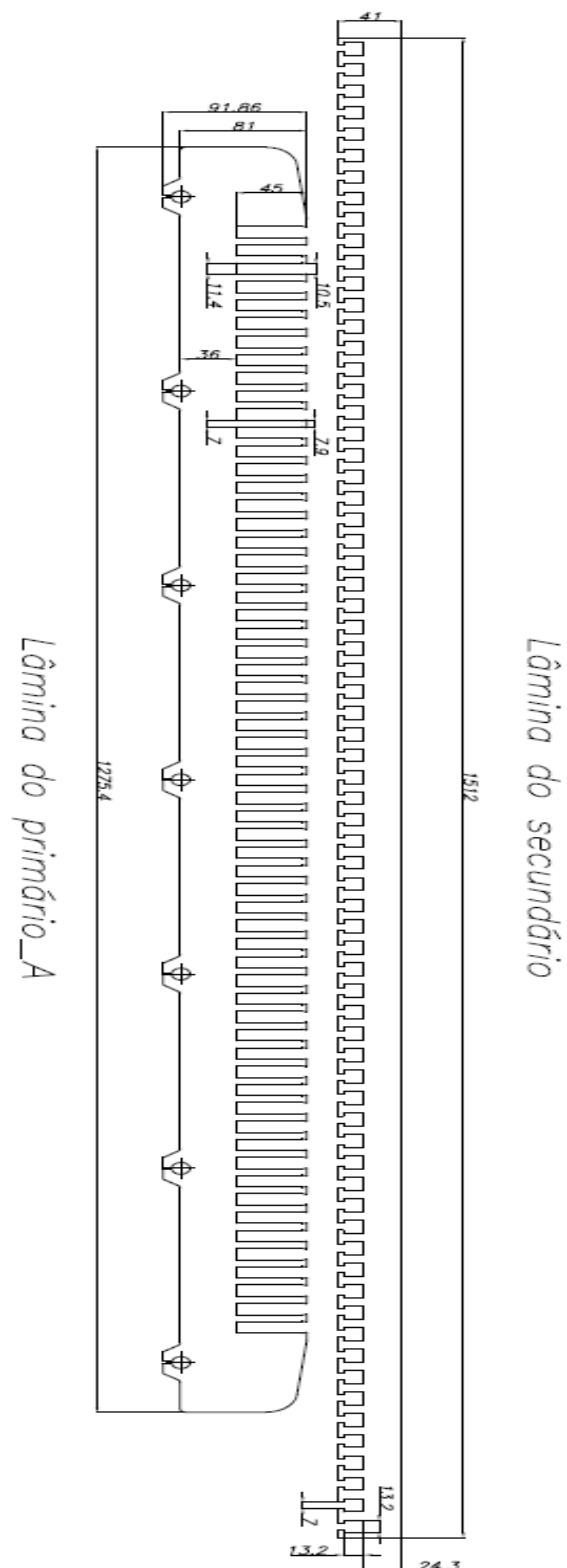
# APÊNDICE I

## CONFIGURAÇÃO DO PRIMÁRIO “MOTOR 2”, PRESENTE NO LABMAQ .



## APÊNDICE II

### DIMENSÕES DO PRIMÁRIO E DO SECUNDÁRIO DO “MOTOR 2” (M.I.L. DO MAGLEV- COBRA).



# APÊNDICE III

---

## DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA DE CABEÇA DE BOBINA.

A reatância associada à dispersão de cabeça de bobina para uma fase é dada por [12]:

$$X_{1e} = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot l_{1e} \cdot \lambda_{1e}}{p} \quad (\text{AIII.1})$$

A indutância associada pode ser obtida dividindo-se a equação (AIII.1) por  $2\pi f$ .

Logo:

$$L_{1e} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot l_{1e} \cdot \lambda_{1e}}{p} \quad (\text{AIII.2})$$

Onde:

$N_1$  é o número de espiras em série por bobina por fase;

$l_{1e}$  é o comprimento médio de uma conexão terminal;

$p$  é o número de pares de pólos;

$\lambda_{1e}$  é o coeficiente de permeância associado à dispersão de cabeça de bobina.

Para o caso de enrolamentos em dupla camada, como no caso do enrolamento de armadura do *Motor 2*, e baixa tensão, o coeficiente de permeância  $\lambda_{1e}$  é dado por:

$$\lambda_{1e} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{L_e} (l_{1e} - 0.64\tau) \quad (\text{AIII.3})$$

Onde:

$q_1$  é o número de ranhuras por pólo por fase;

$L_e$  é a profundidade do motor;

$\tau$  é o passo polar.

Para o *Motor 2*, tem-se:

**Tabela AIII. 1 - Parâmetros do Motor 2 para o cálculo da indutância de cabeça de bobina.**

$N_1$	$l_{1e}$	$p$	$q_1$	$L_e$	$\tau$	$\lambda_{1e}$
13 espiras	0.21m	6 pares	3 ran/polo/fase	0.20m	0.154m	0.65

Com base nos parâmetros da Tabela AIII. 1, calcula-se a indutância de conexão terminal associada a uma bobina para o *Motor 2*:

$$L_{1e} \cong 38.4\mu H$$

Portanto, para uma fase, a indutância de conexão terminal total, admitindo todas as bobinas em série, é:

$$L_e \cong 1.4 \times 10^{-3} H$$

Que é 2 ordens de grandeza abaixo da indutância dos enrolamentos de armadura, obtida pela razão entre a tensão e corrente, fornecidas pela simulação pelo MEF.

Nas simulações, utilizou-se como indutância de cabeça de bobina:

$$L_{e\_simul} = 2.0 \times 10^{-3} H$$

# APÊNDICE IV

## ROTINAS UTILIZADAS NA SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÕES

### PRIMEIRA ROTINA :

*Definição da Geometria, atribuição dos materiais e suas propriedades elétricas e magnéticas (resistividade, permeabilidade) às áreas do domínio e criação da malha.*

**! Arquivo correspondente à configuração de 3 ranhura por polo por fase, 6 pares de polos, arquivo ! de corrente nomeado "corrente 6".**

/PREP7

CSYS,0

ANTYPE, STATIC

ET,1,13,0 **! ELEMENTO MAGNÉTICO 2-D COM 4 NÓS**

ET,2,53,3, **! CIRCUIT-COUPLED STRANDED COIL - ELEMENTO COM 8 NÓS**

ET,3,124,5, **! STRANDED COIL - CIRCUITO EXTERNO**

ET,4,124,4,0 **! FONTE DE TENSÃO INDEPENDENTE, SINOIDAL, CIRCUITO EXTERNO**

ET,5,53,1,

EMUNIT,MKS

MP,MURX,1,1000 **! PERMEABILIDADE DO FERRO**

MP,MURX,2,1 **! PERMEABILIDADE DO CONDUTOR**

MP,MURX,3,1 **! PERMEABILIDADE DO AR**

ET,5,53,1, **! CIRCUIT**

MP,MURX,4,1 **! PERMEABILIDADE DO CARRO**

ET,5,53,1, **! CIRCUIT**

MP,RSVX,2,1.724E-8 **! RESISTIVIDADE DO CONDUTOR**

MP,RSVX,4,2.82E-8

!\*\*\*\*\*

!

**Definição das Constantes**

!\*\*\*\*\*

ran\_fase=3

fase=3

ran\_polo=ran\_fase\*fase

par\_polo=3

tot\_ran=2\*par\_polo\*ran\_polo

nspira=13

**! Número de espiras por bobina**

profund=20e-1

passo\_pol=8

tensao=210\*sqrt(2)/sqrt(3)

var1=(2\*par\_polo)\*ran\_fase

enchim=0.9

**! Fator de enchimento**

**! PARÂMETROS EM Y:**

hdente=45e-3

hatedente=38e-3

gap=16e-3

hal1=24.3e-3

hal2=13.5e-3

hal=19e-3

folgay=2.5e-3

```

hbob = 18.8e-3
isol_bob = hdente-2*folgay-2*hbob
h_estat = hatedente + hdente
contornoycima=20e-2

! 13 condutores de altura 1.3mm(daria 16.9mm) e FE 0.9

! Necessário definir os valores do contorno em cima e em
! baixo porque deve-se refinar a malha por onde passam
! as linhas de fluxo. Deste modo, o contorno em baixo não
! precisa ser tão grande.

contornoybaixo=20e-2

! PARÂMETROS EM X:
Iran = 11.4e-3
ldente = 7.9e-3
passo_ran = Iran +ldente
d_ldente =45.1e-3

! Para colocar uma diferença de largura entre os dentes
! das extremidades e os demais.

lal1=13.2e-3
lal2=7e-3
lal= ((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-1)+Iran+2*d_ldente)
laldiferenca=(1.512-lal)/2
folgax = 11e-4

! OUTROS PARÂMETROS:

area_elem = 2.5e-3
divisoes= lal/area_elem
n=1

! Área do elemento da malha
! Número de divisões da placa depois de ser feita a malha
! Fração da largura da placa que será movimentada

PIR = 4*atan(1)
I = 480*sqrt(2)/(sqrt(3))
FREQ = 25
S0 = 0.001
SF = 1
SP = 0.05
cte=-1

! Cálculo de Pi

! Escorregamento inicial
! Escorregamento final
! Passo do escorregamento

! MOVI=cte*divisoes*n*area_elem !!!!Valor para movimentar a placa de alumínio 0 para a placa
! exatamente sobre o estator
movi=0 ! negativo para deslocamento para a esquerda e positivo para deslocamento para a direita

!Considerando o deslocamento do secundário para a esquerda:
contornoxesq=-movi+laldiferenca+10e-2 ! Necessário definir um para cada lado (direita e
! esquerda), uma vez que a condição ideal é placa de
! alumínio e estator alinhados, mas isso não
! necessariamente ocorrerá.

contornoxd=10e-2+laldiferenca

! Considerando o deslocamento do secundário para a direita:
! contornoxesq=10e-2+laldiferenca
! contornoxd=movi+laldiferenca+10e-2

!DEFINIÇÃO DOS KEYPOINTS E DAS ÁREAS DOS CONDUTORES E DO NÚCLEO DE
! FERRO:

k,1,contornoxesq,contornoybaixo
k,2,d_ldente+contornoxesq,contornoybaixo
k,3,contornoxesq,hatedente+contornoybaixo
k,4,d_ldente+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo
k,5,contornoxesq,h_estat+contornoybaixo
k,6,d_ldente+contornoxesq,h_estat+contornoybaixo
k,7,d_ldente+ldente+contornoxesq,h_estat+contornoybaixo
k,8,d_ldente+ldente+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo

```

```

k,9,d_ldente+ldente+contornoxesq,contornoybaixo
k,10,d_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,contornoybaixo
k,11,d_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo
k,12,d_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,h_estat+contornoybaixo
k,13,d_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h_estat-folgay+contornoybaixo
k,14,d_ldente+ldente+lrn-folgax+contornoxesq,h_estat-folgay+contornoybaixo
k,15,d_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h_estat-folgay-hbob+contornoybaixo
k,16,d_ldente+ldente+lrn - folgax+contornoxesq,h_estat-folgay-hbob+contornoybaixo
k,17,d_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h_estat-folgay-hbob-isol_bob+contornoybaixo
k,18,d_ldente+ldente+lrn-folgax+contornoxesq,h_estat-folgay-hbob-isol_bob+contornoybaixo
k,19,d_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h_estat-folgay-2*hbob-isol_bob+contornoybaixo
k,20,d_ldente+ldente-folgax+lrn+contornoxesq,h_estat-folgay-2*hbob-isol_bob+contornoybaixo

```

**!Criação das áreas (indo sempre no sentido horário dos pontos)**

```

a,1,3,4,2
a,3,5,6,4
a,2,4,8,9
a,4,6,7,8
a,9,8,11,10
a,8,7,12,11
a,15,13,14,16
a,19,17,18,20

```

```

ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL

```

**! Para sobrepor as áreas (neste caso, as áreas 7 e 8, que  
! são as áreas relativas aos condutores, estariam sobre a  
! área 6, que é a área do isolamento de ar)**

```

NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL
ALLSEL,ALL

```

**! Renumerar as áreas**

**!PARA CRIAR (REPRODUZIR, DUPLICAR,ETC) VÁRIAS ÁREAS E ASSIM FORMAR**

**! TODO O ESTATOR:**

```

ASEL,S,,,3,8,1          ! Seleciona as áreas 3 a 8 com passo de 1
AGEN,tot_ran+(passo_pol-1),ALL,,,passo_ran,,,,0      ! Gera as áreas (reproduz quantas vezes
                                                         ! foreste número depois do comando
                                                         ! "AGEN")

```

```

ALLSEL,ALL
NUMMRG,ALL
ALLSEL,ALL

```

```

ASEL,S,,,3,4,1          ! Seleciona as áreas 3 a 4 com passo de 1
AGEN,2,ALL,,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-1)),,,,0
ALLSEL,ALL
NUMMRG,ALL
ALLSEL,ALL

```

```

ASEL,S,,,1,2,1          ! Seleciona as áreas 1 a 2 com passo de 1
AGEN,2,ALL,,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-1)+ldente+d_ldente),,,,0
ALLSEL,ALL
NUMMRG,ALL
ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL

```

**!PARA CRIAR A PLACA DE ALUMÍNIO:**

```

*if,movi,eq,0,then

```

```

*get,nkp,kp,,num,max
k,NKP+1,contornoxesq-laldiferenca,h_estat+gap+contornoybaixo
k,nkp+2,contornoxesq-laldiferenca,h_estat+gap+hal+contornoybaixo

```

```

k,nkp+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+laldiferenca,h_estat+gap+contornoybaixo
k,nkp+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+laldiferenca,h_estat+gap+hal+contornoybaixo
a,NKP+1,NKP+2,NKP+4,NKP+3
NUMCMP,ALL

```

**\*else**

```

*get,nkp,kp,,num,max
k,NKP+1,contornoxesq-laldiferenca+movi,h_estat+gap+contornoybaixo
k,nkp+2,contornoxesq-laldiferenca+movi,h_estat+gap+hal+contornoybaixo
k,nkp+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+movi,h_estat+gap+contornoybaixo
k,nkp+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+movi,h_estat+gap+hal+contornoybaixo
a,NKP+1,NKP+2,NKP+4,NKP+3
NUMCMP,ALL

```

**\*endif**

**!PARA CRIAR CONTORNO:**

```

*get,nkp2,kp,,num,max

```

```

k,nkp2+1,0,0
k,nkp2+2,0,contornoybaixo+contornoycima+h_estat+gap+hal
k,nkp2+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+contornoxd,contornoybaixo+contornoycima+h_estat+gap+hal
k,nkp2+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxesq+contornoxd,0

```

```

a,nkp2+1,nkp2+2,nkp2+3,nkp2+4

```

```

ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL
ALLSEL,ALL

```

**! Para sobreporas áreas**

**! Renumeras as áreas**

**! Atribuição das características eletricas:**

```

*DIM,corr,ARRAY,var1,6
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,corr(1,1),'corrente6_Maglev','txt','K:\Motor_ANSYS_BELA',JIK,6,var1,1,,
(6f5.0)
*END
/INPUT,ansuitmp

```

**! 6 PORQUE SÃO 6 COLUNAS (3 fases: a,-b,c e -a,b,-c)**

```

ALLSEL,ALL

```

**!CRIAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA USAR NO "aatt"**

```

R,1,(Iran-(2*folgax))*hbob,nespira,profund,-1,enchim
R,2,(Iran-(2*folgax))*hbob,nespira,profund,+1,enchim
REAL,1
R,2,(Iran-(2*folgax))*hbob,nespira,profund,+1,enchim
REAL,2

```

**! O -1 é porque o ansys interpreta sentido  
! "entrando" como negativo e sentido  
! "saindo" como positivo**

**! Para criar a área onde estará o gap (recurso para posteriormente refinar a malha neste lugar):**

```

*GET,nkp3,kp,,num,max
k,nkp3+1,0,contornoybaixo+h_estat

```



```

k,nkp3+2,0,contornoybaixo+h_estat+gap
k,nkp3+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxd+contornoxesq,contornoybaixo+h_estat+gap
k,nkp3+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_ldente)+contornoxd+contornoxesq,contornoybaixo+h_estat

a,nkp3+1,nkp3+2,nkp3+3,nkp3+4

ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL      ! Para sobrepor as áreas (neste caso, as áreas 7 e 8 estariam sobre a área 6)
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL      ! Renumera as áreas
ALLSEL,ALL

!*****
!
!                               Definição dos Materiais
!*****
/PREP7
!@@@@@@@@@@@@@@@@ Atribuição de cobre aos enrolamentos @@@@@@@@@@@@@@@@@
ASEL,S,,,corr(1,1)      ! O arquivo corrente nada mais é do que a divisão do número das áreas
                        ! correspondentes aos enrolamentos de cobre pelas fases a,b,c e -a,-b e -c,
                        ! na ordem: a,-b,c,-a,b,-c

*DO,COL,1,6,2
*DO,FILA,1,var1
  ASEL,a,,,corr(FILA,COL)
*ENDDO
*ENDDO
AATT,2,,1!AATT,Material,real_cte,tipo !!!Estes são os que a corrente estão "entrando" no plano z
ALLSEL,ALL

ASEL,S,,,corr(1,2)
*DO,COL,2,6,2
*DO,FILA,1,var1
  ASEL,a,,,corr(FILA,COL)
*ENDDO
*ENDDO
AATT,2,,1 !AATT,Material,real_cte,tipo !!!!Estes são os que a corrente está "saindo" do plano z
ALLSEL,ALL

!@@@@@@@@@@@@@@@@ Atribuição do aluminio @@@@@@@@@@@@@@@@@
LSEL,S,LOC,Y,h_estat+gap+hal+contornoybaixo
ASLL,S
LSEL,S,loc,y,h_estat+gap+hal+contornoybaixo+contornoycima
ASLL,u

AATT,4,,1!AATT,Material,real_cte,tipo (plane53,condutor maciço alimentado por fonte de tensão)
ALLSEL,ALL

!@@@@@@@@@@@@@@@@ Atribuição do ar @@@@@@@@@@@@@@@@@
LSEL,S,EXT
ASLL,S
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL

asel,s,,,330,366,6
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL

asel,s,,,7,43,6

```

AATT,3,,1  
ALLSEL,ALL

asel,s,,,8,368,6  
AATT,3,,1  
ALLSEL,ALL

!@@@@@@@@@@@@ Atribuição do ferro @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  
asel,all  
asel,u,MAT,,2 ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 2  
ASEL,U,MAT,,3 ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 3  
ASEL,U,MAT,,4 ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 4  
AATT,1,,1 ! ATRIBUI O MATERIAL 1, SEM REAL CTE, TIPO 1, A TODAS  
! ESSAS Á REAS QUE NÃO TINHAM ELEMENTO  
ALLSEL,ALL

!\*\*\*\*\*  
!  
! GERAÇÃO DA MALHA  
! OBS.:Deve ser feita nesta ordem que está, pq estava dando erro em outra ordem  
!\*\*\*\*\*  
!@@@@@@@@ Atribuição da malha no isolamento dos condutores @@@@@@@@@@

LSEL,S,LOC,Y,hatedente+contornoyBAIXO+folgay+hbob  
ASLL,S  
ASEL,U,MAT,,2  
\*DO,ii,0,passo\_pol-2  
asel,u,area,,7+ii\*6  
\*enddo  
aesize,all,area\_elem  
mshape,0,2D  
amesh,all  
allsel,all

!@@@@@@@@ Atribuição da malha do gap @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@  
LSEL,S,LOC,Y,H\_ESTAT+CONTORNOYbaixo+GAP  
ASLL,S  
ASEL,U,MAT,,4  
LSEL,S,LOC,Y,CONTORNOYbaixo+contornoycima+HAL+GAP+H\_ESTAT  
ASLL,U  
AESIZE,ALL,area\_elem  
MSHAPE,0,2D  
AMESH,ALL  
ALLSEL,ALL

!@@@@@@@@ Atribuição da malha dos condutores @@@@@@@@@@@@@@@@@@  
LSEL,S,LOC,Y,contornoybaixo+hatedente+folgay  
ASLL,S  
lsel,s,ext  
asll,u  
lsel,s,loc,y,contornoybaixo+h\_estat  
asll,u  
aesize,all,area\_elem  
amesh,all  
allsel,all

LSEL,S,LOC,Y,contornoybaixo+h\_estat-folgay  
ASLL,S  
lsel,s,ext  
asll,u

```
aesize,all,area_elem  
amesh,all  
allsel,all
```

```
!@@@@@@@@@@@@ Atribuição da malha do alumínio(secundário) @@@@@@@@@@  
lsel,s,loc,y,contornoybaixo+h_estat+gap  
asll,s  
lsel,s,ext  
asll,u  
aesize,all,area_elem  
amesh,all  
allsel,all
```

```
!@@@@@@@@@@@@ Atribuição da malha do ferro @@@@@@@@@@@@@@  
asel,s,mat,,1  
aesize,all,1.8*area_elem  
amesh,all  
allsel,all
```

```
!@@@@@@@@@@@@ Atribuição da malha do contorno externo @@@@@@@@@@  
lsel,s,ext  
asll,s  
aesize,all,2*area_elem  
mshape,0,2D  
amesh,all  
allsel,all  
/INPUT,'enrolamento_v7_3fases_Maglev','txt','K:\Motor_ANSYS_BELA'
```

## SEGUNDA ROTINA :

*Atribuição da condição de contorno; definição da alimentação das bobinas de fases a, b e c do enrolamento de armadura; acoplamento das áreas preenchidas pelas espiras; determinação de como é feito o enrolamento de armadura (ordem em que as áreas são conectadas entre si); alimentação de tensão.*

/PREP7

R,1,(Iran-(2\*folgax))\*hbob,nespira,profund,-1,enchim    ! O -1 é pq o ansys interpreta sentido  
! "entrando" como negativo e sentido  
! "saindo" como positivo

REAL,1

R,2,(Iran-(2\*folgax))\*hbob,nespira,profund,+1,enchim

REAL,2

! \*\* Para clarear tds as áreas da fase a (vide arquivo correntes..tentar parametrizar isso depois) \*\*

ACLEAR,6,276,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,12,282,54

ACLEAR,18,288,54

ACLEAR,49,319,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,55,325,54

ACLEAR,61,331,54

! \*\*\*\*\* Para clarear tds as áreas da fase b \*\*\*\*\*

ACLEAR,24,294,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,30,300,54

ACLEAR,36,306,54

ACLEAR,67,337,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,73,343,54

ACLEAR,79,349,54

! \*\*\*\*\* Para clarear tds as áreas da fase c \*\*\*\*\*

ACLEAR,42,312,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,48,318,54

ACLEAR,54,324,54

ACLEAR,85,355,54    ! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,91,361,54

ACLEAR,97,367,54

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase a #####

\*DO,II,1,VAR1

ASEL,S,,,CORR(II,1)    ! (condutores da fase a, com a corrente "entrando")

AATT,2,1,2

ALLSEL,ALL

\*ENDDO

ALLSEL,ALL

\*DO,II,1,VAR1

ASEL,S,,,CORR(II,1)

AESIZE,ALL,AREA\_ELEM

AMESH,ALL

ALLSEL,ALL

\*ENDDO

```

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,4)  ! (condutores da fase a, com a corrente "saindo")
AATT,2,2,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,4)
AESIZE,ALL,AREA_ELEM
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase b #####
*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,2)  ! (condutores da fase b, com a corrente "saindo")
AATT,2,2,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,2)
AESIZE,ALL,AREA_ELEM
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,5)  ! (condutores da fase b, com a corrente "entrando")
AATT,2,1,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,5)
AESIZE,ALL,AREA_ELEM
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase c #####
*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,3)  ! (condutores da fase c, com a corrente "entrando")
AATT,2,1,2
  ALLSEL,ALL

```

\*ENDDO

ALLSEL,ALL

\*DO,II,1,VAR1  
ASEL,S,,,CORR(II,3)  
AESIZE,ALL,AREA\_ELEM  
AMESH,ALL  
ALLSEL,ALL  
\*ENDDO

\*DO,II,1,VAR1  
ASEL,S,,,CORR(II,6) ! (condutores da fase c, com a corrente "saindo")  
AATT,2,2,2  
ALLSEL,ALL  
\*ENDDO

ALLSEL,ALL

\*DO,II,1,VAR1  
ASEL,S,,,CORR(II,6)  
AESIZE,ALL,AREA\_ELEM  
AMESH,ALL  
ALLSEL,ALL  
\*ENDDO

ALLSEL,ALL  
NUMCMP,ALL

CSYS,0  
!\*\*\*\*\*  
!  
! Atribuição das características elétricas,determinação dos enrolamentos  
!  
!\*\*\*\*\*

!+++++  
!  
! Atribuição do potencial nulo à fronteira externa (CONDIÇÃO DE CONTORNO)  
!  
!+++++

LSEL,S,EXT  
NSLL,S  
KSL,S  
D,ALL,AZ,0  
ALLSEL,ALL

!+++++  
!  
! Criação dos nós necessários aos acoplamentos  
!  
!+++++

\*GET,NOD,NODE,,COUNT ! Conta o número total de nós para que, em seguida, possam ser  
! criados os nós através dos quais será feito o acoplamento.

ER\_NOD1 = NOD+1  
CSYS,1  
NOD1 = NOD+1  
N,NOD1,0,0  
\*REPEAT,3\*((VAR1\*2)+2),1

\*GET,ER\_NOD2,NODE,,COUNT

allsel,all

CSYS,1

\*AFUN,DEG

!! FASE A !!!

NODE = NOD+1 ! "node" é o primeiro pt criado em (0,0)

ASEL,S,,,CORR(1,1) ! Seleciona a primeira área correspondente à fase a

NSLA,S,1 ! Seleciona os nós associados à área (tanto os internos qt os de fronteira)

\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! Poderia ser QUALQUER outro nó no interior da área. O máx é  
! só porque garante que o programa pegará um dos pontos,  
! também poderia ser o mínimo ou qualquer outro.

TYPE,3 ! Recapitulando: tipo 3 é o circuito 124, strandedcoil

R,3,1 ! Definição da real cte 3, que será associada ao elemento "circu 124,  
!strandedcoil" para a fase a (sentidos entrando e saindo).Obs.: Esses  
! sentidos foram associados ÀS ÁREAS dos condutores por meio das reais  
!ctes 1 e 2.A real cte 3 está relacionada ao elemento 3(circu 124) e não à  
! área à ql será acoplado

REAL,3

E,NOD+1,NODE+1,N1 ! Cria o elemento com i, j e k sendo, respectivamente, nod+1,  
! node+1=nod+2,nómax da área selecionada.

! OBS.: É por meio desse nó k(n1) que o circuito 124 será acoplado à área do condutor desejado.

! O circu 124 é como uma fonte de corrente. Esta flui no sentido do pt "i" para o pt "j".

!O pt "k" é onde se liga esta fonte de corrente à área

ALLSEL,ALL

!!! Obs.: É fundamental nas linhas seguintes que o acoplamento seja na ordem em que serão enro-  
ladas as bobinas.

\*DO,FILA,2,VAR1,2

\*DO,COL,4,1,-3

NODE = NODE+1

ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)

NSLA,S,1

\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX

TYPE,3

R,3,1

REAL,3

E,NODE,NODE+1,N1

\*ENDDO

\*ENDDO

ALLSEL,ALL

! Segunda parte: condutores numerados em "vinho" no arquivo

\*DO,FILA,VAR1-1,1,-2

\*DO,COL,4,1,-3

\*IF,FILA,NE,1,THEN

NODE = NODE+1

ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)

NSLA,S,1

\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX

TYPE,3

R,3,1

REAL,3

E,NODE,NODE+1,N1

```

*ELSEIF,COL,EQ,4
  NODE = NODE+1
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,3,1
  REAL,3
  E,NODE,NODE+1,N1
*ENDIF
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
!
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Neste caso, estamos alimentando por meio de fonte de tensão senoidal independente,definida no
! primeiro programa como sendo tipo 4
TYPE,4
R,4,TENSAO,0      !real cte associada à fonte de tensão da fase a (módulo:tensão; fase:0°)
REAL,4
NODE = NODE+1
E,NOD+1,NODE,NODE+1
ALLSEL,ALL

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ----- Acoplamento dos elementos da fase a -----!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! ++++++ Acoplamento de corrente ++++++
CPLE = 1          !primeiro acoplamento

! Como, neste caso, os enrolamentos de mesma fase estão EM SÉRIE, o número do acoplamento de
! corrente é o mesmo para tds eles (da mesma fase)!!!
ASEL,S,,,CORR(1,1)
NSLA,S,1
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,1,4,3
ASEL,a,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,A,1
  *ENDDO
*ENDDO

CP,CPLE,CURR,ALL
ALLSEL,ALL

! ++++++ Acoplamento de tensão ++++++
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,1,4,3
  CPLE = CPLE+1
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,S,1
CP,CPLE,EMF,ALL      ! Como, neste caso, os enrolamentos de mesma fase estão EM
                     ! SÉRIE, cada um tem a sua fem!!!!

  ALLSEL,ALL
  *ENDDO
*ENDDO

```



```

D,NODE,VOLT,0          ! Atribui o potencial nulo ao terminal negativo da fonte de tensão
                        ! (terminal "j")

NODE = NODE+1
ALLSEL,ALL

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! FASE B !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!-----
!
!
! Obs.: na fase b, tem-se que prestar mais atenção, pq a lógica dela é inversa à das fases a e c, desde
! a formação dos elementos das bobinas
! Em que os pts "i" e "j" têm a lógica ao contrário das demais fases, até a fonte de tensão!!!
!
!-----
NODE = NODE+1
NODB=NODE

ASEL,S,,,CORR(1,2)      ! Seleciona o primeiro elemento da fase "-b", dado no arquivo
                        ! correntes, a partir do ql será iniciado o enrolamento das bobinas
                        ! da fase "b"

NSLA,S,1
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX
TYPE,3
R,5,1
REAL,5
E,NODE+1,NODE,N1
ALLSEL,ALL

*DO,FILA,2,VAR1,2
  *DO,COL,5,2,-3
    NODE = NODE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
    NSLA,S,1
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
    TYPE,3
    R,5,1
    REAL,5
    E,NODE+1,NODE,N1
  *ENDDO
*ENDDO
ALLSEL,ALL

*DO,FILA,(VAR1-1),1,-2
  *DO,COL,5,2,-3
  *IF,FILA,NE,1,THEN
    NODE = NODE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
    NSLA,S,1
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
    TYPE,3
    R,5,1
    REAL,5
    E,NODE+1,NODE,N1
  *ELSEIF,COL,EQ,5
    NODE = NODE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
    NSLA,S,1
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
    TYPE,3
    R,5,1
    REAL,5

```



```

*DO,FILA,2,VAR1,2
*DO,COL,6,3,-3
  NODE = NODE+1
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,7,1
  REAL,7
  E,NODE,NODE+1,N1
*ENDDO
*ENDDO
ALLSEL,ALL

```

```

*DO,FILA,VAR1-1,1,-2
*DO,COL,6,3,-3
*IF,FILA,NE,1,THEN
  NODE = NODE+1
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,7,1
  REAL,7
  E,NODE,NODE+1,N1
*ELSEIF,COL,EQ,6
  NODE = NODE+1
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,7,1
  REAL,7
  E,NODE,NODE+1,N1
*ENDIF
ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ----- Acoplamento dos elementos da fase b -----!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Fonte de tensão independente:

```

TYPE,4
R,8,TENSAO,120
REAL,8
NODE = NODE+1
E,NODc,NODE,NODE+1

```

```

ALLSEL,ALL

```

! ++++++ Acoplamento de corrente ++++++

```

CPLE = CPLE+1
ASEL,S,,,CORR(1,3)
NSLA,S,1
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,3,6,3
  ASEL,a,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,A,1

```

```
*ENDDO
*ENDDO
```

```
CP,CPLE,CURR,ALL
ALLSEL,ALL
```

```
! +++++ Acoplamento de tensão +++++
```

```
*GET,CPLE,ACTIVE,,CP
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,3,6,3
    CPLE = CPLE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  CP,CPLE,EMF,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO
```

```
D,NODE,VOLT,0
ALLSEL,ALL
```

### TERCEIRA ROTINA :

*Solução para análise harmônica bidimensional e cálculo das forças via Lei de Lorentz, com geração de arquivos com as forças resultantes; com os módulos e fases de tensão e com os módulos e fases de corrente para os 20 valores de escorregamento utilizados.*

```
!*****
!  
!  
!                                     SOLUÇÃO  
!  
!*****  
/prep7  
esel,s,mat,,4  
*get,nelem,elem,,count  
  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! DIMENSIONAMENTO DOS VETORES QUE SERÃO USADOS !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
  
*dim,Forca,array,50,2  
*DIM,S_VLT,ARRAY,100,6,0,  
*DIM,S_CORR,ARRAY,100,6,0,  
  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !!  
  
!escorr=S0+0.05                                ! Colocar apenas quando se desejar a simulação com um  
!MP,RSVX,4,2.82E-8/(ESCORR)                    ! valor de escorregamento.  
allsel,all  
jj=0  
MP,RSVX,4,2.82E-8/S0  
*DO,escorr,S0,SF,SP  
jj=jj+1  
  
/SOLU  
ANTYPE,HARMIC  
HARFRQ,freq  
SOLVE  
FINISH  
  
/POST1  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! PARTE REAL: !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
set,1,1,,0  
esel,s,mat,,4  
ETABLE,EBy,B,Y  
ETABLE,EJTz,JT,Z  
ETABLE,EBx,B,X  
ETABLE,Earea,VOLU,  
SMULT,CORRz_re,Earea,EJTz,1,1,  
  
SMULT,Frealx,EBy,CORRz_re,-1,1,  
SMULT,Frealy,EBX,CORRz_re,1,1,  
ssum  
*get,SFrealx,SSUM,,item,Frealx                ! Somatório da força em x  
*get,SFrealy,SSUM,,item,Frealy                ! Somatório da força em y  
!F_real=sqrt((SFrealx*SFrealx)+(SFrealy*SFrealy))  
allsel,all  
  
! Pegando os enrolamentos da fase a, e em cada uma o número do nó mínimo, e o valor da fem e da
```

! corrente nesse nó (PARTE REAL DE AMBOS):

S\_VoltA\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em série  
S\_CorrA\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em  
! paralelo

```
*DO,filA,1,var1,1
*DO,col,1,6,3
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  ESLA,S
  NSLE,S,1
  *GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
  *GET,CorrA_RE,NODE,Nasel,CURR,
  *GET,tensaoA_re,NODE,Nasel,EMF,
S_VoltA_re=S_VoltA_re+tensaoA_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
! S_CorrA_re=S_CorrA_re+CorrA_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo
  ALLSEL,ALL
  *ENDDO
*ENDDO
```

S\_CorrA\_re=S\_CorrA\_re+CorrA\_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em série  
!S\_VoltA\_re=S\_VoltA\_re+tensaoA\_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em  
! paralelo

! Pegando os enrolamentos da fase b, e em cada uma o número do nó mínimo, e o valor da fem e da  
! corrente nesse nó (PARTE REAL DE AMBOS):

S\_VoltB\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em série  
S\_CorrB\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em  
! paralelo

```
*DO,filA,1,var1,1
*DO,col,5,2,-3
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  ESLA,S
  NSLE,S,1
  *GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
  *GET,CorrB_RE,NODE,Nasel,CURR,
  *GET,tensaoB_re,NODE,Nasel,EMF,
S_VoltB_re=S_VoltB_re+tensaoB_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_CorrB_re=S_CorrB_re+CorrB_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo
  ALLSEL,ALL
  *ENDDO
*ENDDO
```

S\_CorrB\_re=S\_CorrB\_re+CorrB\_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em série  
!S\_VoltB\_re=S\_VoltB\_re+tensaoB\_re ! Usar este comando quando for enrolamentos em  
! paralelo

S\_VoltC\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em série  
S\_CorrC\_re=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em  
! paralelo

```
*DO,filA,1,var1,1
*DO,col,3,6,3
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  ESLA,S
  NSLE,S,1
  *GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
  *GET,CorrC_RE,NODE,Nasel,CURR,
  *GET,tensaoC_re,NODE,Nasel,EMF,
```

```

S_VoltC_re=S_VoltC_re+tensaoC_re      ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_CorrC_re=S_CorrC_re+CorrC_re      ! Usar este comando quando for enrolamentos em
                                      ! paralelo

ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

S_CorrC_re=S_CorrC_re+CorrC_re      ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_VoltC_re=S_VoltC_re+tensaoC_re    ! Usar este comando quando for enrolamentos em
                                      ! paralelo

/POST1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! PARTE IMAGINÁRIA: !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
set,1,1,,1
esel,s,mat,,4
ETABLE,EBYim,B,Y
ETABLE,EJTzim,JT,Z
ETABLE,EBxim,B,X
ETABLE,Earea,VOLU,
SMULT,CORRz_im,Earea,EJTzim,1,1,

SMULT,Fimagx,EBYim,CORRz_im,-1,1,
SMULT,Fimagy,EBxim,CORRz_im,1,1,

ssum
*get,SFimagx,SSUM,,item,Fimagx
*get,SFimagy,SSUM,,item,Fimagy

!F_imag=sqrt((SFimagx*SFimagx)+(SFimagy*SFimagy))

Forca(jj,1)=sqrt((Sfrealx*Sfrealx)+(Sfimagx*Sfimagx))*profund

Forca(jj,2)=sqrt((Sfrealx*Sfrealx)+(Sfimagy*Sfimagy))*profund
*CFOPEN,'R_FORCA_Maglev1004','txt','K:\Motor_ANSYS_BELA'
*VWRITE,forca(1,1),forca(1,2)
(1X,' ',F20.10,' ',F20.10)
*CFCLOS
/INPUT,ansuitmp

allsel,all

! Pegando os enrolamentos da fase a, e em cada uma o número do nó mínimo, e o valor da fem e da
! corrente nesse nó (PARTE REAL DE AMBOS):

S_VoltA_im=0                          ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
S_CorrA_im=0                          ! Usar este comando quando for enrolamentos em
                                      ! paralelo

*DO,fil,1,var1,1
*DO,col,1,6,3
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
ESLA,S
NSLE,S,1
*GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
*GET,CorrA_im,NODE,Nasel,CURR,
*GET,tensaoA_im,NODE,Nasel,EMF,
S_VoltA_im=S_VoltA_im+tensaoA_im      ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_CorrA_im=S_CorrA_im+CorrA_im      ! Usar este comando quando for enrolamentos em
                                      ! paralelo

```

```

ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

```

S_CorrA_im=S_CorrA_im+CorrA_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_VoltA_im=S_VoltA_im+tensaoA_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

! Pegando os enrolamentos da fase b, e em cada uma o número do nó mínimo, e o valor da fem e da  
! corrente nesse nó (PARTE REAL DE AMBOS):

```

S_VoltB_im=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
S_CorrB_im=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

```

*DO,fil,1,var1,1
*DO,col,5,2,-3
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
ESLA,S
NSLE,S,1
*GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
*GET,CorrB_im,NODE,Nasel,CURR,
*GET,tensaoB_im,NODE,Nasel,EMF,
S_VoltB_im=S_VoltB_im+tensaoB_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_CorrB_im=S_CorrB_im+CorrB_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

```

ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

```

S_CorrB_im=S_CorrB_im+CorrB_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_VoltB_im=S_VoltB_im+tensaoB_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

! Pegando os enrolamentos da fase C, e em cada uma o número do nó mínimo, e o valor da fem e da  
! corrente nesse nó (PARTE REAL DE AMBOS):

```

S_VoltC_im=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
S_CorrC_im=0 ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

```

*DO,fil,1,var1,1
*DO,col,3,6,3
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
ESLA,S
NSLE,S,1
*GET,Nasel,NODE,,NUM,MIN
*GET,CorrC_im,NODE,Nasel,CURR,
*GET,tensaoC_im,NODE,Nasel,EMF,
S_VoltC_im=S_VoltC_im+tensaoC_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_CorrC_im=S_CorrC_im+CorrC_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

```

ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

```

S_CorrC_im=S_CorrC_im+CorrC_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em série
!S_VoltC_im=S_VoltC_im+tensaoC_im ! Usar este comando quando for enrolamentos em
! paralelo

```

```

/prep7
*AFUN,DEG

```



**!Geração das colunas com os módulos de tensão nas fases a, b e c**

**! Módulo da Tensão na Fase a, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_VLT(JJ,1)=\sqrt{(S\_VoltA\_re)*(S\_VoltA\_re)+(S\_VoltA\_im)*(S\_VoltA\_im)}$

**! Módulo da Tensão na Fase b, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_VLT(JJ,3)=\sqrt{(S\_VoltB\_re)*(S\_VoltB\_re)+(S\_VoltB\_im)*(S\_VoltB\_im)}$

**! Módulo da Tensão na Fase c, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_VLT(JJ,5)=\sqrt{(S\_VoltC\_re)*(S\_VoltC\_re)+(S\_VoltC\_im)*(S\_VoltC\_im)}$

**!Geração das colunas com as fases de tensão a, b e c**

**! Fase da Corrente na fase a, para cada um dos diferentes escorregamentos.**

**\*if,S\_VoltA\_re,LT,0,and,S\_VoltA\_im,LT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,2)=\text{atan}((S\_VoltA\_im)/(S\_VoltA\_re))-180$

**\*elseif,S\_VoltA\_re,LT,0,and,S\_VoltA\_im,GT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,2)=\text{atan}((S\_VoltA\_im)/(S\_VoltA\_re))+180$

**\*else**

$S\_Vlt(JJ,2)=\text{atan}((S\_VoltA\_im)/(S\_VoltA\_re))$

**\*endif**

**! Fase da Corrente na fase b, para cada um dos diferentes escorregamentos.**

**\*if,S\_VoltB\_re,LT,0,and,S\_VoltB\_im,LT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,4)=\text{atan}((S\_VoltB\_im)/(S\_VoltB\_re))-180$

**\*elseif,S\_VoltB\_re,LT,0,and,S\_VoltB\_im,GT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,4)=\text{atan}((S\_VoltB\_im)/(S\_VoltB\_re))+180$

**\*else**

$S\_Vlt(JJ,4)=\text{atan}((S\_VoltB\_im)/(S\_VoltB\_re))$

**\*endif**

**! Fase da Corrente na fase c, para cada um dos diferentes escorregamentos.**

**\*if,S\_VoltC\_re,LT,0,and,S\_VoltC\_im,LT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,6)=\text{atan}((S\_VoltC\_im)/(S\_VoltC\_re))-180$

**\*elseif,S\_VoltC\_re,LT,0,and,S\_VoltC\_im,GT,0,then**

$S\_Vlt(JJ,6)=\text{atan}((S\_VoltC\_im)/(S\_VoltC\_re))+180$

**\*else**

$S\_Vlt(JJ,6)=\text{atan}((S\_VoltC\_im)/(S\_VoltC\_re))$

**\*endif**

**!Geração das colunas com os módulos de corrente nas fases a, b e c**

**! Módulo da Corrente na Fase a, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_CORR(JJ,1)=\sqrt{(S\_CorrA\_re)*(S\_CorrA\_re)+(S\_CorrA\_im)*(S\_CorrA\_im)}$

**! Módulo da Corrente na Fase b, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_CORR(JJ,3)=\sqrt{(S\_CorrB\_re)*(S\_CorrB\_re)+(S\_CorrB\_im)*(S\_CorrB\_im)}$

**! Módulo da Corrente na Fase c, para cada um dos diferentes escorregamentos**

$S\_CORR(JJ,5)=\sqrt{(S\_CorrC\_re)*(S\_CorrC\_re)+(S\_CorrC\_im)*(S\_CorrC\_im)}$

**!Geração das colunas com as fases de corrente a,b e c**

**! Fase da Corrente na fase a, para cada um dos diferentes escorregamentos**

**\*if,S\_CorrA\_re,LT,0,and,S\_CorrA\_im,LT,0,then**

$S\_CORR(JJ,2)=\text{atan}((S\_CorrA\_im)/(S\_CorrA\_re))+180$

**\*elseif,S\_CorrA\_re,LT,0,and,S\_CorrA\_im,GT,0,then**

$S\_CORR(JJ,2)=\text{atan}((S\_CorrA\_im)/(S\_CorrA\_re))-180$

**\*else**

$S\_CORR(JJ,2)=\text{atan}((S\_CorrA\_im)/(S\_CorrA\_re))$

**\*endif**

**! Fase da Corrente na fase B, para cada um dos diferentes escorregamentos**

**\*if,S\_CorrB\_re,LT,0,and,S\_CorrB\_im,LT,0,then**

$S\_CORR(JJ,4)=\text{atan}((S\_CorrB\_im)/(S\_CorrB\_re))+180$

```

*elseif,S_CorrB_re,LT,0,and,S_CorrB_im,GT,0,then
S_CORR(JJ,4)= atan((S_CorrB_im)/(S_CorrB_re))-180
*else
S_CORR(JJ,4)= atan((S_CorrB_im)/(S_CorrB_re))
*endif

! Fase da Corrente na fase C, para cada um dos diferentes escorregamentos
*if,S_CorrC_re,LT,0,and,S_CorrC_im,LT,0,then
S_CORR(JJ,6)= atan((S_CorrC_im)/(S_CorrC_re))+180
*elseif,S_CorrC_re,LT,0,and,S_CorrC_im,GT,0,then
S_CORR(JJ,6)= atan((S_CorrC_im)/(S_CorrC_re))-180
*else
S_CORR(JJ,6)= atan((S_CorrC_im)/(S_CorrC_re))
*endif

*CFOPEN,'RESULT_Corr_Maglev1004','txt','K:\Motor_ANSYS_BELA'
*VWRITE,S_CORR(1,1),S_CORR(1,2),S_CORR(1,3),S_CORR(1,4),S_CORR(1,5),S_CORR(1,6)
(1X,' ',F20.15,' ',F20.5,' ',F20.15,' ',F20.5,' ',F20.15,' ',F20.5)
*CFCLOS
/INPUT,ansuitmp

*CFOPEN,'RESULT_tensao_Maglev1004','txt','K:\Motor_ANSYS_BELA'
*VWRITE,S_VLT(1,1),S_VLT(1,2),S_VLT(1,3),S_VLT(1,4),S_VLT(1,5),S_VLT(1,6)
(1X,' ',F20.15,' ',F20.5,' ',F20.15,' ',F20.5,' ',F20.15,' ',F20.5)
*CFCLOS
/INPUT,ansuitmp
*IF,ESCORR,NE,SF,THEN      ! Necessário para reiniciar toda vez em que não for a última. Ou
                           ! seja, como tem-se que a permeabilidade do alumínio varia com
                           ! o escorregamento, deve-se refazer todos os cálculos na solução
                           ! até o último valor de escorregamento, limpando da memória do
                           ! prog.

RESET

/PREP7
ASEL,S,MAT,,4
ACLEAR,ALL

MPDELE,RSVX,4
MP,MURX,4,1                ! PERMEABILIDADE DO CARRO
MP,RSVX,4,2.82E-8/(ESCORR+SP)
AATT,4,,1
AESIZE,ALL,AREA_ELEM
AMESH,ALL
ALLSEL,ALL

LSEL,S,EXT
NSLL,S
KSLL,S
D,ALL,AZ,0
ALLSEL,ALL
*ENDIF
*ENDDO

```

## APÊNDICE V

## ROTINAS UTILIZADAS NA TERCEIRA ETAPA DE SIMULAÇÕES

### PRIMEIRA ROTINA :

*Definição da Geometria, atribuição dos materiais e suas propriedades elétricas e magnéticas (resistividade, permeabilidade) às áreas do domínio e criação da malha.*

**/PREP7**

CSYS,0

## ANTYPE, STATIC

**ET,1,13,0**      **! ELEMENTO MAGNÉTICO 2-D COM 4 NÓS**

**ET,2,53,3, ! CIRCUIT-COUPLED STRANDED COIL - ELEMENTO COM 8 NÓS**

**ET,3,124,5, ! STRANDED COIL - CIRCUITO EXTERNO**

**ET,4,124,4,0 ! FONTE DE TENSÃO INDEPENDENTE, SINOIDAL, CIRCUITO EXTERNO**

**ET,5,53,0**

**ET,6,124,6 ! 2D MASSIVE CONDUCTOR VOLTAGE SOURCE**

**ET,7,124,0 ! RESISTOR DE CONEXÃO DAS BARRAS DO ROTOR**

**ET,8,124,1** **! INDUTÂNCIA**

**EMUNIT,MKS**

**MP,MURX,1,3000**      **! PERMEABILIDADE DO FERRO**

**MP,MURX,2,1**                      **! PERMEABILIDADE DO COBRE**

**MP,MURX,3,1 ! PERMEABILIDADE DO AR**

**! PERMEABILIDADE DO ALUMÍNIO**

**MP,RSVX,2,1.724E-8** **! RESISTIVIDADE DO COBRE**

**MP.RSVX.4.2.82E-8 ! RESISTIVIDADE DO ALUMÍNIO**

\*\*\*\*\*  
**Definição das Constantes**  
 \*\*\*\*\*

**ran fase =3**

**fase = 3**

```
ran polo = ran fase*fase
```

par polo = 3

$$\text{tot ran} = 2 * \text{par polo} * \text{ran polo}$$

**nespira=13**

**profund=2.05e-1**

**passo\_pol=8**

**tensao=342**

```
var1=(2*par_polo)*ran_fase
```

**enchim=1**

```
ran secund=70
```

## ! PARÂMETROS EM Y:

### hdente = 45e-3

### hatedente = 38e-3

gap = 16e-3

**!hal = 1.5e-2**

**hal1=24.3e-3**

**hal2=13.5e-3**

$hal = 37.5e-3$   
 $folgay = 2.5e-3$   
 $hbob = 18.8e-3$  ! 13 condutores de altura 1.3mm(daria 16.9mm) e FE 0.9  
 $isol\_bob = h_{dente} - 2 * folgay - 2 * hbob$   
 $h\_estat = h_{atedente} + h_{dente}$   
 $contornoycima = 12e-2$  ! Necessário definir os valores do contorno em cima e em  
! baixo porque deve-se refinar a malha por onde passam  
! as linhas de fluxo. Deste modo, o contorno em baixo não  
! precisa ser tão grande.  
 $contornoybaixo = 5e-2$

### ! PARÂMETROS EM X:

$lran = 11.4e-3$   
 $ldente = 7.9e-3$   
 $passo\_ran = lran + ldente$   
 $d\_ldente = 45.1e-3$  ! Para colocar uma diferença de largura entre os dentes  
! das extremidades e os demais.  
 $lal1 = 13.2e-3$   
 $lal2 = 7e-3$   
 $lal = ((passo\_ran) * (tot\_ran + passo\_pol - 1) + lran + 2 * d\_ldente)$   
 $laldiferenca = (1.512 - lal) / 2$   
 $folgax = 11e-4$

### !Outros Parâmetros

$area\_elem = 2.5e-3$  ! Área do elemento da malha  
 $divisoes = lal / area\_elem$  ! Número de divisões da placa depois de ser feita a malha  
 $n = 1$  ! Fração da largura da placa que será movimentada  
 $PIR = 4 * atan(1)$  ! Cálculo de Pi  
 $FREQ = 25$  ! Teste inicial simulando CC era aquele valor de  
! frequência muito baixo, relativo ao caso estático.  
 $S0 = 0.001$  ! Escorregamento inicial  
 $SF = 1$  ! Escorregamento final  
 $SP = 0.05$  ! Passo do escorregamento  
 $cte = -1$

$movi = 0$   
! Considerando o deslocamento do secundário para a esquerda:

$contornoxesq = -movi + laldiferenca + 10e-2$  ! Necessário definir um para cada lado (direita e  
! esquerda), uma vez que a condição ideal é placa de  
! alumínio e estatoralinhados, mas isso não  
! necessariamente ocorrerá.

$contornoxd = 10e-2 + laldiferenca$

!@ Definição dos parâmetros do secundário quando consideradas as barras curto-circuitadas @!

!!!!Em x:  
 $ldente\_secund = 7e-3$   
 $lran\_secund = 13.2e-3$   
 $lzinho = 10e-3$   
 $deltal = 3.1e-3$   
 $lal = 1512e-3$

!!!!Em y:

hplaca=24.3e-3  
 hran\_secund=13.2e-3  
 hdente\_secund= 41e-3-hplaca-hran\_secund

**!Definição dos keypoints e das áreas dos condutores e do núcleo de ferro:**

k,1,contornoxesq,contornoybaixo  
 k,2,d\_ldente+contornoxesq,contornoybaixo  
 k,3,contornoxesq,hatedente+contornoybaixo  
 k,4,d\_ldente+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo  
 k,5,contornoxesq,h\_estat+contornoybaixo  
 k,6,d\_ldente+contornoxesq,h\_estat+contornoybaixo  
 k,7,d\_ldente+ldente+contornoxesq,h\_estat+contornoybaixo  
 k,8,d\_ldente+ldente+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo  
 k,9,d\_ldente+ldente+contornoxesq,contornoybaixo  
 k,10,d\_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,contornoybaixo  
 k,11,d\_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,hatedente+contornoybaixo  
 k,12,d\_ldente+ldente+lrn+contornoxesq,h\_estat+contornoybaixo  
 k,13,d\_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay+contornoybaixo  
 k,14,d\_ldente+ldente+lrn-folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay+contornoybaixo  
 k,15,d\_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay-hbob+contornoybaixo  
 k,16,d\_ldente+ldente+lrn - folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay-hbob+contornoybaixo  
 k,17,d\_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay-hbob-isol\_bob+contornoybaixo  
 k,18,d\_ldente+ldente+lrn-folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay-hbob-isol\_bob+contornoybaixo  
 k,19,d\_ldente+ldente +folgax+contornoxesq,h\_estat-folgay-2\*hbob-isol\_bob+contornoybaixo  
 k,20,d\_ldente+ldente-folgax+lrn+contornoxesq,h\_estat-folgay-2\*hbob-isol\_bob+contornoybaixo

**!Criação das áreas (indo sempre no sentido horário dos pts)**

a,1,3,4,2  
 a,3,5,6,4  
 a,2,4,8,9  
 a,4,6,7,8  
 a,9,8,11,10  
 a,8,7,12,11  
 a,15,13,14,16  
 a,19,17,18,20

ALLSEL,ALL  
 AOV LAP,ALL

**! Para sobrepor as áreas (neste caso, as áreas 7 e 8, que  
 ! são as áreas relativas aos condutores, estariam sobre a  
 ! área 6, que é a área do isolamento de ar)**

NUMMRG,ALL  
 NUMCMP,ALL  
 ALLSEL,ALL

**! Renumerar as áreas**

**! PARA CRIAR (REPRODUZIR, DUPLICAR,ETC) VÁRIAS ÁREAS E ASSIM FORMAR  
 ! TODO O ESTATOR:**

ASEL,S,,,3,8,1  
 AGEN,tot\_ran+(passo\_pol-1),ALL,,,passo\_ran,,,,,0  
 ALLSEL,ALL  
 NUMMRG,ALL  
 ALLSEL,ALL

**! Seleciona as áreas 3 a 8 com passo de 1**

ASEL,S,,,3,4,1  
 AGEN,2,ALL,,,((passo\_ran)\*(tot\_ran+passo\_pol-1)),,,,0  
 ALLSEL,ALL  
 NUMMRG,ALL

**! Seleciona as áreas 3 a 4 com passo de 1**

ALLSEL,ALL

ASEL,S,,,1,2,1 ! Seleciona as áreas 1 a 2 com passo de 1  
AGEN,2,ALL,,((passo\_ran)\*(tot\_ran+passo\_pol-1)+ldente+d\_ldente),,,,0  
ALLSEL,ALL  
NUMMRG,ALL  
ALLSEL,ALL

NUMCMP,ALL

\*get,nkp,kp,,num,max

k,NKP+1,contornoxesq-laldiferenca,h\_estat+gap+contornoybaixo  
k,nkp+2,contornoxesq-  
laldiferenca,h\_estat+gap+hdente\_estat+hplaca+hran\_secund+contornoybaixo

k,nkp+3,((passo\_ran)\*(tot\_ran+passo\_pol-  
1)+lran+2\*d\_ldente)+contornoxesq+laldiferenca,h\_estat+gap+hdente\_secund+hplaca+hran\_secund  
+contornoybaixo  
k,nkp+4,((passo\_ran)\*(tot\_ran+passo\_pol-  
1)+lran+2\*d\_ldente)+contornoxesq+laldiferenca,h\_estat+gap+contornoybaixo  
a,NKP+1,NKP+2,NKP+3,NKP+4

! Primeiro ponto para fazer o retangulo menor

k,nkp+5,contornoxesq-laldiferenca+lzinho/2+deltal,h\_estat+gap+contornoybaixo

! Segundo ponto para fazer o retângulo menor

k,nkp+6,contornoxesq-laldiferenca+lzinho/2+deltal,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo

! Terceiro ponto para fazer o retângulo menor

k,nkp+7,contornoxesq-  
laldiferenca+lzinho/2+deltal+ldente\_secund,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo

! Quarto ponto para fazer o retângulo menor

k,nkp+8,contornoxesq-laldiferenca+lzinho/2+deltal+ldente\_secund,h\_estat+gap+contornoybaixo  
a,nkp+5,nkp+6,nkp+7,nkp+8

! Primeiro ponto para fazer o retângulo maior

k,nkp+9,contornoxesq-laldiferenca+lzinho/2,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo

! Segundo ponto para fazer o retângulo maior

k,nkp+10,contornoxesq-  
laldiferenca+lzinho/2,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo+hran\_secund

! Terceiro ponto para fazer o retângulo maior

k,nkp+11,contornoxesq-  
laldiferenca+lzinho/2+lran\_secund,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo+hran\_secund

! Quarto ponto para fazer o retângulo maior

k,nkp+12,contornoxesq-  
laldiferenca+lzinho/2+lran\_secund,h\_estat+gap+hdente\_secund+contornoybaixo  
a,nkp+9,nkp+10,nkp+11,nkp+12

ALLSEL,ALL

AOVLAP,ALL ! Para sobrepor as áreas (neste caso, as áreas 7 e 8, que são as áreas  
! relativas aos condutores, estariam sobre a área 6, que é a área do  
! isolamento de ar).

NUMMRG,ALL

NUMCMP,ALL ! Renumeras as áreas

ALLSEL,ALL

NUMCMP,ALL

\*get,areamax1,area,,num,max  
ASEL,S,,,373,374,1

! Seleciona as áreas 3 a 4 com passo de 1

```

AGEN,ran_secund,ALL,,,21.6e-3,,,,,0
ALLSEL,ALL
NUMMRG,ALL
ALLSEL,ALL

```

```

AOVLAP,ALL
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL      ! Renumera as áreas
ALLSEL,ALL

```

```

NUMCMP,ALL

```

**!PARA CRIAR o contorno**

```

*get,nkp2,kp,,num,max

```

```

k,nkp2+1,0,0
k,nkp2+2,0,contornoybaixo+contornoycima+h_estat+gap+hal
k,nkp2+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_Idente)+contornoxesq+contornoxd,contornoybaixo+contornoycima+h_estat+gap+hal
k,nkp2+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-1)+Iran+2*d_Idente)+contornoxesq+contornoxd,0

```

```

a,nkp2+1,nkp2+2,nkp2+3,nkp2+4

```

```

ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL      ! Para sobreporas áreas
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL      ! Renumera as áreas
ALLSEL,ALL

```

**!!!Para criar a área onde estará o gap (recurso para posteriormente refinar a malha neste lugar):**

```

*GET,nkp3,kp,,num,max
k,nkp3+1,0,contornoybaixo+h_estat
k,nkp3+2,0,contornoybaixo+h_estat+gap
k,nkp3+3,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_Idente)+contornoxd+contornoxesq,contornoybaixo+h_estat+gap
k,nkp3+4,((passo_ran)*(tot_ran+passo_pol-
1)+Iran+2*d_Idente)+contornoxd+contornoxesq,contornoybaixo+h_estat

```

```

a,nkp3+1,nkp3+2,nkp3+3,nkp3+4

```

```

ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL      ! Para sobrepor as áreas (neste caso, as áreas 7 e 8 estariam sobre a área 6)
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL      ! Renumera as áreas
ALLSEL,ALL

```

**!!!!!! Atribuição das características eletricas do enrolamento do estator(arquivo corrente): !!!!!**

```

*DIM,corr,ARRAY,var1,6 !6 PQ SÃO 6 COLUNAS(3 fases: a,-b,c e -a,b,-c)
*CREATE,ansuitmp
*VREAD,corr(1,1),'corrente6_Maglev','txt','C:\Motor_ANSYS_BELA',JK,6,var1,1,,
(6f5.0)
*END
/INPUT,ansuitmp
ALLSEL,ALL

```

**!CRIAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA USAR NO "aatt"**

```

R,1,(Iran-(2*folgax))*hbob,nespira,profund,-1,enchim    ! O -1 é pq o ansys interpreta sentido
                                                         ! "entrando" como negativo e sentido
                                                         ! "saindo" como positivo.

REAL,1
R,2,(Iran-(2*folgax))*hbob,nespira,profund,+1,enchim
REAL,2

!*****
!
!                               Definição dos Materiais
!*****
/PREP7
! @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ Atribuição de cobre aos enrolamentos @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @

ASEL,S,,,corr(1,1)    ! O arquivo corrente nada mais é do que a divisão do número das áreas
                     ! correspondentes aos enrolamentos de cobre pelas fases a,b,c e -a,-b e -c,
                     !na ordem: a,-b,c,-a,b,-c

*DO,COL,1,6,2
  *DO,FILA,1,var1
    ASEL,a,,,corr(FILA,COL)
  *ENDDO
*ENDDO
AATT,2,,2
ALLSEL,ALL

ASEL,S,,,corr(1,2)
*DO,COL,2,6,2
  *DO,FILA,1,var1
    ASEL,a,,,corr(FILA,COL)
  *ENDDO
*ENDDO
AATT,2,,2
ALLSEL,ALL

! @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ Atribuição do aluminio @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @
*get,areamax2,area,,num,max
ASEL,S,,,374,512,2    !VERIFICAR A NUMERAÇÃO DESSAS ÁREAS TODA VEZ QUE FOR
                     ! RODADO O PROGRAMA.

AATT,4,,5
ALLSEL,ALL

! @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ Atribuição do ar @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @ @
LSEL,S,EXT
ASLL,S
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL
ASEL,S,,,8,368,6
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL
ASEL,S,,,7,43,6
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL

ASEL,S,,,330,366,6
AATT,3,,1
ALLSEL,ALL

ASEL,S,,,373,511,2
AATT,3,,1

```



```
! @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ Atribuição do ferro @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@
asel,all
asel,u,MAT,,2      ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 2
ASEL,U,MAT,,3      ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 3
ASEL,U,MAT,,4      ! APAGA TODAS AS ÁREAS QUE NÃO SÃO MATERIAL 4
AATT,1,,1          !ATRIBUI O MATERIAL 1, SEM REAL CTE, TIPO 1, A TODAS
                   !ESSASÁ REAS QUE NÃO TINHAM ELEMENTO

ALLSEL,ALL
```

!!!!!!      **GAP**      !!!!!!

!!!!!!! parte de ferro no estator !!!!!!!

```
asel,s,,,366,368,1
lsla,s
lesize,all,2e-3
amesh,all
allsel,all
```

```

asel,s,,,1,2,1
asel,a,,,371,372,1
lsla,s
lesize,all,2e-3
amesh,all
allsel,all

```

```
asel,s,,,5,365
lsla,s
lesize,all,2e-3
amesh,all
allsel,all
```

!!!!!!! parte de ar no estator !!!!!!!

```
asel,s,,,8,368,6
lsla,s
lesize,all,2e-3
amesh,all
allsel,all
```

!!!!!! contorno externo \_ parte inferior !!!!!!

```
asel,s,,,515
lsla,s
lesize,all,10e-3
amesh,all
allsel,all
```

!!!!! condutores !!!!!

asel,s,,,6,366,6  
asel,a,,,7,367,6  
lsla,s  
lesize,all,2e-3  
amesh,all  
allsel,all

!!!!! barras da gaiola !!!!!

asel,s,,,374,512,2  
lsla,s  
lesize,all,2e-3  
amesh,all  
allsel,all

!!!!! partes de ar na gaiola !!!!!

asel,s,,,373,511,2  
lsla,s  
lesize,all,4e-3  
amesh,all  
allsel,all

!!!!! parte de ferro na gaiola !!!!

asel,s,,,513  
lsla,s  
lesize,all,2e-3  
amesh,all  
allsel,all

!!!!!! contorno externo \_ parte superior !!!!!

asel,s,,,514  
lsla,s  
lesize,all,2e-3  
amesh,all  
allsel,all

## SEGUNDA ROTINA :

*Atribuição da condição de contorno; definição da alimentação das bobinas de fases a, b e c do enrolamento de armadura; acoplamento das áreas preenchidas pelas espiras; determinação de como é feito o enrolamento de armadura (ordem em que as áreas são conectadas entre si); alimentação de tensão; inserção das indutâncias de cabeça de bobina para cada uma das fases.*

/PREP7

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! PARA OS ENROLAMENTOS DO ESTATOR !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

R,1,(Iran-(2\*folgax))\*hbob,nespira,profund,-1,enchim !

REAL,1

R,2,(Iran-(2\*folgax))\*hbob,nespira,profund,+1,enchim

REAL,2

! \*\* Para clarear tds as áreas da fase a (vide arquivo correntes..tentar parametrizar isso depois) \*\*

ACLEAR,6,276,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,12,282,54

ACLEAR,18,288,54

ACLEAR,49,319,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,55,325,54

ACLEAR,61,331,54

! \*\*\*\*\* Para clarear tds as áreas da fase b \*\*\*\*\*

ACLEAR,24,294,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,30,300,54

ACLEAR,36,306,54

ACLEAR,67,337,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,73,343,54

ACLEAR,79,349,54

! \*\*\*\*\* Para clarear tds as áreas da fase c \*\*\*\*\*

ACLEAR,42,312,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,48,318,54

ACLEAR,54,324,54

ACLEAR,85,355,54

! Mudar essas áreas sempre de acordo com o arquivo "corrente"

ACLEAR,91,361,54

ACLEAR,97,367,54

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase a #####

!

!OBS.: Tds esses "for" com o parâmetro "var1" já estão parametrizados e não precisam ser modificados toda vez que forem feitas alterações nas características do motor

!

\*DO,II,1,VAR1

ASEL,S,,,CORR(II,1) ! (condutores da fase a, com a corrente "entrando")

AATT,2,1,2

ALLSEL,ALL

\*ENDDO

ALLSEL,ALL

\*DO,II,1,VAR1

ASEL,S,,,CORR(II,1)

```

lsla,s
  lsize,all,1e-3
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,4)  ! (condutores da fase a, com a corrente "saindo")
  AATT,2,2,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,4)
lsla,s
  lsize,all,1e-3
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase b #####
*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,2)  ! (condutores da fase b, com a corrente "saindo")
  AATT,2,2,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL
*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,2)
lsla,s
  lsize,all,1e-3
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,5)  ! (condutores da fase b, com a corrente "entrando")
  AATT,2,1,2
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
  ASEL,S,,,CORR(II,5)
lsla,s
  lsize,all,1e-3
  AMESH,ALL
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL

! ##### Para redefinir materiais, tipos e reais ctes da fase c #####

```

```

*DO,II,1,VAR1
ASEL,S,,,CORR(II,3)  ! (condutores da fase c, com a corrente "entrando")
AATT,2,1,2
ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
ASEL,S,,,CORR(II,3)
lsla,s
lesize,all,1e-3
AMESH,ALL
ALLSEL,ALL
*ENDDO

*DO,II,1,VAR1
ASEL,S,,,CORR(II,6)  ! (condutores da fase c, com a corrente "saindo")
AATT,2,2,2
ALLSEL,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

*DO,II,1,VAR1
ASEL,S,,,CORR(II,6)
lsla,s
lesize,all,1e-3
AMESH,ALL
ALLSEL,ALL
*ENDDO

ALLSEL,ALL
NUMCMP,ALL
CSYS,0
!*****
!
!           Atribuição das características elétricas,determinação dos enrolamentos
!
!*****

!+++++
!
!           Atribuição do potencial nulo à fronteira externa
!
!+++++

LSEL,S,EXT
NSLL,S
KSL,S
D,ALL,AZ,0
ALLSEL,ALL

!+++++
!
!           Criação dos nós necessários aos acoplamentos
!
!+++++
*GET,NOD,NODE,,COUNT      ! Conta o número total de nós para que, em seguida, possam ser
                           ! criados os nós através dos quais será feito o acoplamento.

ER_NOD1 = NOD+1
CSYS,1

```

```

NOD1 = NOD+1
N,NOD1,0,0
*REPEAT,3*((VAR1*2)+2+1),1 ! Repetir a criação de nós no pt (0,0) tantas vezes qt
                             ! var1*6+2*3(ou seja, o numero total de condutores +2*NUMERO
                             ! DE FASES)

*GET,ER_NOD2,NODE,,COUNT
ALLSEL,ALL
CSYS,1
*AFUN,DEG
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! FASE A !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Ver o arquivo em excel "arquivo_corrente_USAR"
! Primeira parte: condutores numerados em "rosa" no arquivo

NODE = NOD+1      !"node" é o primeiro pt criado em (0,0)

ASEL,S,,,CORR(1,1) ! Seleciona a primeira área correspondente à fase a
NSLA,S,1           ! Seleciona os nós associados à área (tanto os internos qt os de fronteira)
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX ! Poderia ser QUALQUER outro nó no interior da área. O máx é
                     ! sóporque garante que o programa pegará um dos pontos,
                     ! tambémpoderia ser o mínimo ou qualquer outro.

TYPE,3             ! Recapitulando: tipo 3 é o circuito 124, strandedcoil
R,3,1              ! Definição da real cte 3, que será associada ao elemento "circu 124,
                  !strandedcoil" para a fase a (sentidos entrando e saindo).Obs.: Esses
                  ! sentidos foram associados ÀS ÁREAS dos condutores por meio das reais
                  !ctes 1 e 2.A real cte 3 está relacionada ao elemento 3(circu 124) e não à
                  ! área à ql será acoplado

REAL,3
E,NOD+1,NODE+1,N1 ! Cria o elemento com i, j e k sendo, respectivamente,
                  ! nod+1,node+1=nod+2,nómax da área selecionada.

! OBS.: É por meio desse nó k(n1) que o circuito 124 será acoplado à área do condutor desejado.
! Olhar no help para ver como funciona ao certo,
! Mas o circu 124 é como uma fonte de corrente. Esta flui no sentido do pt "i" para o pt "j".
! O pt "k" é onde se liga esta fonte de corrente à área
!
ALLSEL,ALL

! Obs.: É fundamental nas linhas seguintes que o acoplamento seja na ordem em que serão enrola-
das
! as bobinas. Por isso essa lógica dos "for" a seguir.

*DO,FILA,2,VAR1,2
*DO,COL,4,1,-3
  NODE = NODE+1
  ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,3,1
  REAL,3
  E,NODE,NODE+1,N1
*ENDDO
*ENDDO
ALLSEL,ALL

! Segunda parte: condutores numerados em "vinho" no arquivo

*DO,FILA,VAR1-1,1,-2

```

```

*DO,COL,4,1,-3
*IF,FILA,NE,1,THEN
  NODE = NODE+1
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,3,1
  REAL,3
  E,NODE,NODE+1,N1
*ELSEIF,COL,EQ,4
  NODE = NODE+1
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
  NSLA,S,1
  *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
  TYPE,3
  R,3,1
  REAL,3
  E,NODE,NODE+1,N1
*ENDIF
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
!
!
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

Alimentação do motor

! Neste caso, estamos alimentando por meio de fonte de tensão senoidal independente, definida no  
! primeiro programa como sendo tipo 4

```

NODE = NODE+1
TYPE,8
R,4,2e-3
REAL,4
E,node+1,nod+1

```

!INDUTÂNCIA DA CABEÇA DE BOBINA

```

TYPE,4
R,5,TENSAO,0
REAL,5
E,NODE+1,NODE,NODE+2
ALLSEL,ALL

```

! real cte associada à fonte de tensão da fase a (módulo:tensão; fase:0°)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ----- Acoplamento dos elementos da fase a -----!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! ++++++ Acoplamento de corrente ++++++  
CPLE = 1 ! primeiro acoplamento

! Como, neste caso, os enrolamentos de mesma fase estão EM SÉRIE, o número do acoplamento de  
! corrente é o mesmo para tds eles (da mesma fase)!!!!

```

ASEL,S,,,CORR(1,1)
NSLA,S,1
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,1,4,3
ASEL,a,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,A,1
*ENDDO
*ENDDO

```

CP,CPLE,CURR,ALL  
ALLSEL,ALL

! ++++++ Acoplamento de tensão +++++

\*DO,FILA,1,VAR1,1  
\*DO,COL,1,4,3  
CPLE = CPLE+1  
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)  
NSLA,S,1  
CP,CPLE,EMF,ALL

! Como, neste caso, os enrolamentos de mesma fase estão EM  
! SÉRIE, cada um tem a sua fem!!!

ALLSEL,ALL  
\*ENDDO  
\*ENDDO

D,NODE,VOLT,0

! Atribui o potencial nulo ao terminal negativo da fonte de tensão  
! (terminal "j")

NODE = NODE+2  
ALLSEL,ALL

!! FASE B !!!

NODE = NODE+1  
NODB=NODE

ASEL,S,,,CORR(1,2)

! Seleciona o primeiro elemento da fase "-b", dado no arquivo  
! correntes, a partir do q1 será iniciado o enrolamento das bobinas  
! da fase "b"

NSLA,S,1  
\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX  
TYPE,3  
R,6,1  
REAL,6  
E,NODE+1,NODE,N1  
ALLSEL,ALL  
\*DO,FILA,2,VAR1,2  
\*DO,COL,5,2,-3  
NODE = NODE+1  
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)  
NSLA,S,1  
\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX  
TYPE,3  
R,6,1  
REAL,6  
E,NODE+1,NODE,N1  
\*ENDDO  
\*ENDDO  
ALLSEL,ALL

\*DO,FILA,(VAR1-1),1,-2  
\*DO,COL,5,2,-3  
\*IF,FILA,NE,1,THEN  
NODE = NODE+1  
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)  
NSLA,S,1  
\*GET,N1,NODE,,NUM,MAX  
TYPE,3  
R,6,1



```

        REAL,6
        E,NODE+1,NODE,N1
*ELSEIF,COL,EQ,5
        NODE = NODE+1
ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
        NSLA,S,1
        *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
        TYPE,3
        R,6,1
        REAL,6
        E,NODE+1,NODE,N1
*ENDIF
        ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ----- Acoplamento dos elementos da fase b -----!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Fonte de tensão independente:

```

NODE = NODE+1
TYPE,8
R,7,2e-3                                !INDUTÂNCIA DA CABEÇA DE BOBINA
REAL,7
E,node+1,nodb
        TYPE,4
R,8,TENSAO,-120      !real cte associada à fonte de tensão da fase a (módulo:tensão; fase:-120°)
REAL,8
E,NODE,NODE+1,NODE+2
ALLSEL,ALL

```

! ++++++ Acoplamento de corrente ++++++

```

CPLE = CPLE+1
ASEL,S,,,CORR(1,2)
NSLA,S,1
*DO,FILA,1,VAR1,1
        *DO,COL,2,5,3
ASEL,a,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,A,1
*ENDDO
*ENDDO
CP,CPLE,CURR,ALL
ALLSEL,ALL

```

! ++++++ Acoplamento de tensão ++++++

```

*GET,CPLE,ACTIVE,,CP
*DO,FILA,1,VAR1,1
        *DO,COL,2,5,3
                CPLE = CPLE+1
                ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,S,1
        CP,CPLE,EMF,ALL
        ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO

```

```

D,NODE+1,VOLT,0
NODE = NODE+2

```

```

ALLSEL,ALL

```

!! FASE C !!!

NODE = NODE+1  
NODC=NODE

```
ASEL,S,,,CORR(1,3)
NSLA,S,1
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX
TYPE,3
R,9,1
REAL,9
E,NODE,NODE+1,N1
ALLSEL,ALL
*DO,FILA,2,VAR1,2
  *DO,COL,6,3,-3
    NODE = NODE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
    NSLA,S,1
    *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
    TYPE,3
    R,9,1
    REAL,9
    E,NODE,NODE+1,N1
  *ENDDO
*ENDDO
ALLSEL,ALL
*DO,FILA,VAR1-1,1,-2
  *DO,COL,6,3,-3
    *IF,FILA,NE,1,THEN
      NODE = NODE+1
      ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
      NSLA,S,1
      *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
      TYPE,3
      R,9,1
      REAL,9
      E,NODE,NODE+1,N1
    *ELSEIF,COL,EQ,6
      NODE = NODE+1
      ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
      NSLA,S,1
      *GET,N1,NODE,,NUM,MAX
      TYPE,3
      R,9,1
      REAL,9
      E,NODE,NODE+1,N1
    *ENDIF
  ALLSEL,ALL
*ENDDO
*ENDDO
```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! ----- Acoplamento dos elementos da fase C -----!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Fonte de tensão independente:

NODE = NODE+1

TYPE,8

R,10,2e-3

!INDUTÂNCIA DA CABEÇA DE BOBINA

REAL,10

E,node+1,nodc

TYPE,4

R,11,TENSAO,120

!real cte associada à fonte de tensão da fase a (módulo:tensão; fase:120°)

REAL,11

```
E,NODE+1,NODE,NODE+2
ALLSEL,ALL
```

```
! ++++++ Acoplamento de corrente ++++++ !
```

```
CPLE = CPLE+1
ASEL,S,,,CORR(1,3)
NSLA,S,1
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,3,6,3
ASEL,a,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,A,1
  *ENDDO
*ENDDO
CP,CPLE,CURR,ALL
ALLSEL,ALL
```

```
! ++++++ Acoplamento de tensão ++++++ !
```

```
*GET,CPLE,ACTIVE,,CP
*DO,FILA,1,VAR1,1
  *DO,COL,3,6,3
    CPLE = CPLE+1
    ASEL,S,,,CORR(FILA,COL)
NSLA,S,1
  CP,CPLE,EMF,ALL
  ALLSEL,ALL
  *ENDDO
*ENDDO
D,NODE,VOLT,0
ALLSEL,ALL
```

### TERCEIRA ROTINA :

*Solução para análise harmônica bidimensional e cálculo das forças via Tensores de Maxwell e Trabalho Virtual a partir da seleção da região de interesse para o cálculo de força, para cada valor de escorregamento. Conexão das barras de alumínio do secundário por meio de uma resistência da ordem de  $10^{-6}$ , equivalente a curto-circuito.*

/prep7

esel,s,mat,,4

\*get,nelem,elem,,count

allsel,all

jj=0

R,12,lran\_secund\*hran\_secund,,profund,,1 **!!!!R, NUMERAÇÃO, ÁREA,NÚMERO DE  
! ESPIRAS, PROFUNDIDADE (3D), DIREÇÃO DA CORRENTE NA BARRA, ENCHIMENTO  
! DA RANHURA. OBS.: neste caso, a direção da corrente na barra é para deixar livre, sem definir  
! se o sentido é entrando ou saindo, porque na vdd não está sendo alimentada, mas induzida  
! corrente**

REAL,12

RESET

/PREP7

ASEL,S,MAT,,4

ACLEAR,ALL

MPDELE,RSVX,4

MP,MURX,4,1

**! PERMEABILIDADE DO CARRO**

MP,RSVX,4,(2.82E-8)/0.6

**!DIVIDE-SE A RESISTIVIDADE DO ALUMÍNIO PELO !ES-**

**CORREGAMENTO, PARA SIMULAR A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA SECUNDÁRIA**

AATT,4,12,5

lsla,s

lesize,all,0.5e-3

amesh,all

allsel,all

LSEL,S,EXT

NSLL,S

KSLI,S

D,ALL,AZ,0

ALLSEL,ALL

asel,s,,,513

asel,a,,,374,512,2

esla,s

nsle,s

aplot

CM,arm,ELEM

FMAGBC,'ARM'

**!!!Seleciona o secundário para o cálculo da força magnética**

allsel,all

asel,s,,,374

esla,s

nsle,s

\*get,no374,node,,num,max

allsel,all

asel,s,,,376

```

esla,s
nsle,s
*get,no376,node,,num,max
asel,s,,,378
esla,s
nsle,s
*get,no378,node,,num,max
asel,s,,,380
esla,s
nsle,s
*get,no380,node,,num,max
asel,s,,,382
esla,s
nsle,s
*get,no382,node,,num,max
asel,s,,,384
esla,s
nsle,s
*get,no384,node,,num,max
asel,s,,,386
esla,s
nsle,s
*get,no386,node,,num,max
asel,s,,,388
esla,s
nsle,s
*get,no388,node,,num,max
asel,s,,,390
esla,s
nsle,s
*get,no390,node,,num,max
asel,s,,,392
esla,s
nsle,s
*get,no392,node,,num,max
asel,s,,,394
esla,s
nsle,s
*get,no394,node,,num,max
asel,s,,,396
esla,s
nsle,s
*get,no396,node,,num,max
asel,s,,,398
esla,s
nsle,s
*get,no398,node,,num,max
asel,s,,,400
esla,s
nsle,s
*get,no400,node,,num,max
asel,s,,,402
esla,s
nsle,s
*get,no402,node,,num,max
asel,s,,,404
esla,s
nsle,s
*get,no404,node,,num,max
asel,s,,,406

```

```

esla,s
nsle,s
*get,no406,node,,num,max
asel,s,,,408
esla,s
nsle,s
*get,no408,node,,num,max
asel,s,,,410
esla,s
nsle,s
*get,no410,node,,num,max
asel,s,,,412
esla,s
nsle,s
*get,no412,node,,num,max
asel,s,,,414
esla,s
nsle,s
*get,no414,node,,num,max
asel,s,,,416
esla,s
nsle,s
*get,no416,node,,num,max
asel,s,,,418
esla,s
nsle,s
*get,no418,node,,num,max
asel,s,,,420
esla,s
nsle,s
*get,no420,node,,num,max
asel,s,,,422
esla,s
nsle,s
*get,no422,node,,num,max
asel,s,,,424
esla,s
nsle,s
*get,no424,node,,num,max
asel,s,,,426
esla,s
nsle,s
*get,no426,node,,num,max
asel,s,,,428
esla,s
nsle,s
*get,no428,node,,num,max
asel,s,,,430
esla,s
nsle,s
*get,no430,node,,num,max
asel,s,,,432
esla,s
nsle,s
*get,no432,node,,num,max
asel,s,,,434
esla,s
nsle,s
*get,no434,node,,num,max
asel,s,,,436

```

```

esla,s
nsle,s
*get,no436,node,,num,max
asel,s,,,438
esla,s
nsle,s
*get,no438,node,,num,max
asel,s,,,440
esla,s
nsle,s
*get,no440,node,,num,max
asel,s,,,442
esla,s
nsle,s
*get,no442,node,,num,max
asel,s,,,444
esla,s
nsle,s
*get,no444,node,,num,max
asel,s,,,446
esla,s
nsle,s
*get,no446,node,,num,max
asel,s,,,448
esla,s
nsle,s
*get,no448,node,,num,max
asel,s,,,450
esla,s
nsle,s
*get,no450,node,,num,max
asel,s,,,452
esla,s
nsle,s
*get,no452,node,,num,max
asel,s,,,454
esla,s
nsle,s
*get,no454,node,,num,max
asel,s,,,456
esla,s
nsle,s
*get,no456,node,,num,max
asel,s,,,458
esla,s
nsle,s
*get,no458,node,,num,max
asel,s,,,460
esla,s
nsle,s
*get,no460,node,,num,max
asel,s,,,462
esla,s
nsle,s
*get,no462,node,,num,max
asel,s,,,464
esla,s
nsle,s
*get,no464,node,,num,max
asel,s,,,466

```

```

esla,s
nsle,s
*get,no466,node,,num,max
asel,s,,,468
esla,s
nsle,s
*get,no468,node,,num,max
asel,s,,,470
esla,s
nsle,s
*get,no470,node,,num,max
asel,s,,,472
esla,s
nsle,s
*get,no472,node,,num,max
asel,s,,,474
esla,s
nsle,s
*get,no474,node,,num,max
asel,s,,,476
esla,s
nsle,s
*get,no476,node,,num,max
asel,s,,,478
esla,s
nsle,s
*get,no478,node,,num,max
asel,s,,,480
esla,s
nsle,s
*get,no480,node,,num,max
asel,s,,,482
esla,s
nsle,s
*get,no482,node,,num,max
asel,s,,,484
esla,s
nsle,s
*get,no484,node,,num,max
asel,s,,,486
esla,s
nsle,s
*get,no486,node,,num,max
asel,s,,,488
esla,s
nsle,s
*get,no488,node,,num,max
asel,s,,,490
esla,s
nsle,s
*get,no490,node,,num,max
asel,s,,,492
esla,s
nsle,s
*get,no492,node,,num,max
asel,s,,,494
esla,s
nsle,s
*get,no494,node,,num,max
asel,s,,,496

```



```

esla,s
nsle,s
*get,no496,node,,num,max
asel,s,,,498
esla,s
nsle,s
*get,no498,node,,num,max
asel,s,,,500
esla,s
nsle,s
*get,no500,node,,num,max
asel,s,,,502
esla,s
nsle,s
*get,no502,node,,num,max
asel,s,,,504
esla,s
nsle,s
*get,no504,node,,num,max
asel,s,,,506
esla,s
nsle,s
*get,no506,node,,num,max
asel,s,,,508
esla,s
nsle,s
*get,no508,node,,num,max
asel,s,,,510
esla,s
nsle,s
*get,no510,node,,num,max
asel,s,,,512
esla,s
nsle,s
*get,no512,node,,num,max
allsel,all
nplot
gplot
csys,0
! CRIA PONTOS PARA POSICIONAR AS BOBINAS
*GET,ntotal,NODE,,num,max

```

```

PONTO1=0.1
PONTO2=0.2
PASSO=0.01
N,ntotal+1,PONTO1,0
N,ntotal+2,PONTO2,0
N,ntotal+3,PONTO1,PASSO
N,ntotal+4,PONTO2,PASSO
N,ntotal+5,PONTO1,2*PASSO
N,ntotal+6,PONTO2,2*PASSO
N,ntotal+7,PONTO1,3*PASSO
N,ntotal+8,PONTO2,3*PASSO
N,ntotal+9,PONTO1,4*PASSO
N,ntotal+10,PONTO2,4*PASSO
N,ntotal+11,PONTO1,5*PASSO
N,ntotal+12,PONTO2,5*PASSO
N,ntotal+13,PONTO1,6*PASSO
N,ntotal+14,PONTO2,6*PASSO
N,ntotal+15,PONTO1,7*PASSO

```

N,ntotal+16,PONTO2,7\*PASSO  
N,ntotal+17,PONTO1,8\*PASSO  
N,ntotal+18,PONTO2,8\*PASSO  
N,ntotal+19,PONTO1,9\*PASSO  
N,ntotal+20,PONTO2,9\*PASSO  
N,ntotal+21,PONTO1,10\*PASSO  
N,ntotal+22,PONTO2,10\*PASSO  
N,ntotal+23,PONTO1,11\*PASSO  
N,ntotal+24,PONTO2,11\*PASSO  
N,ntotal+25,PONTO1,12\*PASSO  
N,ntotal+26,PONTO2,12\*PASSO  
N,ntotal+27,PONTO1,13\*PASSO  
N,ntotal+28,PONTO2,13\*PASSO  
N,ntotal+29,PONTO1,14\*PASSO  
N,ntotal+30,PONTO2,14\*PASSO  
N,ntotal+31,PONTO1,15\*PASSO  
N,ntotal+32,PONTO2,15\*PASSO  
N,ntotal+33,PONTO1,16\*PASSO  
N,ntotal+34,PONTO2,16\*PASSO  
N,ntotal+35,PONTO1,17\*PASSO  
N,ntotal+36,PONTO2,17\*PASSO  
N,ntotal+37,PONTO1,18\*PASSO  
N,ntotal+38,PONTO2,18\*PASSO  
N,ntotal+39,PONTO1,19\*PASSO  
N,ntotal+40,PONTO2,19\*PASSO  
N,ntotal+41,PONTO1,20\*PASSO  
N,ntotal+42,PONTO2,20\*PASSO  
N,ntotal+43,PONTO1,21\*PASSO  
N,ntotal+44,PONTO2,21\*PASSO  
N,ntotal+45,PONTO1,22\*PASSO  
N,ntotal+46,PONTO2,22\*PASSO  
N,ntotal+47,PONTO1,23\*PASSO  
N,ntotal+48,PONTO2,23\*PASSO  
N,ntotal+49,PONTO1,24\*PASSO  
N,ntotal+50,PONTO2,24\*PASSO  
N,ntotal+51,PONTO1,25\*PASSO  
N,ntotal+52,PONTO2,25\*PASSO  
N,ntotal+53,PONTO1,26\*PASSO  
N,ntotal+54,PONTO2,26\*PASSO  
N,ntotal+55,PONTO1,27\*PASSO  
N,ntotal+56,PONTO2,27\*PASSO  
N,ntotal+57,PONTO1,28\*PASSO  
N,ntotal+58,PONTO2,28\*PASSO  
N,ntotal+59,PONTO1,29\*PASSO  
N,ntotal+60,PONTO2,29\*PASSO  
N,ntotal+61,PONTO1,30\*PASSO  
N,ntotal+62,PONTO2,30\*PASSO  
N,ntotal+63,PONTO1,31\*PASSO  
N,ntotal+64,PONTO2,31\*PASSO  
N,ntotal+65,PONTO1,32\*PASSO  
N,ntotal+66,PONTO2,32\*PASSO  
N,ntotal+67,PONTO1,33\*PASSO  
N,ntotal+68,PONTO2,33\*PASSO  
N,ntotal+69,PONTO1,34\*PASSO  
N,ntotal+70,PONTO2,34\*PASSO  
N,ntotal+71,PONTO1,35\*PASSO  
N,ntotal+72,PONTO2,35\*PASSO  
N,ntotal+73,PONTO1,36\*PASSO  
N,ntotal+74,PONTO2,36\*PASSO  
N,ntotal+75,PONTO1,37\*PASSO

N,ntotal+76,PONTO2,37\*PASSO  
 N,ntotal+77,PONTO1,38\*PASSO  
 N,ntotal+78,PONTO2,38\*PASSO  
 N,ntotal+79,PONTO1,39\*PASSO  
 N,ntotal+80,PONTO2,39\*PASSO  
 N,ntotal+81,PONTO1,40\*PASSO  
 N,ntotal+82,PONTO2,40\*PASSO  
 N,ntotal+83,PONTO1,41\*PASSO  
 N,ntotal+84,PONTO2,41\*PASSO  
 N,ntotal+85,PONTO1,42\*PASSO  
 N,ntotal+86,PONTO2,42\*PASSO  
 N,ntotal+87,PONTO1,43\*PASSO  
 N,ntotal+88,PONTO2,43\*PASSO  
 N,ntotal+89,PONTO1,44\*PASSO  
 N,ntotal+90,PONTO2,44\*PASSO  
 N,ntotal+91,PONTO1,45\*PASSO  
 N,ntotal+92,PONTO2,45\*PASSO  
 N,ntotal+93,PONTO1,46\*PASSO  
 N,ntotal+94,PONTO2,46\*PASSO  
 N,ntotal+95,PONTO1,47\*PASSO  
 N,ntotal+96,PONTO2,47\*PASSO  
 N,ntotal+97,PONTO1,48\*PASSO  
 N,ntotal+98,PONTO2,48\*PASSO  
 N,ntotal+99,PONTO1,49\*PASSO  
 N,ntotal+100,PONTO2,49\*PASSO  
 N,ntotal+101,PONTO1,50\*PASSO  
 N,ntotal+102,PONTO2,50\*PASSO  
 N,ntotal+103,PONTO1,51\*PASSO  
 N,ntotal+104,PONTO2,51\*PASSO  
 N,ntotal+105,PONTO1,52\*PASSO  
 N,ntotal+106,PONTO2,52\*PASSO  
 N,ntotal+107,PONTO1,53\*PASSO  
 N,ntotal+108,PONTO2,53\*PASSO  
 N,ntotal+109,PONTO1,54\*PASSO  
 N,ntotal+110,PONTO2,54\*PASSO  
 N,ntotal+111,PONTO1,55\*PASSO  
 N,ntotal+112,PONTO2,55\*PASSO  
 N,ntotal+113,PONTO1,56\*PASSO  
 N,ntotal+114,PONTO2,56\*PASSO  
 N,ntotal+115,PONTO1,57\*PASSO  
 N,ntotal+116,PONTO2,57\*PASSO  
 N,ntotal+117,PONTO1,58\*PASSO  
 N,ntotal+118,PONTO2,58\*PASSO  
 N,ntotal+119,PONTO1,59\*PASSO  
 N,ntotal+120,PONTO2,59\*PASSO  
 N,ntotal+121,PONTO1,60\*PASSO  
 N,ntotal+122,PONTO2,60\*PASSO  
 N,ntotal+123,PONTO1,61\*PASSO  
 N,ntotal+124,PONTO2,61\*PASSO  
 N,ntotal+125,PONTO1,62\*PASSO  
 N,ntotal+126,PONTO2,62\*PASSO  
 N,ntotal+127,PONTO1,63\*PASSO  
 N,ntotal+128,PONTO2,63\*PASSO  
 N,ntotal+129,PONTO1,64\*PASSO  
 N,ntotal+130,PONTO2,64\*PASSO  
 N,ntotal+131,PONTO1,65\*PASSO  
 N,ntotal+132,PONTO2,65\*PASSO  
 N,ntotal+133,PONTO1,66\*PASSO  
 N,ntotal+134,PONTO2,66\*PASSO  
 N,ntotal+135,PONTO1,67\*PASSO

N,ntotal+136,PONTO2,67\*PASSO  
N,ntotal+137,PONTO1,68\*PASSO  
N,ntotal+138,PONTO2,68\*PASSO  
N,ntotal+139,PONTO1,69\*PASSO  
N,ntotal+140,PONTO2,69\*PASSO  
allsel,all

**! Para conectar as bobinas às barras do rotor**

type,6  
R,13,1  
REAL,13

E,ntotal+1,ntotal+2,no374  
E,ntotal+3,ntotal+4,no376  
E,ntotal+5,ntotal+6,no378  
E,ntotal+7,ntotal+8,no380  
E,ntotal+9,ntotal+10,no382  
E,ntotal+11,ntotal+12,no384  
E,ntotal+13,ntotal+14,no386  
E,ntotal+15,ntotal+16,no388  
E,ntotal+17,ntotal+18,no390  
E,ntotal+19,ntotal+20,no392  
E,ntotal+21,ntotal+22,no394  
E,ntotal+23,ntotal+24,no396  
E,ntotal+25,ntotal+26,no398  
E,ntotal+27,ntotal+28,no400  
E,ntotal+29,ntotal+30,no402  
E,ntotal+31,ntotal+32,no404  
E,ntotal+33,ntotal+34,no406  
E,ntotal+35,ntotal+36,no408  
E,ntotal+37,ntotal+38,no410  
E,ntotal+39,ntotal+40,no412  
E,ntotal+41,ntotal+42,no414  
E,ntotal+43,ntotal+44,no416  
E,ntotal+45,ntotal+46,no418  
E,ntotal+47,ntotal+48,no420  
E,ntotal+49,ntotal+50,no422  
E,ntotal+51,ntotal+52,no424  
E,ntotal+53,ntotal+54,no426  
E,ntotal+55,ntotal+56,no428  
E,ntotal+57,ntotal+58,no430  
E,ntotal+59,ntotal+60,no432  
E,ntotal+61,ntotal+62,no434  
E,ntotal+63,ntotal+64,no436  
E,ntotal+65,ntotal+66,no438  
E,ntotal+67,ntotal+68,no440  
E,ntotal+69,ntotal+70,no442  
E,ntotal+71,ntotal+72,no444  
E,ntotal+73,ntotal+74,no446  
E,ntotal+75,ntotal+76,no448  
E,ntotal+77,ntotal+78,no450  
E,ntotal+79,ntotal+80,no452  
E,ntotal+81,ntotal+82,no454  
E,ntotal+83,ntotal+84,no456  
E,ntotal+85,ntotal+86,no458  
E,ntotal+87,ntotal+88,no460  
E,ntotal+89,ntotal+90,no462  
E,ntotal+91,ntotal+92,no464  
E,ntotal+93,ntotal+94,no466  
E,ntotal+95,ntotal+96,no468

E,ntotal+97,ntotal+98,no470  
 E,ntotal+99,ntotal+100,no472  
 E,ntotal+101,ntotal+102,no474  
 E,ntotal+103,ntotal+104,no476  
 E,ntotal+105,ntotal+106,no478  
 E,ntotal+107,ntotal+108,no480  
 E,ntotal+109,ntotal+110,no482  
 E,ntotal+111,ntotal+112,no484  
 E,ntotal+113,ntotal+114,no486  
 E,ntotal+115,ntotal+116,no488  
 E,ntotal+117,ntotal+118,no490  
 E,ntotal+119,ntotal+120,no492  
 E,ntotal+121,ntotal+122,no494  
 E,ntotal+123,ntotal+124,no496  
 E,ntotal+125,ntotal+126,no498  
 E,ntotal+127,ntotal+128,no500  
 E,ntotal+129,ntotal+130,no502  
 E,ntotal+131,ntotal+132,no504  
 E,ntotal+133,ntotal+134,no506  
 E,ntotal+135,ntotal+136,no508  
 E,ntotal+137,ntotal+138,no510  
 E,ntotal+139,ntotal+140,no512

**! Para criar e conectar o resistor entre as barras da gaiola**

TYPE,7

R,14,0.00001

**!Resistor para ligar as barras de alumínio**

REAL,11

E,ntotal+1,ntotal+3  
 E,ntotal+3,ntotal+5  
 E,ntotal+5,ntotal+7  
 E,ntotal+7,ntotal+9  
 E,ntotal+9,ntotal+11  
 E,ntotal+11,ntotal+13  
 E,ntotal+13,ntotal+15  
 E,ntotal+15,ntotal+17  
 E,ntotal+17,ntotal+19  
 E,ntotal+19,ntotal+21  
 E,ntotal+21,ntotal+23  
 E,ntotal+23,ntotal+25  
 E,ntotal+25,ntotal+27  
 E,ntotal+27,ntotal+29  
 E,ntotal+29,ntotal+31  
 E,ntotal+31,ntotal+33  
 E,ntotal+33,ntotal+35  
 E,ntotal+35,ntotal+37  
 E,ntotal+37,ntotal+39  
 E,ntotal+39,ntotal+41  
 E,ntotal+41,ntotal+43  
 E,ntotal+43,ntotal+45  
 E,ntotal+45,ntotal+47  
 E,ntotal+47,ntotal+49  
 E,ntotal+49,ntotal+51  
 E,ntotal+51,ntotal+53  
 E,ntotal+53,ntotal+55  
 E,ntotal+55,ntotal+57  
 E,ntotal+57,ntotal+59  
 E,ntotal+59,ntotal+61  
 E,ntotal+61,ntotal+63  
 E,ntotal+63,ntotal+65  
 E,ntotal+65,ntotal+67

E,ntotal+67,ntotal+69

E,ntotal+1+68,ntotal+3+68  
E,ntotal+3+68,ntotal+5+68  
E,ntotal+5+68,ntotal+7+68  
E,ntotal+7+68,ntotal+9+68  
E,ntotal+9+68,ntotal+11+68  
E,ntotal+11+68,ntotal+13+68  
E,ntotal+13+68,ntotal+15+68  
E,ntotal+15+68,ntotal+17+68  
E,ntotal+17+68,ntotal+19+68  
E,ntotal+19+68,ntotal+21+68  
E,ntotal+21+68,ntotal+23+68  
E,ntotal+23+68,ntotal+25+68  
E,ntotal+25+68,ntotal+27+68  
E,ntotal+27+68,ntotal+29+68  
E,ntotal+29+68,ntotal+31+68  
E,ntotal+31+68,ntotal+33+68  
E,ntotal+33+68,ntotal+35+68  
E,ntotal+35+68,ntotal+37+68  
E,ntotal+37+68,ntotal+39+68  
E,ntotal+39+68,ntotal+41+68  
E,ntotal+41+68,ntotal+43+68  
E,ntotal+43+68,ntotal+45+68  
E,ntotal+45+68,ntotal+47+68  
E,ntotal+47+68,ntotal+49+68  
E,ntotal+49+68,ntotal+51+68  
E,ntotal+51+68,ntotal+53+68  
E,ntotal+53+68,ntotal+55+68  
E,ntotal+55+68,ntotal+57+68  
E,ntotal+57+68,ntotal+59+68  
E,ntotal+59+68,ntotal+61+68  
E,ntotal+61+68,ntotal+63+68  
E,ntotal+63+68,ntotal+65+68  
E,ntotal+65+68,ntotal+67+68  
E,ntotal+67+68,ntotal+69+68  
E,ntotal+69+68,ntotal+71+68  
allsel,all

E,ntotal+2,ntotal+4  
E,ntotal+4,ntotal+6  
E,ntotal+6,ntotal+8  
E,ntotal+8,ntotal+10  
E,ntotal+10,ntotal+12  
E,ntotal+12,ntotal+14  
E,ntotal+14,ntotal+16  
E,ntotal+16,ntotal+18  
E,ntotal+18,ntotal+20  
E,ntotal+20,ntotal+22  
E,ntotal+22,ntotal+24  
E,ntotal+24,ntotal+26  
E,ntotal+26,ntotal+28  
E,ntotal+28,ntotal+30  
E,ntotal+30,ntotal+32  
E,ntotal+32,ntotal+34  
E,ntotal+34,ntotal+36  
E,ntotal+36,ntotal+38  
E,ntotal+38,ntotal+40  
E,ntotal+40,ntotal+42  
E,ntotal+42,ntotal+44

E,ntotal+44,ntotal+46  
 E,ntotal+46,ntotal+48  
 E,ntotal+48,ntotal+50  
 E,ntotal+50,ntotal+52  
 E,ntotal+52,ntotal+54  
 E,ntotal+54,ntotal+56  
 E,ntotal+56,ntotal+58  
 E,ntotal+58,ntotal+60  
 E,ntotal+60,ntotal+62  
 E,ntotal+62,ntotal+64  
 E,ntotal+64,ntotal+66  
 E,ntotal+66,ntotal+68  
 E,ntotal+68,ntotal+70  
 allsel,all

E,ntotal+2+68,ntotal+4+68  
 E,ntotal+4+68,ntotal+6+68  
 E,ntotal+6+68,ntotal+8+68  
 E,ntotal+8+68,ntotal+10+68  
 E,ntotal+10+68,ntotal+12+68  
 E,ntotal+12+68,ntotal+14+68  
 E,ntotal+14+68,ntotal+16+68  
 E,ntotal+16+68,ntotal+18+68  
 E,ntotal+18+68,ntotal+20+68  
 E,ntotal+20+68,ntotal+22+68  
 E,ntotal+22+68,ntotal+24+68  
 E,ntotal+24+68,ntotal+26+68  
 E,ntotal+26+68,ntotal+28+68  
 E,ntotal+28+68,ntotal+30+68  
 E,ntotal+30+68,ntotal+32+68  
 E,ntotal+32+68,ntotal+34+68  
 E,ntotal+34+68,ntotal+36+68  
 E,ntotal+36+68,ntotal+38+68  
 E,ntotal+38+68,ntotal+40+68  
 E,ntotal+40+68,ntotal+42+68  
 E,ntotal+42+68,ntotal+44+68  
 E,ntotal+44+68,ntotal+46+68  
 E,ntotal+46+68,ntotal+48+68  
 E,ntotal+48+68,ntotal+50+68  
 E,ntotal+50+68,ntotal+52+68  
 E,ntotal+52+68,ntotal+54+68  
 E,ntotal+54+68,ntotal+56+68  
 E,ntotal+56+68,ntotal+58+68  
 E,ntotal+58+68,ntotal+60+68  
 E,ntotal+60+68,ntotal+62+68  
 E,ntotal+62+68,ntotal+64+68  
 E,ntotal+64+68,ntotal+66+68  
 E,ntotal+66+68,ntotal+68+68  
 E,ntotal+68+68,ntotal+70+68  
 E,ntotal+70+68,ntotal+72+68

allsel,all

### !!!! ACOPLAMENTO DAS ÁREAS DO SECUNDÁRIO

\*GET,CPLE2,ACTIVE,,CP  
 \*SET,CPLE2,CPLE2-1  
 \*DO,II,374,512,2  
 \*SET,CPLE2,CPLE2+2  
 ASEL,S,,,II  
 ESLA,S  
 NSLE,S

```
CP,CPLE2,CURR,ALL
CP,CPLE2+1,EMF,ALL
ALLSEL,ALL
NPLLOT
*ENDDO
ALLSEL,ALL
```

```
/SOLU
ANTYPE,HARMIC
HARFRQ,freq
SOLVE
FINISH
/post1
set,1,1,,0
```

```
FMAGSUM,'ARM'
```