



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Yllber da Silva Oliveira

Estudo de um freio por correntes de Foucault

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2018

Yllber da Silva Oliveira

Estudo de um freio por correntes de Foucault

Relatório de estágio apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2018

Yllber da Silva Oliveira

Estudo de um freio por correntes de Foucault/ Yllber da Silva Oliveira. –
Campina Grande, Paraíba, Abril de 2018-

41 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Edgar Roosevelt Braga Filho

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, Abril de 2018.

Yllber da Silva Oliveira

Estudo de um freio por correntes de Foucault

Relatório de estágio apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em ____ / ____ / ____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Edgar Roosevelt Braga Filho

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2018

Dedico este trabalho à minha família, Oliveiros, Edjane, Yane e Juliana.

Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar, aos meus pais Oliveiros e Edjane por todo carinho, esforço e trabalho que tiveram, sempre oferecendo o melhor. Meus pais foram essenciais, eu os amo.

Agradeço a minha irmã Yane e minha noiva Juliana, duas torres em quem eu sempre encontrei um lugar de conforto, pude contar nos momentos mais difíceis, elas foram o meu pilar psicológico e físico. Todos os trabalhos realizados durante esses anos não seriam possíveis sem elas.

Agradeço a todos os meus amigos, os que eu tinha antes da jornada acadêmica e os que aqui fiz. Sem dúvidas, a amizade será a mais importante coisa adquirida durante este tempo. Agradeço ao professor Edgar Braga por ter aceitado me orientar neste trabalho e ter paciência para transmitir seus conhecimentos com excelência e clareza.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica.

*"Não há nada mais reconfortante do que saber que o mundo é mais louco do que você."
(Dr. Erik Selvig)*

Resumo

Neste relatório é feito o estudo e a compreensão do comportamento do freio por efeito de correntes parasitas, com a finalidade de realizar teste de motores elétricos. São analisados os aspectos construtivos sobre o freio, como as características e dimensões físicas; além do cálculo de parâmetros como força magnetomotriz, momento e perdas, relacionando-os com a abordagem da fundamentação teórica, concluindo assim, o trabalho.

Palavras-chave: freio de Foucault; correntes parasitas; correntes de Foucault; freio por correntes parasitas.

Abstract

In this report is made the study and the understanding of the behavior of the brake by effect of eddy currents for the purpose of conducting tests of electric motors. It is analyzed the constructive aspects about the brake as its physical characteristics and dimensions, besides the calculation of parameters like magnetomotive force, moment and losses, relating them by the theoretical foundation approach, thus concluding the work.

Keywords: eddy current brake ; eddy currents; Foucault currents.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Formação das correntes parasitas.	15
Figura 2 – Linhas de campo induzidas no disco.	16
Figura 3 – Modelo típico freio de Foucalt.	17
Figura 4 – Forças atuantes no disco.	17
Figura 5 – Disco do freio WEG.	22
Figura 6 – Disco do freio Autocad.	23
Figura 7 – Bobinas do freio WEG.	23
Figura 8 – Bobinas Autocad.	24
Figura 9 – Freio eletrodinamométrico WEG 3cv.	24
Figura 10 – Freio Autocad.	25
Figura 11 – Caracterização do motor.	28
Figura 12 – Torque em função da rotação.	30
Figura 13 – Torque em função da rotação ampliada.	31
Figura 14 – Torque em função da rotação resultados experimentais.	31
Figura 15 – Corrente aplicada solicitada pelo motor em relação a rotação.	32
Figura 16 – Corrente aplicada solicitada pelo motor em relação a rotação ampliada.	33
Figura 17 – Corrente no motor em função da rotação resultados experimentais.	33
Figura 18 – Força exercida pelo freio de acordo com a corrente aplicada na bobina.	34
Figura 19 – Força exercida pelo freio de acordo com a tensão aplicada na bobina.	35
Figura 20 – Densidade de fluxo no entreferro de acordo com a corrente aplicada na bobina.	36

Lista de abreviaturas e siglas

N	Número de voltas da espira
r	Raio do disco [m]
d	Espessura do disco [m]
x	entreferro [m]
ω	Velocidade angular [rad/s]
γ	Inverso da resistividade volumétrica [$m \cdot \Omega^{-1}$]
\mathfrak{R}	Relutância [A/Wb]
D	Diâmetro da bobina [m]
β	Coefficiente constante dependente da geometria
\hat{F}	Força [N]
Q	Carga [C]
\hat{E}	Campo elétrico [V/m]
\hat{B}	Densidade de fluxo [T]
\hat{v}	Velocidade [m/s]
c	Constante de eficiência geométrica
ρ	Resistividade [$\Omega \cdot m$]
S	Área [m^2]
J	Densidade de corrente [A/mm^2]
vol	Volume [m^3]
σ	Condutância [$\sigma \cdot m$]
F_k	Força crítica [N]
V_k	Velocidade crítica [m/s]
RPM	Rotações por minuto

rad	Radianos
P	Potência [W]
\mathcal{T}	Torque [N.m]
f	Frequência [HZ]
p	Número de polos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	13
1.2	Estrutura do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Correntes parasitas	15
2.2	Freio de Foucault	16
2.3	Smythe,1942	18
2.4	Wouterse,1991	18
3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	22
3.1	Disco de freio	22
3.2	Bobinas	23
3.3	Freio	24
4	ASPECTOS FUNCIONAIS	26
4.1	Abordagem de Wourterse	26
4.2	Teste com motor	27
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICES	39
	APÊNDICE A – DESENHO FREIO DE FOUCAULT AUTOCAD	41

1 Introdução

O estudo do freio de Foucault baseia-se no uso do efeito de correntes parasitas na frenagem eletromagnética, com aplicações tanto em meios acadêmicos, quanto industriais. As correntes parasitas, de fuga ou de Foucault, são tratadas a partir do estudo da teoria eletromagnética clássica, por meio da magnetostática e em textos de conversão eletromecânica de energia.

Esses freios de ação por correntes parasitas são usualmente utilizados em aplicações de sistemas rotativos. Geralmente, são constituídos de um disco de alumínio ou cobre, no qual, duas ou mais bobinas são empregadas para prover a excitação e promover a variação do fluxo magnético, induzindo correntes parasitas na peça metálica. Tais correntes ocasionam a frenagem magnética do disco e aquecimento por efeito Joule da indução magnética.

1.1 Objetivos

O principal objetivo do trabalho é o estudo do freio de Foucault para múltiplas condições de carga ao motor, além da definição dos seus aspectos construtivos, analisando-o em termos de caracterização; o que possibilita, assim, a realização de ensaios em diversas condições de operação, estando diretamente acoplado ao eixo do motor e obtendo as características de um motor em função da velocidade.

1.2 Estrutura do trabalho

Neste sentido, a explanação apresenta a seguinte organização: no capítulo 1, de modo introdutório, há a contextualização do tema abordado, definição dos objetivos e apresentação da estrutura do trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica, por meio do estudo das correntes parasitas, como são formadas e seu comportamento aplicado ao freio de Foucault. O capítulo traz o modelo característico do freio, este sendo explicado por meio das abordagens feitas por Smythe em 1942 e Wouterse em 1991.

O capítulo 3 converge para um estudo de caso, em que, é realizado uma análise de um modelo construído pela WEG, em que é observado os aspectos construtivos, seguindo então o que foi proposto por Wouterse. Desse modo, ao realizar ensaio em laboratório para determinação de um modelo real, são apresentando os resultados e a verificação dos efeitos e características, nas quais, seguindo os cálculos relacionados, as variantes neles

explícitas determinarão o modo de sua aplicação e funcionamento.

Finalizando, o capítulo 4 destaca os principais entendimentos do trabalho, desejando assim, um planejamento para futuros projetos.

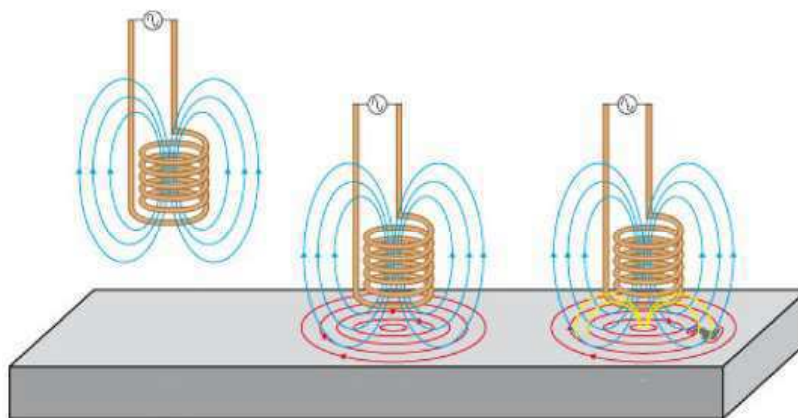
2 Fundamentação Teórica

2.1 Correntes parasitas

As correntes parasitas também conhecidas por correntes de Foucault, de acordo com a lei de Maxwell-Ampère, quando uma bobina é excitada tendo uma variação no campo ou na velocidade, é gerado um campo magnético principal, dado que ao se colocar uma superfície de material condutor elétrico sob a ação desse campo. Então as correntes parasitas são induzidas no mesmo, que por sua vez, originam um campo magnético que opõe ao campo principal gerado.

As Correntes de Foucault circulam nas extremidades formando pequenos circuitos fechados, fazendo com que o material se aqueça, caracterizando as perdas por efeito Joule. Isso consiste na ação das correntes no princípio de frenagem eletromagnética, no qual, a energia é dissipada por efeito Joule de acordo com a circulação de corrente no material condutor.

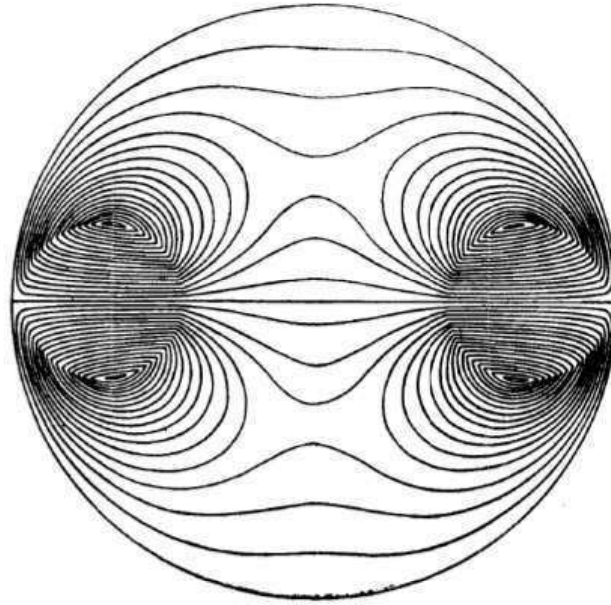
Figura 1 – Formação das correntes parasitas.



Fonte: adaptado de (NELLIGAN,2017)

Deste modo, as linhas de fluxo das correntes parasitas induzidas no disco condutor pelos pólos magnéticos, podem ser representados pela figura 2.

Figura 2 – Linhas de campo induzidas no disco.

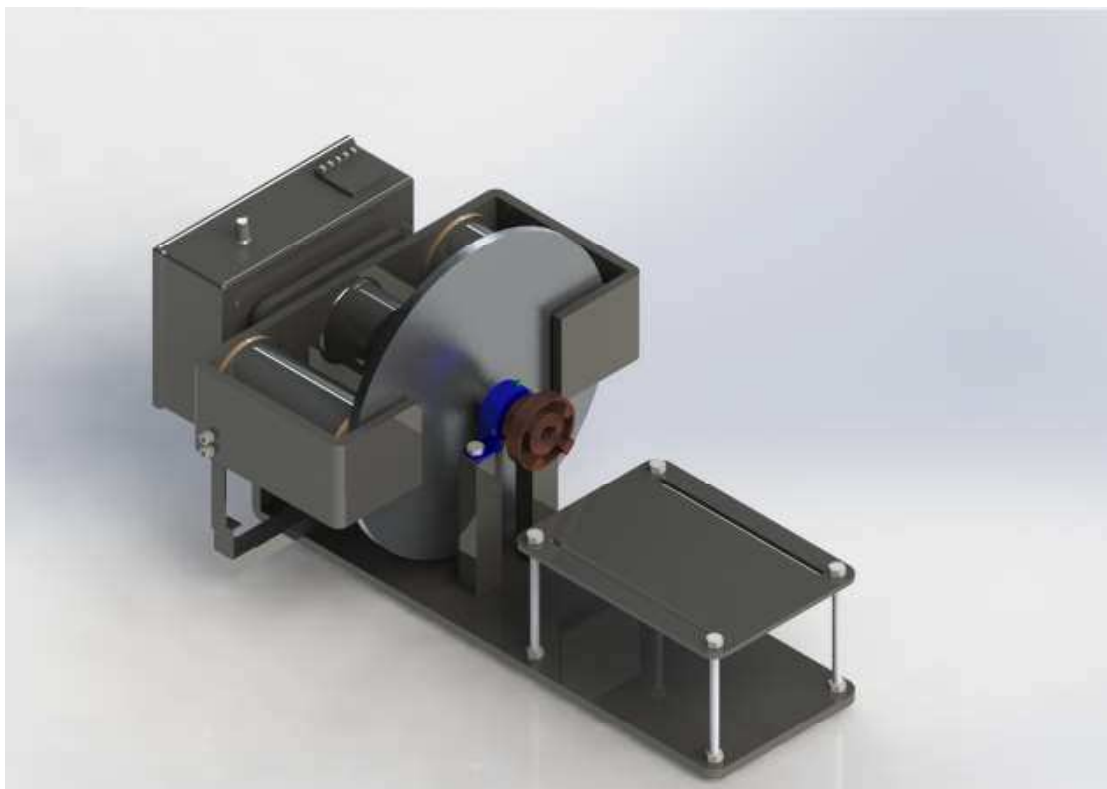


Fonte: adaptado de (Smythe,1942)

2.2 Freio de Foucault

A configuração de um freio por correntes parasitas é apresentada na Figura 3. Possuindo um disco de material condutor de raio r e de espessura d , constituído por dois (ou mais) pólos magnéticos, compostos de bobinas de N voltas e núcleos de ferro (neste caso de formato cilíndrico). O espaço entre as partes formam o entreferro de espessura x . As correntes parasitas, de acordo com o que foi apresentado na seção anterior, acarretam a diminuição das rotações do disco, como uma carga aplicada ao eixo do motor. A corrente nas bobinas gera fluxo magnético no núcleo, fazendo com que correntes de Foucault sejam induzidas em torno do pólo do núcleo quando o fluxo magnético incide sobre um disco condutor rotativo. A força de frenagem é gerada pela interação entre as correntes parasitas e fluxo magnético. O torque de frenagem gerado é então transferido para o eixo do motor.

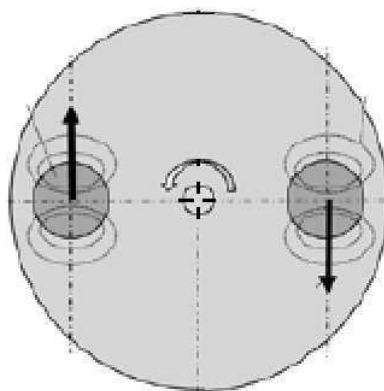
Figura 3 – Modelo típico freio de Foucault.



Fonte: <http://exstoacademy.exsto.com.br>

O Freio de Foucault reduz, então, a velocidade angular (rotação) do motor acoplado, por meio da dissipação por efeito Joule, resultante das correntes parasitas geradas pelos campos magnéticos estabelecidos. Estes, por sua vez, aplicam uma força contrária ao sentido de rotação, que é proporcional a ação do campo magnético resultante das bobinas.

Figura 4 – Forças atuantes no disco.



Fonte: Próprio autor

2.3 Smythe,1942

Em 1942, W. R. Smythe, a partir de um disco de raio finito para o freio por correntes parasitas, explana o cálculo do campo magnético no mesmo. Aplicando um campo externo por meio das bobinas, ele produz correntes induzidas na superfície que sofre a ação da indução magnética. Ao analisar o modelo proposto, presente na equação (2.1), que representa o conjugado de frenagem em função da velocidade, observou-se que o modelo era eficiente apenas para operações em baixas velocidades, tendo resultados insatisfatórios experimentalmente em altas velocidades.

$$\mathcal{T}(\omega) = \left(\frac{\omega \cdot \gamma \cdot \mathfrak{R} \cdot \varphi^2 \cdot D}{\mathfrak{R} + \beta^2 \cdot \gamma^2 \cdot \omega^2} \right) \quad (2.1)$$

Sendo ω velocidade angular, em rad/s; φ o fluxo magnético, em Wb; \mathfrak{R} a relutância magnética, em A.Wb⁻¹; D e β coeficientes constantes dependentes da geometria; γ o inverso da resistividade volumétrica ρ do disco, $10^{-9}/\rho$, em m.Ω⁻¹.

2.4 Wouterse,1991

A força elétrica sobre uma carga q (estacionária ou em movimento) submetido a um campo elétrico, é dada pela lei de Coulomb e está relacionada com a intensidade do campo elétrico \vec{E} conforme:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

Mostrando assim, que quando Q é positivo, \vec{F} e \vec{E} possuem mesma direção e sentido. Relacionando a um campo magnético \vec{B} , o campo apenas exerce força em carga em movimento, dada uma força experimentada por uma carga Q em movimento, com velocidade \vec{v} em um campo magnético \vec{B} é:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Utilizando a densidade volumétrica de corrente (cargas em movimento) induzidas no disco, baseado no que foi desenvolvido por Smythe, em 1991, J. H. Wouterse publica em "IEE Proceedings B - Electric Power Applications", a expressão (2.4) para a força de frenagem que tenha atuação tanto em velocidades baixas, quanto elevadas, relacionando essa força produzida do campo elétrico resultante das correntes induzidas.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} = \sigma \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.4)$$

Observando que tendo uma densidade de fluxo magnético, ao rotacionar o disco é induzido um campo elétrico \vec{E} perpendicular a velocidade tangencial \vec{v} . Obtém-se:

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.5)$$

Para baixas velocidades, as correntes induzidas geram campos magnéticos de contraposição, os quais, não influem significativamente no campo magnético total, dado ao seu valor ser muito menor se comparado ao campo magnético do eletroímã. Nesse sentido, considerando ω_c a velocidade em que ocorre o conjugado máximo (velocidade crítica) e sabendo que o motor pode trabalhar em três pontos de operações, nos quais a velocidade do motor é muito menor que a velocidade em que se dá o torque máximo, a velocidade do mesmo é equivalente ou maior que a mesma. É de fundamental importância que para os dois últimos casos, o campo gerado pelas correntes induzidas deixe de ser desprezível, tendendo a anular o campo gerado pelo eletroímã, o que apresenta o cancelamento do campo promovido \vec{B} pelo eletroímã, devido a presença da densidade de fluxo $-\vec{B}$ ocasionado pelas correntes induzidas.

Portanto, a associação entre a velocidade tangencial e a força de frenagem feita por Wouterse para o que foi dado por Smythe, é dada por:

$$\mathcal{F}(v) = \frac{\pi}{4 \cdot \rho} \cdot D^2 \cdot d \cdot c \cdot v \cdot B_0^2 \quad (2.6)$$

Em que, v é a velocidade tangencial, em m/s; B_0 a densidade de fluxo magnético, em T; D o diâmetro da bobina, em metros; c a constante de eficiência geométrica da bobina, adimensional; ρ a resistividade do material de composição do disco, em $\Omega \cdot \text{m}$; e d a espessura do disco, em metros.

O coeficiente de eficiência geométrica é um fator fundamental, pois ele ajusta a forma em que foram dispostas fisicamente as espiras, relacionando a força de frenagem com o formato da configuração de sua estrutura. Esse coeficiente visa corrigir a disposição da distribuição das linhas de campo induzidas no disco (figura 2), em que se dispersam ao longo da superfície, sendo calculado por:

$$c = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{r}\right)^2 \cdot \left(\frac{r-R}{D}\right)^2} \right] \quad (2.7)$$

Uma manipulação da expressão calculada na equação (2.6) pode ser obtida se considerarmos $D=2R_{bobina}$. Isso é feito associando a força de frenagem com a área do polo na superfície de atuação do eletroímã, levando em consideração a condutividade do

material utilizado no disco, o que resulta:

$$\mathcal{F}(v) = c \cdot \sigma \cdot v \cdot d \cdot S \cdot B_0^2 \quad (2.8)$$

Utilizando a lei de Ohm, determina que a densidade de corrente é proporcional ao campo magnético equação (2.4), pode-se encontrar a densidade volumétrica dessa força. Para uma comparação com a equação (2.8) descrevemos a equação (2.9) como sendo força de frenagem sofrida por um condutor ao atravessar um campo magnético constante, sendo vol o volume do condutor sob influência do campo, ou seja, o volume do disco sob o campo.

$$\mathcal{F} = \int \int \int J \times B \cdot \partial vol = \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B^2 \quad (2.9)$$

Reescrevendo a equação (2.8), a título de observação para efetuação da comparação antes descrita, multiplicamos a área da base pelo comprimento e obtemos o volume do cilindro. Portanto, a área da base pode ser descrita pela área relativa à bobina e o comprimento pela medida equivalente à espessura do disco, formando a equação (2.10).

$$\mathcal{F} = c \cdot \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B_0^2 \quad (2.10)$$

Como anteriormente citado, a proposta feita por Wouterse visa a atuação do freio para as regiões de baixas e altas velocidades. Partindo de que o campo produzido pelas correntes parasitas em uma região de velocidades elevadas tende a anular o campo produzido pelo eletroímã; ou seja, a partir de certa rotação, a força de frenagem diminui com o aumento da velocidade, Wouterse propôs que para um disco finito (condutividade finita) haveria uma saturação do material, no qual, as correntes induzidas não tenderiam a ter uma grande intensidade capaz de originar um campo magnético de força suficiente para anular o campo estabelecido pelo indutor. Um caminho de circulação das correntes no disco é proposto baseado em Smythe (figura 2), levando em consideração o diâmetro do pólo D, a distância do entreferro x e a espessura d do disco. Caminho determinado devido a não trivialidade de se demonstrar a distribuição do campo magnético, obtendo-se assim, uma resistência R equação (2.11) no caminho percorrido pela corrente i equação (2.12).

$$R = \frac{\pi \cdot D}{\xi \cdot \sigma \cdot d \cdot x} \quad (2.11)$$

$$i = \frac{B \cdot x}{\mu_0} \quad (2.12)$$

3 Aspectos Construtivos

Foi então, realizado o estudo das características físicas do freio, fundamentais para a atuação do mesmo, pois, como visto no capítulo anterior, o conjugado de frenagem, bem como a força, dependem dos elementos construtivos tais como: raio, espessura e material do disco; seção reta e formato das bobinas; posicionamento das mesmas em face ao disco relativo ao eixo de rotação; material do núcleo; comprimento do entreferro, entre outros que serão abordados, a fim de se obter a caracterização do freio.

3.1 Disco de freio

Figura 5 – Disco do freio WEG.



Fonte: Próprio autor

O disco do freio eletrodinamométrico da marca WEG é um disco de alumínio de espessura d 5/16 polegadas (8mm), raio r de 17cm e 2700kg/m^3 a densidade δ aproximada deste material. Possui uma condutividade de aproximadamente $\sigma_{Al} = 3,42 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ e resistividade $\rho_{Al} = 2,92 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e seu coeficiente de dilatação volumétrica térmico é $\gamma = 71,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. É um metal de baixo custo, possui uma ótima resistência a corrosão, é um bom condutor elétrico e excelente condutor térmico. Seu estado na temperatura ambiente é sólido, no qual, seu ponto de fusão está a cerca de $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Devido ao ponto de fusão elevado, o alumínio permite o trabalho em altas temperaturas sem afetar seu estado

físico. Relacionando ao freio, quanto mais a temperatura no disco subir, mais energia será dissipada por efeito joule. O disco está ilustrado na figura 6 feita no Autocad.

Figura 6 – Disco do freio Autocad.



Fonte: Próprio autor

3.2 Bobinas

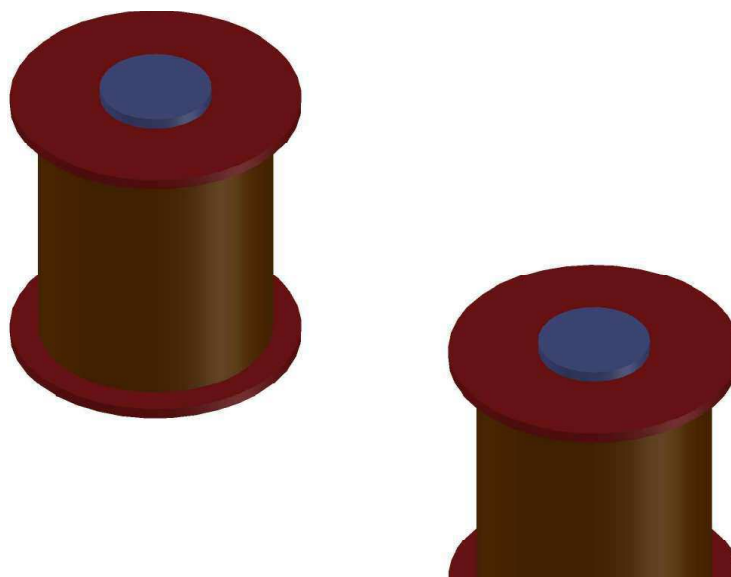
Figura 7 – Bobinas do freio WEG.



Fonte: Próprio autor

No freio há dois polos magnéticos, em que, as bobinas foram enroladas em peças cilíndricas de ferro de 5cm de diâmetro, altura útil de 10,9cm, dispostas a uma distância de 13,8cm do eixo do disco ao eixo central da bobina (raio efetivo) e à uma distância de 2mm do disco. As bobinas estão ilustradas na figura 8 feita no Autocad.

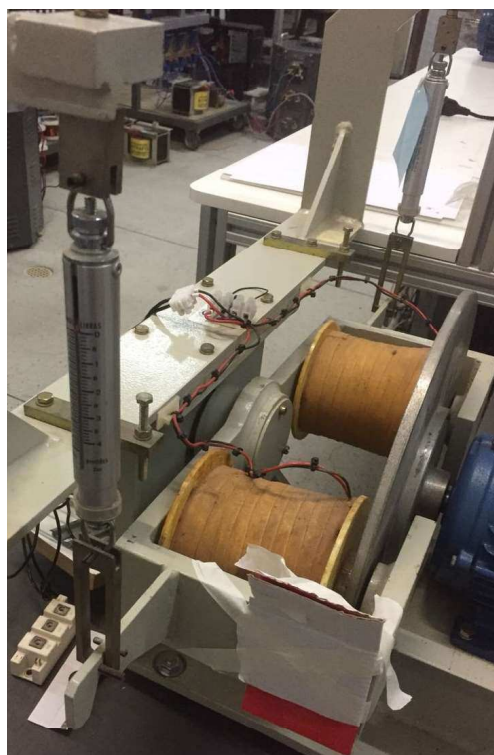
Figura 8 – Bobinas Autocad.



Fonte: Próprio autor

3.3 Freio

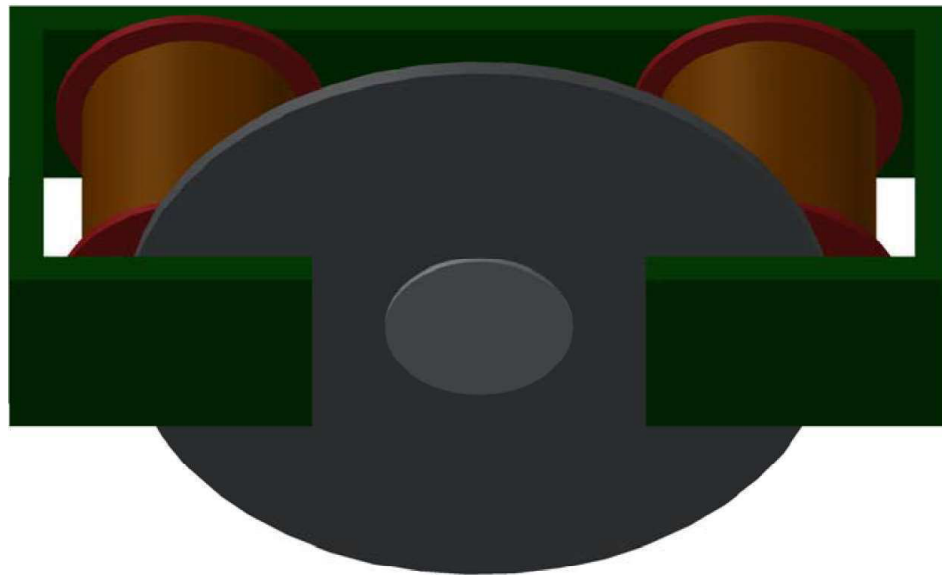
Figura 9 – Freio eletrodinamométrico WEG 3cv.



Fonte: Próprio autor

O freio eletrodinamométrico WEG é especificado para potências de até 5cv. É formado pela composição do disco associado às bobinas e um núcleo de ferro conectado a dois dinamômetros, que operam dependendo do sentido de rotação do motor de modo separado. Para o sentido dextrógiro, tem-se a operação de um dinamômetro; todavia, este deixa de operar caso o sentido de rotação esteja para o sentido levógiro atuando o outro, de modo a marcar a força de frenagem que está sendo exercida, que multiplicada pelo raio efetivo tem-se o torque aplicado pelo freio. Possui núcleo de ferro em que está conectado as bobinas de formato retangular a uma distância de 3mm do disco, formando um entreferro total de 13mm, 2mm referente as bobinas, 3mm ao núcleo e 8mm do disco. O freio está ilustrado na figura 10 feita no Autocad.

Figura 10 – Freio Autocad.



Fonte: Próprio autor

4 Aspectos Funcionais

Para atingir os objetivos deste trabalho, conforme pôde ser observado por meio do estudo realizado a respeito dos freios acionados por corrente de Foucault seguindo a abordagem feita por Wouterse, é possível calcular alguns parâmetros, como força e torque de frenagem, fator de eficiência geométrica, área útil de atuação dos pólos, dentre outras características do freio, realizando assim, uma análise sob o ponto de vista funcional do freio.

4.1 Abordagem de Wourterse

Fazendo uma análise teórica dos elementos físicos para uma análise dos aspectos construtivos, calcula-se primeiramente o fator de eficiência geométrica dado a estrutura das bobinas, do disco e posicionamento em relação ao eixo das bobinas, sendo calculado pela equação (2.7). Portanto, obtemos:

$$c = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{13,8}{17}\right)^2 \cdot \left(\frac{17-13,8}{5}\right)^2} \right] = 0,407 \quad (4.1)$$

Para o cálculo da área de atuação do polo magnético, é considerada a área da base do formato cilíndrico, cuja corresponde à uma circunferência de diâmetro $D=5\text{cm}$. Logo, sua área é dada por:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 19,63 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (4.2)$$

A velocidade é diretamente dependente da frequência e inversamente dependente do número de polos, o que significa que quanto menor o número de pólos maior quantidade de rotações, em que, o número de revoluções por minuto pode ser calculado de acordo com a equação (4.3), sabendo que a frequência da rede é de 60Hz.

$$\Omega_s = 120 \cdot \left(\frac{f}{p}\right) \quad (4.3)$$

Onde f é a frequência da rede e p o número de polos. Para tal, observa-se que o freio deverá estar apto a operar para a faixa de velocidade do motor a ser testado, esse tendo 4 polos, logo, obtemos:

$$p=4 - \text{RPM}=1800 ; \omega_s=188,50 \text{ rad/s};$$

Portanto, a velocidade tangencial pode ser calculada por:

$$v = \omega_s \cdot r \quad (4.4)$$

resultando, para a faixa de operação:

$$p=4 - v=32,04 \text{ m/s};$$

Dessa forma, tendo a força no freio calculada pela equação (2.6), o freio operando em seu limite máximo deve ser capaz de fornecer o campo magnético, cuja as correntes induzidas no disco produza uma força de módulo igual, porém, sentido contrário ao movimento executado pelo disco, sabendo que o torque pode ser obtida por:

$$\mathcal{T}(v) = \mathcal{F}(v) \cdot R = \frac{\pi}{4 \cdot \rho} \cdot D^2 \cdot d \cdot c \cdot v \cdot B_0^2 \cdot R \quad (4.5)$$

Onde, $\mathcal{F}(v)$ de acordo com Wouterse, depende do B_o , velocidade limite, que se encontram na seção 4.2 para o teste com motor, e dos aspectos construtivos, portanto determinando a velocidade limite (1742 rpm) e a nominal (1715 rpm), temos:

$$(v) = \frac{1642}{60} \cdot 0,138 = 3,7 \text{ m/s} \quad (4.6)$$

$$(v) = \frac{1715}{60} \cdot 0,138 = 3,9 \text{ m/s} \quad (4.7)$$

Portanto, o torque máximo e o conjugado à plena carga, a ser imposto pelo freio ao disco, no teste em carga com motor, é dado respectivamente por:

$$\mathcal{T}(v) = 0,407 \cdot 3,42 \cdot 10^7 \cdot 3,7 \cdot 0,008 \cdot 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3133^2 \cdot 0,138 = 9,97 \text{ N.m} \quad (4.8)$$

$$\mathcal{T}(v) = 0,407 \cdot 3,42 \cdot 10^7 \cdot 3,9 \cdot 0,008 \cdot 19,63 \cdot 10^{-4} \cdot 0,268^2 \cdot 0,138 = 6,19 \text{ N.m} \quad (4.9)$$

4.2 Teste com motor

Então, para analisar o comportamento do freio, fora realizado teste com um motor trifásico de indução, da marca WEG, Tensão nominal 380V (Y) corrente nominal 2,59, rotação 1715RPM, categoria "N", potência nominal de 1,5cv e 4 polos. Primeiramente levantou-se as características do motor utilizando os testes de rotor bloqueado, a vazio,

resistência a frio e resistência a quente. Os valores dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio encontram-se na tabela 1 e tabela 2.

Tabela 1 – Dados do ensaio a vazio

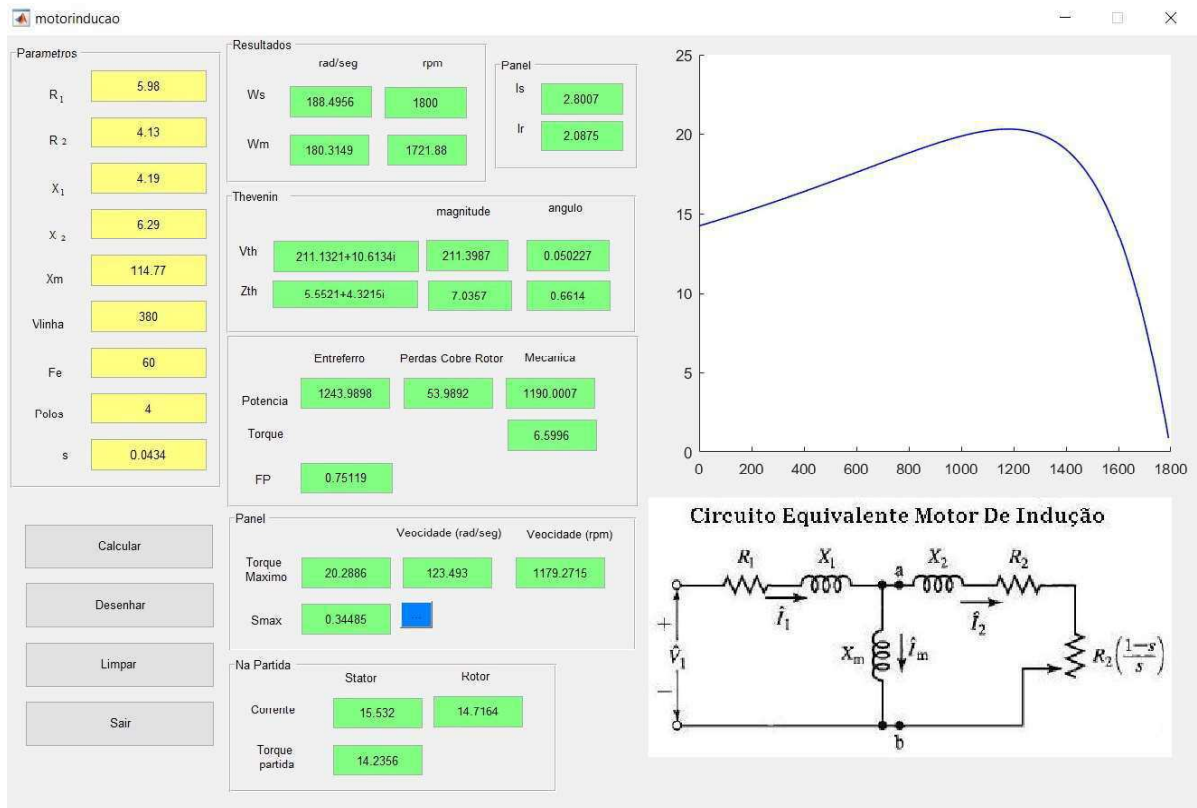
$V_{vz}(V)$	$I_{vz}(mA)$	$W_{vz}(W)$
380	1,83	150

Tabela 2 – Dados do ensaio com o rotor bloqueado

$I_{bl}(mA)$	$V_{bl}(V)$	$W_{bl}(W)$
2,59	64	195

A partir dos testes, foram calculados os parâmetros do motor, por meio de um script no matlab foi realizada uma análise, em que, observou-se o comportamento característico do motor concluindo que, a rotação em plena carga é de 1722rpm resultando num $s_{pc} = 0,0434$. O torque e corrente a plena carga equivalem a $6,12N \cdot m$ e 2,80A, então a caracterização completa do motor se encontra na figura 11, bem como seu circuito equivalente.

Figura 11 – Caracterização do motor.



Fonte: Próprio autor

Tendo posto, os dados obtidos do script encontram-se na tabela 3, na tabela 4 e na tabela 5

Tabela 3 – Parâmetros do motor

$R_1(\frac{\Omega}{fase})$	5,98
$X_1(\frac{\Omega}{fase})$	4,19
$R_2(\frac{\Omega}{fase})$	4,13
$X_2(\frac{\Omega}{fase})$	6,29
$X_m(\frac{\Omega}{fase})$	114,77
$F_e(Hz)$	60
Polos	4
$V_{linha}(V)$	380

Tabela 4 – Resultados

$T_p(N \cdot m)$	14,23
$I_p(A)$	15,53
$T_{m\acute{a}x}(N \cdot m)$	20,29
$s_{m\acute{a}x}$	0.3445
$I_{pc}(A)$	2,80
$\Omega_{pc}(RPM)$	1722
FP	0,7512

Tabela 5 – Equivalente Thevenin

Thevenin	Complexo	Amplitude	Ângulo
V_{Th}	$(211,13 + \hat{j} \cdot 10,61) V$	211,40V	$2,88^\circ$
Z_{Th}	$(5,55 + \hat{j} \cdot 4,32) A$	7,03A	$37,89^\circ$

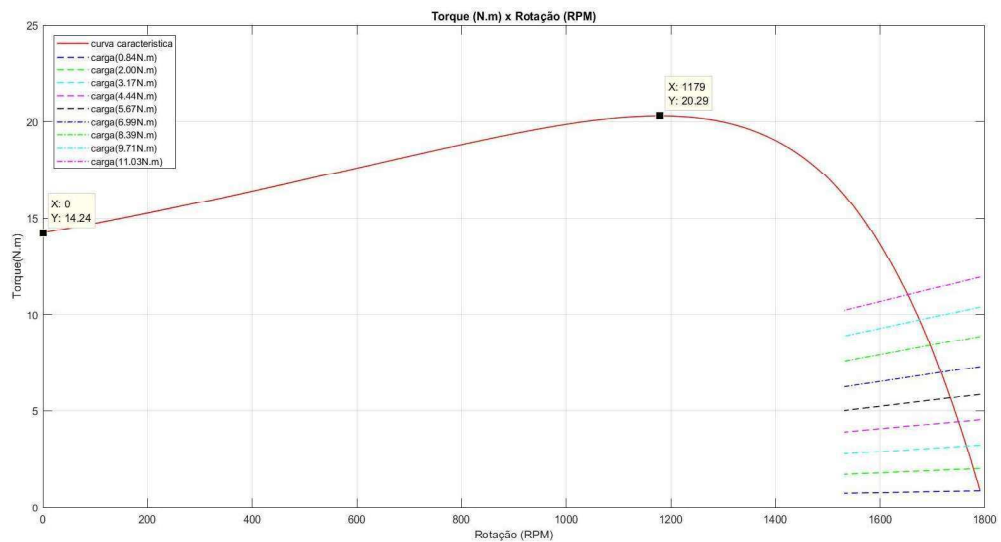
O teste em carga foi realizado de modo que, acoplado o motor ao freio, fosse alterando a carga exercida pelo mesmo, por meio da corrente aplicada nas bobinas conectadas em série, medindo assim, as rotações no disco, potência de entrada, tensão nas bobinas, corrente nas bobinas e a corrente solicitada pelo motor para cada nível de carga, obtendo através do dinamômetro do freio a força exercida. Os resultados encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 – Dados do ensaio em carga

$I_{motor}(A/fase)$	$W_{motor}(watt)$	Rotações(RPM)	$V_{bobina}(V)$	$I_{bobina}(mA)$	$F_{freio}(N)$	$T_{freio}(N.m)$
1,77	130	1799	0	0	0,00	0,00
1,79	240	1791	40	99	1,94	0,54
1,86	380	1784	60	146	3,93	1,08
1,93	485	1778	71	173	5,84	1,60
1,99	600	1772	83	201	7,93	2,18
2,07	705	1765	90	217	9,80	2,70
2,16	835	1758	98	238	11,76	3,24
2,27	970	1750	105	255	13,74	3,80
2,39	1090	1742	113	274	15,76	4,34
2,54	1215	1734	122	294	17,72	4,88
2,70	1345	1725	127	306	19,66	5,42
2,86	1465	1716	134	322	21,62	5,96
3,04	1600	1707	137	330	23,59	6,52
3,20	1745	1696	144	346	25,57	7,06
3,41	1880	1686	147	355	27,54	7,60
3,59	2026	1675	155	372	29,48	8,14
3,81	2175	1663	158	380	31,56	8,72
4,01	2325	1653	166	398	33,57	9,26
4,23	2460	1642	170	407	35,34	9,74

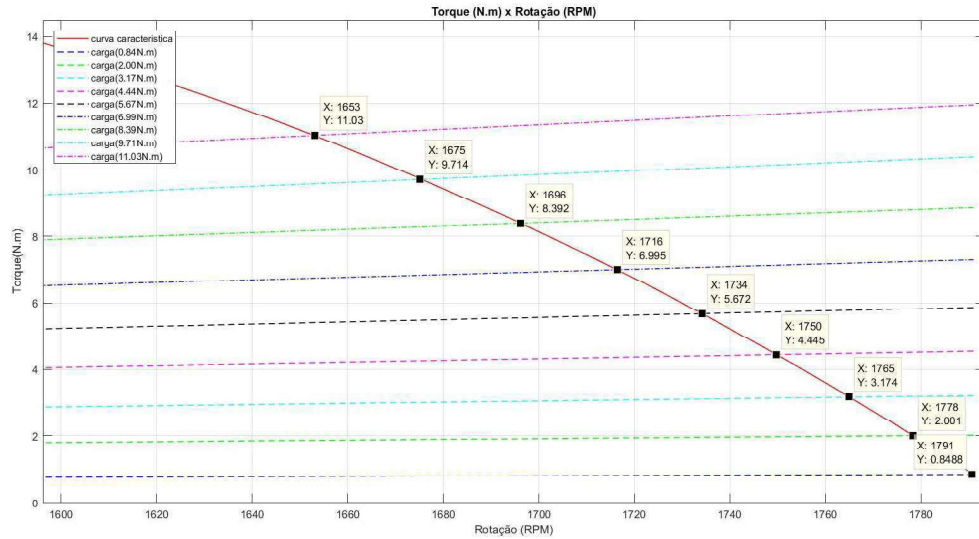
Pode-se observar na figura 12 e figura 13, a curva característica do motor do torque em função da rotação. Nesse gráfico, foram considerados pontos de medições intercalados para facilitar a visualização, de maneira que cada ponto de operação de carga fossem destacados junto a sua rotação relativa, obtendo os locais de atuação da carga na curva característica. Tendo então, especificados o torque de partida, rotação, o torque máximo e os torques correspondentes aos pontos de operação.

Figura 12 – Torque em função da rotação.



Fonte: Próprio autor

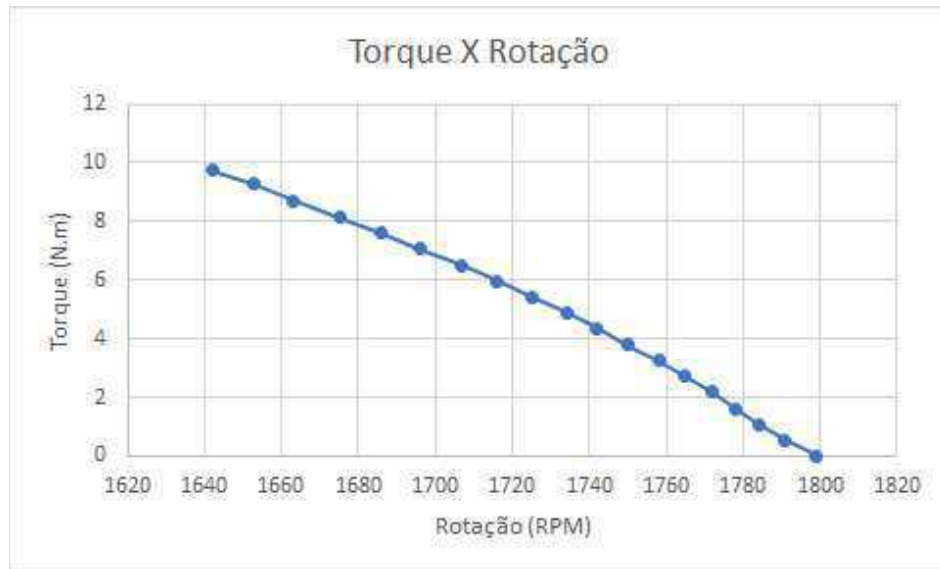
Figura 13 – Torque em função da rotação ampliada.



Fonte: Próprio autor

Então, realizando o tratamento de dados e fazendo a curva para os resultados experimentais temos que o torque pode ser obtido pela equação (4.9), considerando a composição que as componentes do torque de cada bobina na resultante final, temos:

Figura 14 – Torque em função da rotação resultados experimentais.



Fonte: Próprio autor

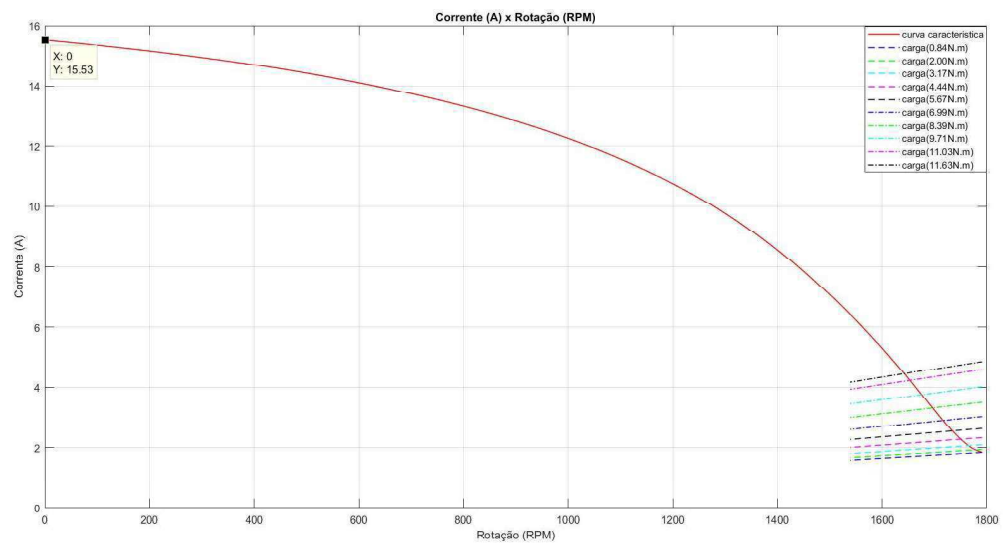
Realizando uma análise dos erros dos resultados experimentais e teórico, temos:

Tabela 7 – Erros relativos de torque

Rotações(RPM)	$T_{f_{reio}}(N.m)Teórico$	$T_{f_{reio}}(N.m)Experimental$	$E(O/O)$
1799	0	0	0
1791	0,37	0,53	36,93
1778	1,00	1,61	27,49
1765	3,17	2,71	19,57
1750	4,44	3,79	14,72
1734	5,67	4,89	14,62
1716	6,99	5,96	13,79
1696	8,39	7,05	14,73
1675	9,71	8,13	15,89
1653	11,03	9,26	15,99

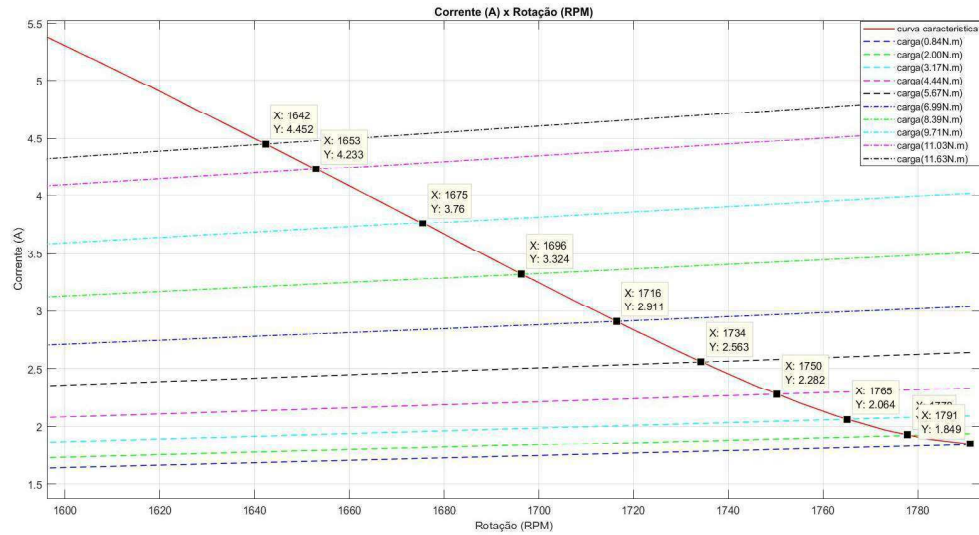
Analisando a corrente de solicitação do motor para cada região de carga, temos os seguintes pontos especificados a corrente de partida e as correntes nos pontos de operação mostrados na figura 15 e figura 16.

Figura 15 – Corrente aplicada na bobina em relação da rotação.



Fonte: Próprio autor

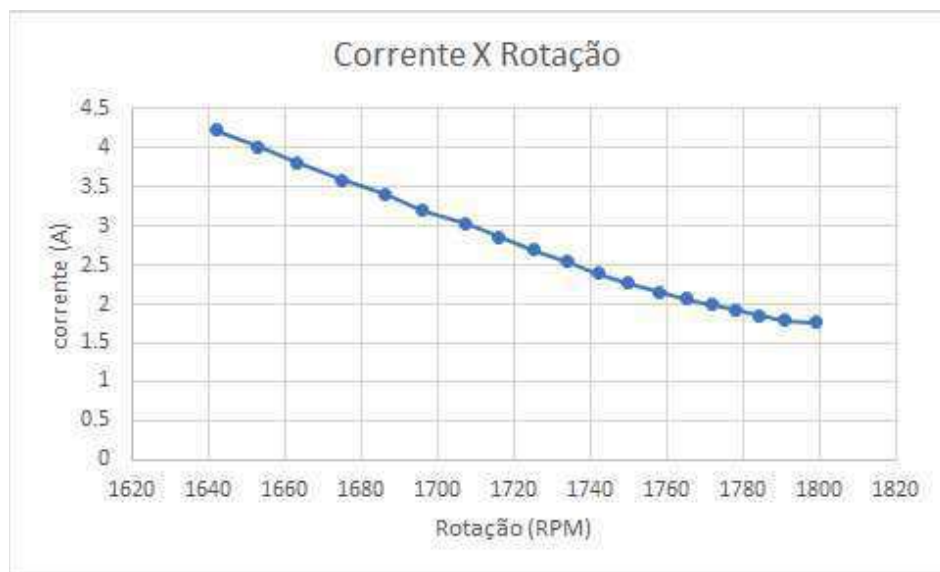
Figura 16 – Corrente aplicada na bobina em relação da rotação ampliada



Fonte: Próprio autor

Então, realizando o tratamento de dados e fazendo a curva para os resultados experimentais temos o gráfico da corrente solicitada pelo motor para os pontos de operação em carga, logo:

Figura 17 – Corrente no motor em função da rotação resultados experimentais.



Fonte: Próprio autor

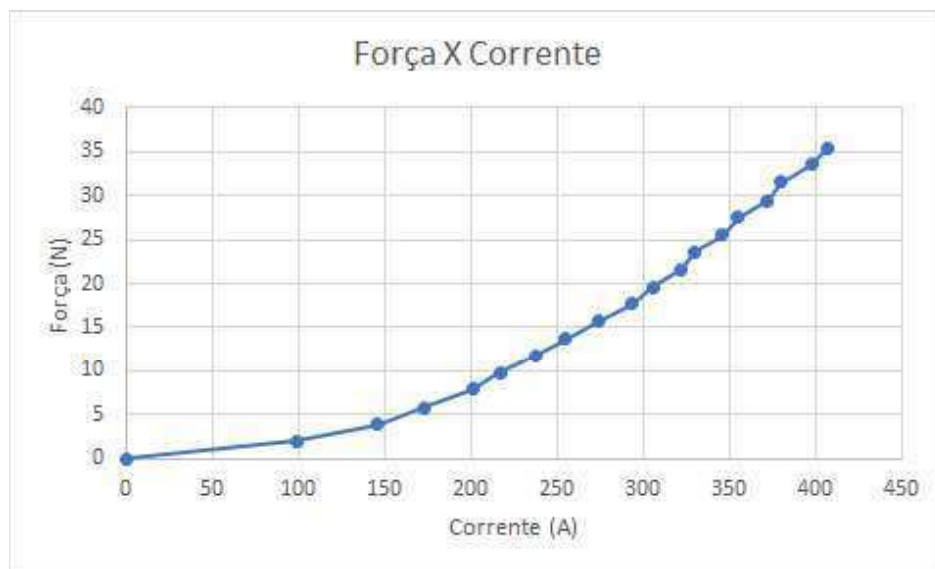
De modo que os erros experimentais podem ser obtidos. Assim, esses foram calculados e anotados na tabela :

Tabela 8 – Erros relativos de corrente

<i>Rotações(RPM)</i>	<i>I_{motor}(A)Teórico</i>	<i>I_{motor}(A)Experimental</i>	<i>E(%)</i>
1791	1,84	1,79	2,71
1778	1,92	1,93	0,31
1765	2,06	2,07	0,29
1750	2,28	2,27	0,43
1734	2,56	2,54	0,78
1716	2,91	2,86	1,71
1696	3,32	3,20	3,61
1675	3,76	3,59	4,52
1653	4,23	4,01	5,20
1642	4,45	4,23	4,94

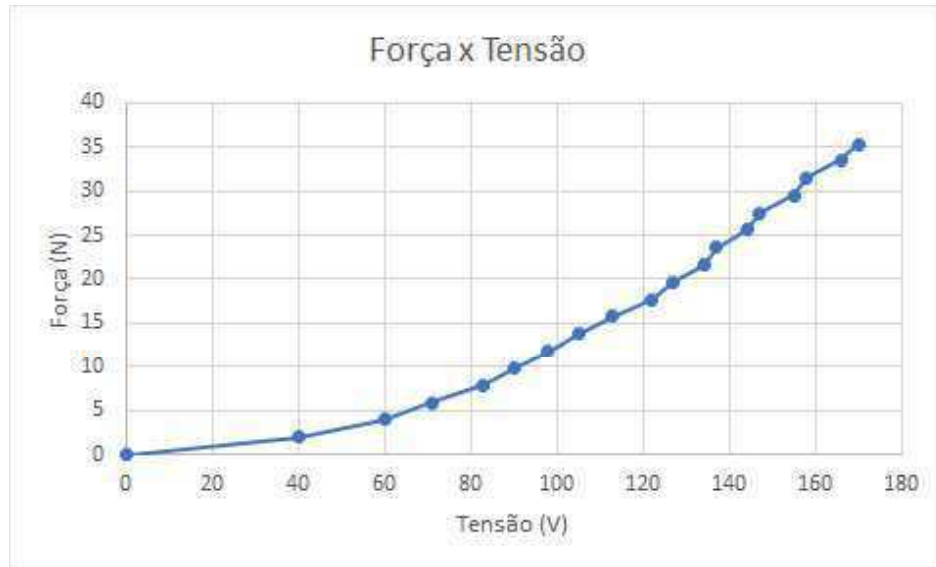
Assim, analisando o comportamento do freio em face das correntes e tensões aplicadas as bobinas, traçamos as curvas dos valores experimentais.

Figura 18 – Força exercida pelo freio de acordo com a corrente aplicada na bobina.



Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Força exercida pelo freio de acordo com a tensão aplicada na bobina.



Fonte: Próprio autor

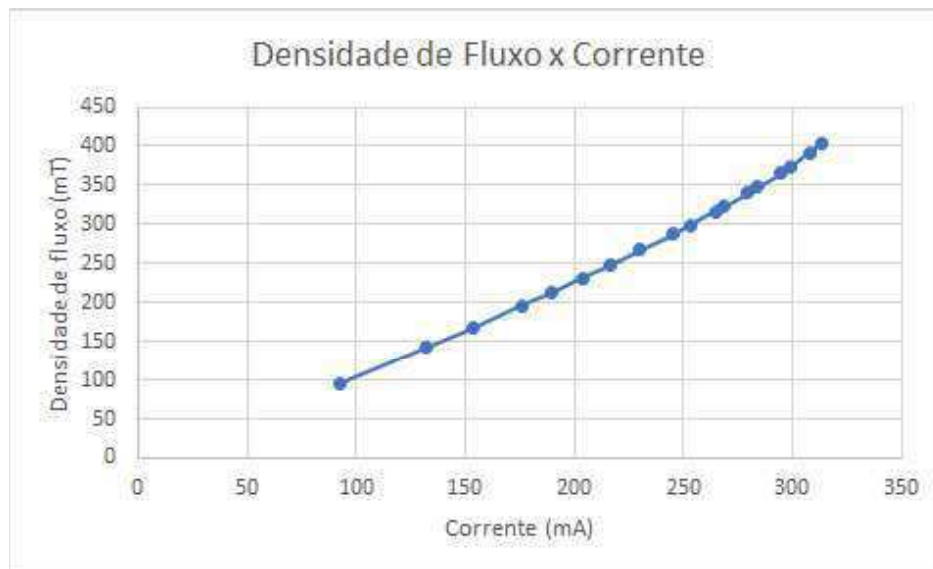
Foi então, retirado o disco para realizar as medições de densidade de fluxo no ponto médio do entreferro. Tendo posto, foi aplicada uma corrente nas bobinas, lendo-se então a tensão e a densidade de fluxo por meio de um voltímetro e um gaussímetro, respectivamente. Ao fornecer uma corrente para as bobinas, foi utilizada uma sonda de efeito Hall, na qual, realiza a leitura exatamente na distância em que é disposta a ponta de prova, considerando então que as bobinas são idênticas e sabendo que elas encontram-se em série. Então, os parâmetros medidos foram anotados e inseridos na tabela 9, de modo a se traçar a curva da figura 20.

Tabela 9 – Dados do ensaio no entreferro

$I_{bobina}(mA)$	$V_{bobina}(V)$	$B(mT)$
402.7	170.6	313.3
391.5	166.0	308.0
372.8	158.0	299.0
365.9	155.1	294.7
347.3	147.2	284.0
339.8	144.2	279.7
322.8	136.9	268.7
316.2	134.1	264.7
299.5	127.4	253.3
288.2	122.2	245.3
267.0	113.3	230.3
247.3	104.9	216.3
231.3	98.0	203.7
212.2	90.0	189.3
195.6	82.9	176.0
167.8	71.1	153.3
142.0	60.0	131.7
95.2	40.3	92.7

Assim, realizou-se a observação por meio da curva característica da densidade de fluxo magnético em função corrente aplicada nas bobinas.

Figura 20 – Densidade de fluxo no entreferro de acordo com a corrente aplicada na bobina.



Fonte: Próprio autor

5 Conclusão

Neste presente trabalho foi analisado o freio por correntes parasitas, fazendo uma abordagem com base nos trabalhos publicados por Smythe em 1942 e Wourterse em 1991, visando o estudo e compreensão do modelo e funcionamento do freio, corroborando e ampliando a teoria no âmbito da Engenharia Elétrica.

Foram utilizados os métodos apresentados para medição em laboratório, em que os desempenhos foram estudados perante a variação de parâmetros por meio dos gráficos e resultados apresentados. A análise do desempenho do freio mediante a variação da corrente, sendo ela a proposta fundamental do trabalho dada a escassez de textos que abordem o tema, fora feito por meio de testes laboratoriais, em que se utilizou o dispositivo de frenagem para aplicar-se uma carga ao eixo do motor.

A realização deste Trabalho permitiu aprofundar os conceitos e apresentar os conhecimentos ao longo do curso adquiridos, além de acrescentá-los ao transcorrer da pesquisa e projeto.

Para trabalhos futuros, têm-se: o projeto de um freio de Foucault trazendo os critérios de decisão para parametrização física do mesmo, montagem do projeto e testes para validação do projeto.

REFERNCIAS

UMANS, Stephen D. Fitzgerald & **Kingsley's Electric Machinery**: 7.ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2014. 728p

WOUTERSE, J. H. Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*; vol. 138, no. 4, pp.153-158, jul. 1991.

SCHIEBER, David. Transient eddy currents in thin metal sheets. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 8, no. 4, p.775 – 779, dec. 1972.

SCHIEBER, David. Optimal dimensions of rectangular electromagnet for braking purposes. *IEEE Transactions on magnetics*. vol. 11, no. 3, p.948 – 952, maio 1975.

PLONUS, Martin A. *Applied Electromagnetics*. New York: McGraw – Hill, 1978. 615p.

WIEDERICK, H. D.; et. al. Magnetic Braking: Simple Theory and Experiment. *American Journal of Physics*. vol. 55, no. 6, p.500-503, Jun. 1987.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fundamentos de física*. 7ª. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi. Vol. 3. 4 vols. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007.

Apêndices

APÊNDICE A – Desenho Freio de Foucault Autocad

