

VINÍCIUS CÂNDIDO DA SILVA

Aplicação de fluidos magneto-reológicos em dispositivos eletromecânicos

São Paulo

2015

VINÍCIUS CÂNDIDO DA SILVA

Aplicação de fluidos magneto-reológicos em dispositivos eletromecânicos

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia

São Paulo

2015

VINÍCIUS CÂNDIDO DA SILVA

Aplicação de fluidos magneto-reológicos em dispositivos eletromecânicos

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia

Área de Concentração: Eletromagnetismo

Orientador: Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

São Paulo

2015

A todos os membros da minha família.

AGRADECIMENTOS

Nenhum trabalho é realizado de forma individual, mesmo quando há um único autor. Independentemente da área de concentração ou tema, todas as atividades são realizadas com a colaboração de outras pessoas. Este Trabalho de Formatura não é uma exceção a esta regra primordial, e neste espaço dedico uma singela homenagem a todos que contribuíram para a realização do trabalho realizado ao longo do ano de 2015.

Primeiramente, agradeço ao orientador do trabalho, o Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu, que acompanhou todo o trabalho com bastante proximidade e atenção, e sem o qual o Trabalho de Formatura seria inexecutável. O orientador foi extremamente solícito desde o início até a conclusão do projeto, contribuindo com seus conhecimentos teóricos e práticos, além de oferecer suporte na execução física do trabalho e revisão textual.

O Prof. Dr. Walter Kaiser teve participação fundamental para a realização do projeto, auxiliando inúmeras vezes na adaptação de peças mecânicas do trabalho, se mostrando sempre disposto contribuir com sua ajuda.

Além disso, Adelino Alves Damaceno, Edson da Conceição Santana, Marco Antonio da Silva e Marco Aurélio de Oliveira, técnicos dos laboratórios do Departamento, tiveram participação de extrema importância. Sempre muito dispostos a oferecer suas ajudas, auxiliaram diversas vezes com seus equipamentos elétricos e mecânicos para que os experimentos e ensaios executados no trabalho fossem realizados.

RESUMO

Este documento aborda os assuntos tratados no projeto de formatura, relativos ao estudo dos fluidos magneto-reológicos. O trabalho foi desenvolvido no laboratório LMAG do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas – PEA. Os fluidos magneto-reológicos são materiais relativamente pouco estudados até o momento, principalmente no Brasil. Desenvolvidos no início da década de 1950, seu interesse e aplicação têm se ampliado consideravelmente nos últimos vinte anos, em especial nos centros mais industrializados. O fluido magneto-reológico é um material que tem suas propriedades reológicas, ou de escoamento, fortemente alteradas na presença de um campo magnético, tornando-o um fluido controlável. Ele pode ser aplicado nas mais diversas áreas, desde suspensões automotivas até próteses médicas. Esse fluido foi objeto de estudo do trabalho proposto, notadamente quanto às suas características macroscópicas representadas pelo comportamento da viscosidade aparente e tensão de cisalhamento com o campo magnético. Além disso, o fluido foi caracterizado microscopicamente através de simulações com os softwares FEMM. Por fim, foi feito um estudo da aplicação do fluido magneto-reológico num dispositivo de aplicação prática, o freio eletromecânico. Esse último, desenvolvido originalmente durante o período de iniciação científica, foi complementado, sendo agora ajustado e calibrado de forma a fornecer indicações precisas e de forma prática quanto à medição do torque e da velocidade rotacional.

Palavras-chave: Fluido magneto-reológico. Freio eletromecânico. Circuitos magnéticos.

ABSTRACT

This paper will show the topics developed in the final project based on magneto-rheological fluids. The project was developed in the laboratory called LMAG, of the Department of Electrical Energy and Automation Engineering. The magneto-rheological fluids didn't have been studied, especially in Brazil. Developed in the decade of 1950, its interest and application have been considerably extended in the last twenty years, especially in the industrialized centers. The magneto-rheological fluid is a material that have its rheological properties, or outflow properties, strongly altered at the presence of a magnetic field, making it a controllable fluid. It can be applied in many areas, from automotive suspensions to medical prostheses. This fluid is the subject of the proposed work, notably as to their macroscopic characteristics represented by the behavior of the apparent viscosity and shear stress with the magnetic field. Moreover, the fluid is characterized microscopically by simulation with the software FEMM. Finally, it's studied the application of magnetorheological fluid, the electromechanical brake. This device was developed during the scientific initiation and will be adjusted and calibrated to provide accurate information and practical way as the measurement of torque and rotational speed.

Keywords: Magneto-rheological fluid. Electromechanical break. Magnetic circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição do fluido magneto-reológico: à esquerda partículas dispersas, sem campo aplicado; à direita, estruturas colunares formadas pelo alinhamento das partículas sob ação do campo	12
Figura 2 - Mistura final do fluido magneto-reológico.....	16
Figura 3 - Exemplo de um circuito magnético	18
Figura 4 - Circuito a ser simulado no FEMM	22
Figura 5 - Entreferro formado por fluido.....	23
Figura 6 - Malha de elementos finitos.....	23
Figura 7 - Linhas de indução no circuito.....	24
Figura 8 - Linhas de campo na estrutura do fluido.....	24
Figura 9 - Densidade de fluxo magnético no circuito	25
Figura 10 - Densidade de fluxo magnético no entreferro.....	26
Figura 11 - Indução ao longo do entreferro.....	27
Figura 12 - Curva BH com consideração bidimensional.....	28
Figura 13 - Permeabilidade relativa para situação bidimensional.....	28
Figura 14 - Curva BH com consideração tridimensional.....	29
Figura 15 - Permeabilidade relativa para situação tridimensional	30
Figura 16 - Deslocamento das estruturas colunares	31
Figura 17 - Tensão de cisalhamento em função do deslocamento entre as colunas.....	32
Figura 18 - Tensão de cisalhamento em função da indução magnética	33
Figura 19 - Comparação das curvas de tensão de cisalhamento.....	34
Figura 20 - Vistas do cubo 1.....	35
Figura 21 - Vistas do cubo 2.....	36
Figura 22 - Vistas do anel externo.....	36
Figura 23 - Vistas do anel não magnético	37
Figura 24 - Bobina de excitação	37
Figura 25 - Vistas do freio montado.....	38
Figura 26 - Seção do freio no FEMM	39
Figura 27 - Curva de torque do freio	40
Figura 28 - Curvas de torque para o modelo realístico do fluido e considerando-o homogêneo	40
Figura 29 - Representação esquemática do LVDT.....	41
Figura 30 - Circuito de condicionamento do LVDT	42
Figura 31 - Circuito de alimentação do LVDT	43
Figura 32 - Vista frontal do medidor de torque.....	44
Figura 33 - Vista traseira do medidor de torque.....	44
Figura 34 - Interior do medidor de torque.....	45
Figura 35 - Circuito associado ao LVDT	46
Figura 36 - Esquema de funcionamento do relé reed	47
Figura 37 - Freio com adaptações.....	48
Figura 38 - Em detalhe, a ampola e o ímã do medidor de velocidade.....	49

Figura 39 - Em detalhe, LVDT com seu suporte a e a biela.....	49
Figura 40 - Em detalhe, par de molas.....	50
Figura 41 - Localização do par de molas no freio	51
Figura 42 - Vistas do freio com adaptações	52
Figura 43 - Calibração do medidor e da mola	53
Figura 44 - Curva de torque levantada em laboratório	55
Figura 45 - Comparação entre a curva de torque experimental e teórica.....	56
Figura 46 - Conjunto do freio com seus medidores e fonte de excitação da bobina	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	ELABORAÇÃO DE UM FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO.....	15
3	CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA.....	17
3.1	Circuitos magnéticos.....	17
3.2	Modelagem do fluido magneto-reológico.....	18
3.3	Geometria do entreferro.....	19
4	SIMULAÇÕES MAGNÉTICAS.....	22
4.1	Curva de magnetização.....	22
4.2	Tensão de cisalhamento.....	30
5	FREIO ELETROMECAÂNICO.....	35
5.1	Projeto do freio.....	35
5.2	Execução do freio.....	38
5.3	Resultados preliminares.....	39
5.4	Medidor de torque.....	41
5.5	Medidor de velocidade.....	47
5.6	Adaptações ao freio.....	48
5.7	Resultados finais.....	52
5.7.1	Calibração.....	52
5.7.2	Curva de torque.....	54
6	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O fluido magneto-reológico é um exemplo de material cujas propriedades reológicas podem ser alteradas com a aplicação de um campo magnético. A viscosidade pode ser variada drasticamente, dependendo da intensidade da indução magnética a que está submetido.

Este material é composto por partículas magnetizáveis (principalmente pó de ferro), tipicamente com diâmetro entre 1 e 10 μm , dispersas em um líquido. Na presença de um campo externo aplicado, as partículas se polarizam formando dipolos magnéticos e se atraem mutuamente, formando colunas rígidas ao longo do fluido alinhadas com o campo, aumentando sua viscosidade assim como sua tensão de cisalhamento. Na ausência do campo, o fluido se comporta praticamente de maneira newtoniana [1], [2], [3]. Na Figura 1 estão ilustradas as duas situações anteriormente citadas.

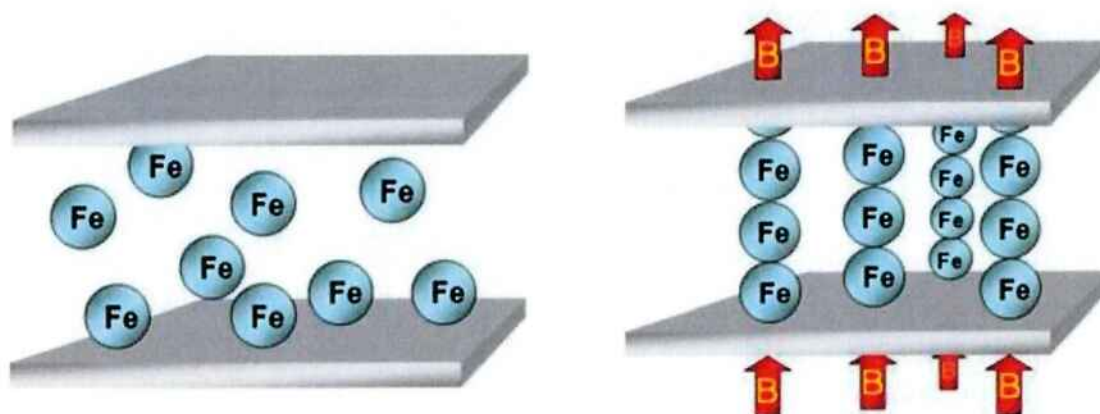


Figura 1 - Disposição do fluido magneto-reológico: à esquerda partículas dispersas, sem campo aplicado; à direita, estruturas colunares formadas pelo alinhamento das partículas sob ação do campo

Em nível microscópico, a ruptura das estruturas colunares formadas pelas partículas resulta, macroscopicamente, na tensão de cisalhamento do fluido quando estático, e numa viscosidade aparente quando em escoamento. A propriedade acima mostra que a tensão de cisalhamento e a viscosidade, portanto a reologia do fluido pode ser controlada através da intensidade do campo magnético. Além disso, a substância possui um baixo tempo de resposta, com transição da condição normal para a magnetizada e vice-versa, da ordem de milissegundos [1].

A primeira formulação de fluido magneto-reológico foi feita nos E.U.A. por Jacob Rabinow em 1948, que consistia em uma proporção mássica de 9 partes de ferro carbonila para 1 parte de óleo. A essa suspensão foi adicionada graxa para reduzir a taxa de sedimentação. Uma das propriedades mais importantes do fluido é que ele possui uma baixa viscosidade na ausência de campos magnéticos externos [3].

Atualmente, no mundo, poucas empresas comercializam este material, sendo a principal delas a americana a Lord Corporation. A Tabela 1 mostra determinadas especificações de alguns modelos de fluidos comercializados pela Lord.

Tabela 1 - Algumas especificações de fluidos magneto-reológicos comerciais

Código	Aparência	Densidade (g/ml)	Ponto de fulgor (°C)	Faixa operacional de temperatura (°C)	Teor de Ferro, por massa (%)
MRF-140CG	Líquido cinza-escuro	3.54-3.74	150	-40 a 130	72.00
MRF-132DG	Líquido cinza-escuro	2.95-3.15	150	-40 a 130	80.98
MRF-122EG	Líquido cinza-escuro	2.28	150	-40 a 130	85.44

Apesar das vantagens mencionadas, há algumas limitações e desafios para este material. O primeiro deles é o seu alto custo, chegando às cifras de US\$ 750,00 por litro, de cada um dos modelos na Tabela 1. Além disso, busca-se a maior variação possível na viscosidade com a menor concentração de partículas, para que se minimize a sedimentação, o que pode ocasionar um funcionamento inadequado do fluido. A sedimentação ocorre devido à elevada densidade do ferro, o que pode ser minimizado utilizando um surfactante. Porém, ao fazer uso dessa substância que pode ser um gel, uma graxa ou sabões metálicos, há o aumento da viscosidade inerente do fluido magneto-reológico. Aliado a isso, há o efeito da oxidação, que torna o material menos manuseável. E por fim, eventualmente surgem forças coloidais, agregando as partículas de ferro, aumentando os efeitos da sedimentação e dificultando a sua redispersão.

Os fluidos magneto-reológicos se aplicam essencialmente em dispositivos eletromecânicos onde a variação das propriedades reológicas, controlada por campo magnético, é utilizada para a obtenção de características específicas. Algumas das aplicações mais comuns são resumidas na sequência [1], [2]:

- Amortecedores controláveis para uso em sistemas de suspensão semi-ativa em veículos especiais. Nessa aplicação, o fluido de trabalho do amortecedor é o magneto-reológico ao invés do óleo convencional. Desse modo, modulando-se o campo magnético criado por bobinas alojadas próximas aos orifícios de passagem entre as câmaras do amortecedor, controla-se a viscosidade do escoamento e, portanto, a perda de carga do fluido nessa região, alterando o coeficiente de amortecimento do dispositivo. Isso permite controle em tempo real da dinâmica da suspensão veicular, produzindo um elevado nível de conforto e segurança mesmo em terrenos muito acidentados.

- Atenuadores de vibração controláveis para uso em máquinas e equipamentos sujeitos a oscilações e trepidações. É similar ao amortecedor com fluido magneto-reológico, aplicado,

por exemplo, em máquinas de lavar, bancos de veículos como grandes caminhões e ônibus, além de uso médico em próteses ortopédicas.

- Freios e embreagens eletromagnéticas que utilizam como elemento de acoplamento o atrito viscoso controlável permitido pelo fluido magneto-reológico. Nesses casos, cilindros ou discos rotativos permeados pelo fluido, se acoplam mecanicamente de forma controlada através de campo magnético produzido por bobinas. Nesses dispositivos, utilizados para aplicar carga mecânica artificial ou transmitir movimento entre eixos, a ação é extremamente suave e controlável, em oposição a outras técnicas disponíveis. Aplicam-se em aparelhos de ginástica, sistemas de direção elétrica veicular, sistemas de bobinamento de fios e filmes extremamente finos.

- Absorvedores de impacto e oscilações de grande energia, aplicados em edificações sujeitas a abalos sísmicos e em cabos de sustentação de pontes estaiadas. São também similares aos amortecedores com fluido magneto-reológico, porém concebidos para suportarem esforços mecânicos de elevada magnitude e com reduzida periodicidade.

2 ELABORAÇÃO DE UM FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO

O fluido é composto por partículas polarizadas magneticamente, um líquido que aja como veículo e agentes estabilizadores. Para as partículas, é necessária uma elevada saturação magnética para um fluido magneto-reológico forte. É recomendado o uso de ferro, por ser o segundo elemento com maior saturação magnética, atrás apenas de uma mistura de ferro e cobalto. Além disso, para que o fluido seja de boa qualidade, deve haver entre 20% e 40% em volume de partículas de ferro, idealmente entre um e dez micrômetros de diâmetro. Esse tamanho reduzido deve ser respeitado para que não haja um pronunciado assentamento ao fundo do fluido. Por outro lado, não pode ser inferior a esse valor para que o fluido não perca as suas características sem a formação das estruturas colunares de partículas [4].

O veículo utilizado normalmente é um hidrocarboneto, como por exemplo, os óleos minerais, pois são bons lubrificantes, bastante duráveis e podem ser adquiridos em uma grande faixa de valores de viscosidade, que deve ser baixa. O óleo deve possuir baixa pressão de vapor e uma larga banda de temperatura de operação.

Os agentes estabilizadores, ou surfactantes, evitam que haja uma célere sedimentação, aumentam a durabilidade e resistência à corrosão. Normalmente são utilizados sabões de metal.

Foram produzidas duas amostras iniciais, em agosto de 2013, cada uma com 20% do valor teórico recomendado para uma quantidade de aproximadamente 100mL. Na primeira delas foi utilizado óleo fino para máquinas de costura (óleo Singer, com viscosidade dinâmica 7.65×10^{-3} Pa.s, a 40°C) e na segunda, óleo isolante de transformadores (com viscosidade dinâmica 8.19×10^{-3} Pa.s, a 40°C).

Formulação básica do fluido magneto-reológico

Componentes teóricos (para 100mL):

- 150g de partículas de ferro;
- 55g de óleo lubrificante de baixa viscosidade;
- 5g de graxa branca de lítio;

Componentes utilizados (para 20mL):

- 30g de partículas de ferro (Ferro extra puro produzido pela Merck SA, 10 μ m);
- 12g de óleo lubrificante de baixa viscosidade;
- 1g de graxa branca de lítio (grau R2, produzida pela Esso);

Para as medidas foi utilizada uma balança digital disponível em um dos laboratórios do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica com resolução de medida de 2g. Para as medições de pequenas quantidades como a da graxa, foi medida uma parcela maior, compatível com a resolução da balança, e feita a divisão posterior pelo volume. Além disso, para a retirada e deposição de óleo, foi utilizada uma seringa comum, disponível em drogarias. O pó de ferro e a graxa branca foram separados cuidadosamente através da utilização de uma colher. Para a partição prévia dos componentes foram utilizados recipientes plásticos.

Depois de selecionar e separar as substâncias, a graxa foi misturada ao óleo, inicialmente de modo manual e em seguida com a utilização de um agitador motorizado, até que adquirisse um aspecto homogêneo. Depois de dois dias de repouso, foi acrescentado à mistura o pó de ferro, novamente até que adquirisse um aspecto homogêneo.

A mistura final pode ser visualizada na Figura 2.



Figura 2 - Mistura final do fluido magneto-reológico

3 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

3.1 Circuitos magnéticos

Analogamente a circuitos elétricos, que possuem como fonte a diferença de potencial de um gerador e diversos elementos como resistores, capacitores e indutores, existem também circuitos magnéticos. São constituídos por uma bobina com um número N de espiras, através da qual circula uma corrente elétrica de valor i . A partir disso, cria-se um fluxo magnético, que se propaga através do circuito magnético. Ademais, há a relutância de cada material, \mathfrak{R} , dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

Na expressão (1), l representa o comprimento médio que é transitado pelo fluxo, A designa a seção transversal que é atravessada pelo fluxo e μ , a permeabilidade magnética do material. Os três valores variam conforme os diferentes materiais que compõem o circuito magnético [5], [6], [7].

A partir das equações de Maxwell, apresentadas nas equações (2) a (5) em sua forma integral, temos:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q(V)}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \phi_{B,S}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \phi_{E,S}}{\partial t} \quad (5)$$

Em que temos os seguintes significados para os símbolos:

\vec{E} : Campo elétrico.

\vec{B} : Densidade de fluxo magnético.

$\frac{\partial}{\partial t}$: Derivada parcial com relação ao tempo.

$d\vec{S}$: Elemento vetorial diferencial da superfície de integração "S", com direção normal à essa superfície.

$d\vec{l}$: Elemento vetorial diferencial do comprimento tangente à curva "l" de integração.

μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo.

ϵ_0 : Permissividade elétrica do vácuo.

$Q(V)$: Carga elétrica em uma região definida por um volume “V” para a integração.

$\phi_{B,S}$: Fluxo magnético através de uma seção “S” definida na integração.

$\phi_{E,S}$: Fluxo elétrico através de uma seção “S” definida na integração.

I_S : Corrente de deslocamento envolvida.

Dessa forma, a força magneto-motriz, F_{mm} , é dada por:

$$F_{mm} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad (6)$$

Em que \vec{H} representa o vetor do campo magnético. Por fim, pode ser estabelecido que:

$$\mathfrak{R}\Phi = Ni \quad (7)$$

Em que Φ representa o fluxo magnético. Na Figura 3 é apresentado um modelo simples de circuito magnético.

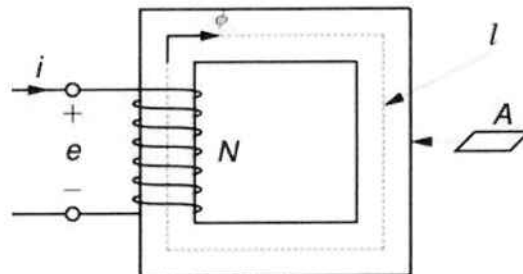


Figura 3 - Exemplo de um circuito magnético

3.2 Modelagem do fluido magneto-reológico

No projeto de iniciação científica, o fluido foi tratado de maneira uniforme, com permeabilidade magnética relativa constante e igual a $8\mu_0$ [2]. Entretanto, esta é uma aproximação que necessita ser aprimorada, por não considerar a região de saturação. Além disso, um dos objetivos deste Trabalho de Formatura é caracterizar microscopicamente o fluido.

Dessa forma, o fluido magneto-reológico foi modelado a partir de estruturas colunares formadas por agrupamentos de esferas, que representam o pó de ferro que constitui o fluido

magneto-reológico. Para tanto, foram consideradas as proporções de graxa, óleo e pó de ferro na elaboração do fluido. Para a densidade do pó de ferro foi considerado o espaçamento entre as partículas, resultando em uma densidade menor do que a do ferro. A partir desses dados é possível calcular a concentração volumétrica do pó de ferro, concluindo assim como deve ser a distribuição das estruturas colunares para um dado volume. A seguir, na Tabela 2, essas medidas são apresentadas.

Tabela 2 - Concentração volumétrica

Concentração volumétrica				
	Pó de ferro	Óleo	Graxa	Fluido
Massa (g)	150	55	5	210
Densidade (g/cm ³)	7.87	0.89	-	2.1
Volume (cm ³)	19.05	61.80	-	100
Concentração (%)	19.05	-	-	-

A concentração volumétrica do pó de ferro foi calculada pela equação 8.

$$C(\%) = \frac{V_{pó\ de\ ferro}}{V_{fluido}} * 100 \quad (8)$$

O valor a concentração do pó de ferro é diferente daqueles abordados na literatura [3], [4]. Isso se deve ao fato de que para o valor da densidade do pó foi adotado o valor da densidade do ferro. Entretanto, devido aos espaçamentos entre as partículas e à existência de ar nesses espaçamentos há diferença nos valores de densidade. Essa aproximação foi adotada por ausência de dados concretos dessa grandeza para o pó de ferro. Assim, a partir do valor teórico foi definida a modelagem microscópica do fluido magneto-reológico.

O processo seguinte foi realizado visando uma simulação magnetostática em 2D, para levantamento da curva de magnetização.

3.3 Geometria do entreferro

A dimensão das microesferas que constituem o pó de ferro é definida em 10µm, conforme as especificações do fabricante desse material, que foi utilizado na elaboração do fluido magneto-reológico. Além disso, foi adotado um espaçamento mínimo vertical entre as esferas, para que a malha de elementos finitos pudesse ser definida, dando prosseguimento à simulação. Este processo será explicado mais adiante neste relatório.

Para a região de entreferro, foram definidas as dimensões de altura e largura de forma que houvesse uma boa amostragem da microestrutura do fluido. Dessa forma, foi arbitrado

que houvesse 75 colunas com 20 esferas em cada. A partir dessas definições, foi gerada a Tabela 3.

Tabela 3 - Dados geométricos do entreferro

Dados geométricos		
Diâmetro esfera	10	μm
Espaçamento	0.5	μm
Quantidade de esferas por coluna no plano XY	20	-
Quantidade total de colunas no plano XY	75	-
Quantidade total de colunas no plano YZ	75	-
Volume de cada esfera	523.60	μm ³
Quantidade total de esferas	112500	-
Volume total de esferas	0.0589	mm ³
Profundidade	0.8720	mm
Largura	0.8720	mm
Altura	0.2105	mm
Volume total	0.1546	mm ³

O volume de cada esfera foi calculado a partir da equação (9).

$$V_e = \frac{\pi * D^3}{6} \quad (9)$$

Em que D representa o diâmetro de cada esfera no plano. A quantidade total de esferas foi calculada a partir da equação (10).

$$N = N_{ec} * N_c * N_c \quad (10)$$

Na qual N_{ec} representa o número de esferas por coluna e N_c , o número de colunas nos planos XY e YZ, que foram definidos como iguais. Portanto, o volume total das esferas no entreferro pode ser obtido pela equação (11).

$$V_t = N * V_e \quad (11)$$

Dessa forma, o volume total do entreferro foi calculado pela equação (12).

$$V_{ef} = \frac{V_t}{C} \quad (12)$$

Em que C representa a concentração volumétrica de 39% teórica encontrada na literatura [2][3]. A altura do entreferro foi calculada a partir da equação (13).

$$h = N_{ec} * (D + e) - e \quad (13)$$

Em que e representa o espaçamento entre as esferas. Por fim, a largura é calculada na equação (14).

$$l = \sqrt{\frac{V_{ef}}{h}} \quad (14)$$

Conforme definido anteriormente, a largura possui mesmo valor que a profundidade, de forma que:

$$p = l \quad (15)$$

Por fim, salienta-se que foi adotada uma escala para que o entreferro pudesse ser mais bem representado na simulação magnética. Essa razão foi a seguinte: 1mm no desenho corresponde a 10 μ m na realidade, ou seja, uma escala de 100:1.

4 SIMULAÇÕES MAGNÉTICAS

Nesta etapa foi levantada a curva de magnetização do fluido magneto-reológico (curva BH), além da tensão de cisalhamento no fluido em função da indução magnética. Para tanto, foi utilizado o programa FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), na versão 4.2, um software livre que realiza simulações magnetostáticas através do método dos elementos finitos. Nesse caso, o problema foi tratado de forma planar, uma vez que o software permite apenas simulações em duas dimensões. Entretanto, foi adotada uma consideração para que essa simulação retratasse a situação real, que será explicada posteriormente neste relatório.

4.1 Curva de magnetização

Um dos parâmetros necessários é definir quais serão as características de cada região fechada, determinando as propriedades do material que ocupa cada região. Para a modelagem do fluido magneto-reológico, cada esfera foi definida como sendo constituída por um material de características magnéticas semelhantes àsquelas do pó de ferro, o aço carbono. Além disso, a região entre as esferas, que é constituída por óleo, foi definida como ar para a simulação. Isso é possível porque as duas substâncias são semelhantes no aspecto magnético. Além disso, o circuito magnético completo, representado na Figura 4, é constituído por aço 1020, a bobina de cobre e pelo fluido magneto-reológico.

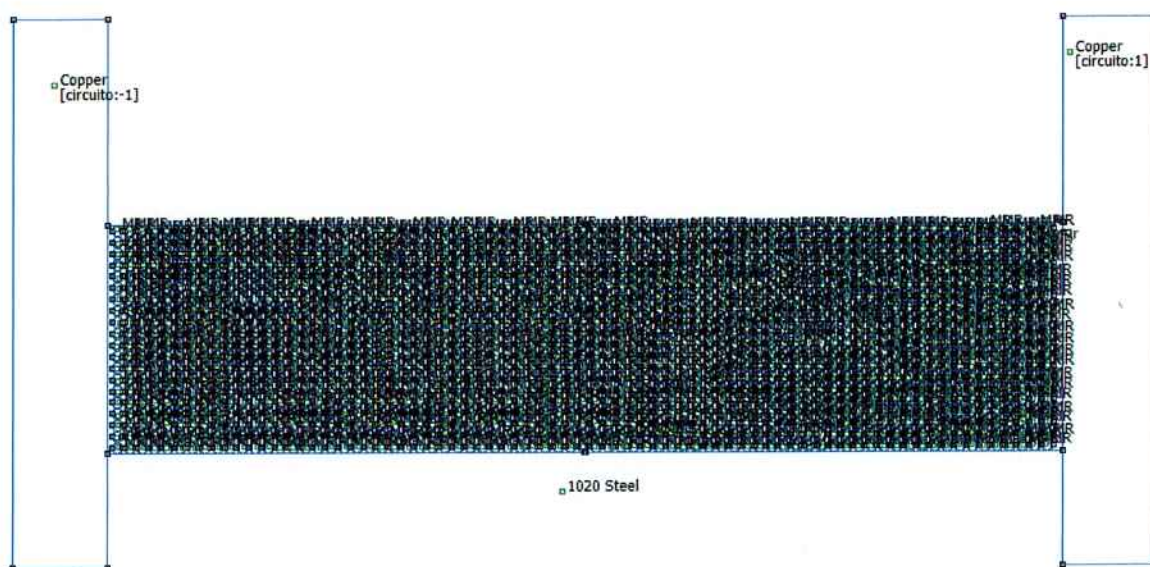


Figura 4 - Circuito a ser simulado no FEMM

Para melhor visualização, o entreferro é representado na Figura 5.

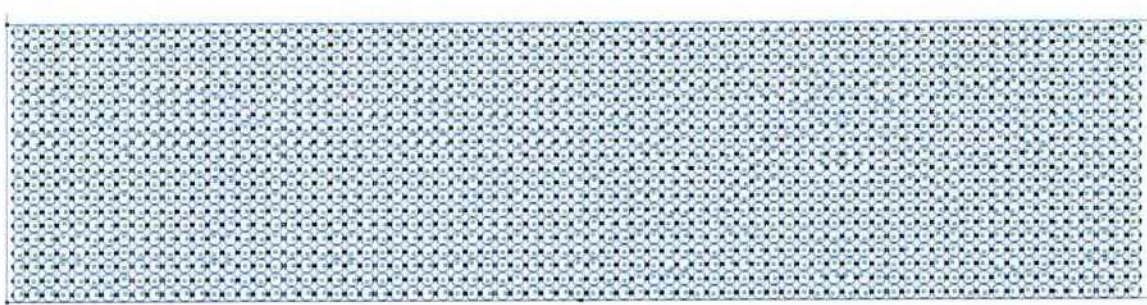


Figura 5 - Entreferro formado por fluido

O processo de simulação é feito através da criação de uma malha de elementos finitos para a resolução do problema, conforme indicado pela Figura 6.

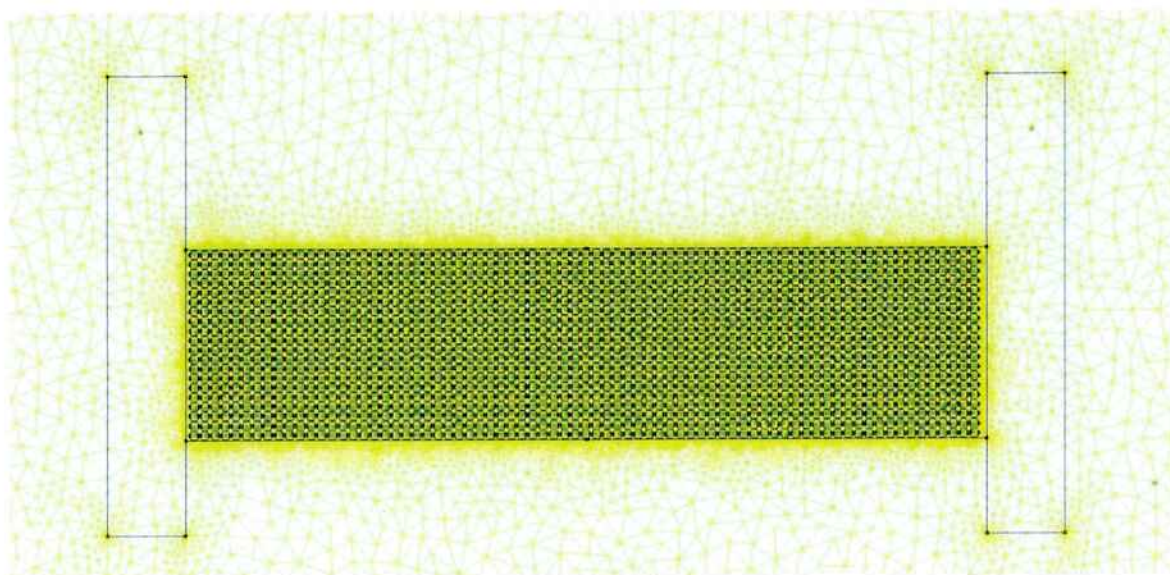


Figura 6 - Malha de elementos finitos

Em seguida, o software FEMM desenvolve a solução a partir da malha definida anteriormente. O resultado pode ser visualizado a partir das linhas de campo magnético, da densidade de fluxo magnético, conforme as figuras seguintes.

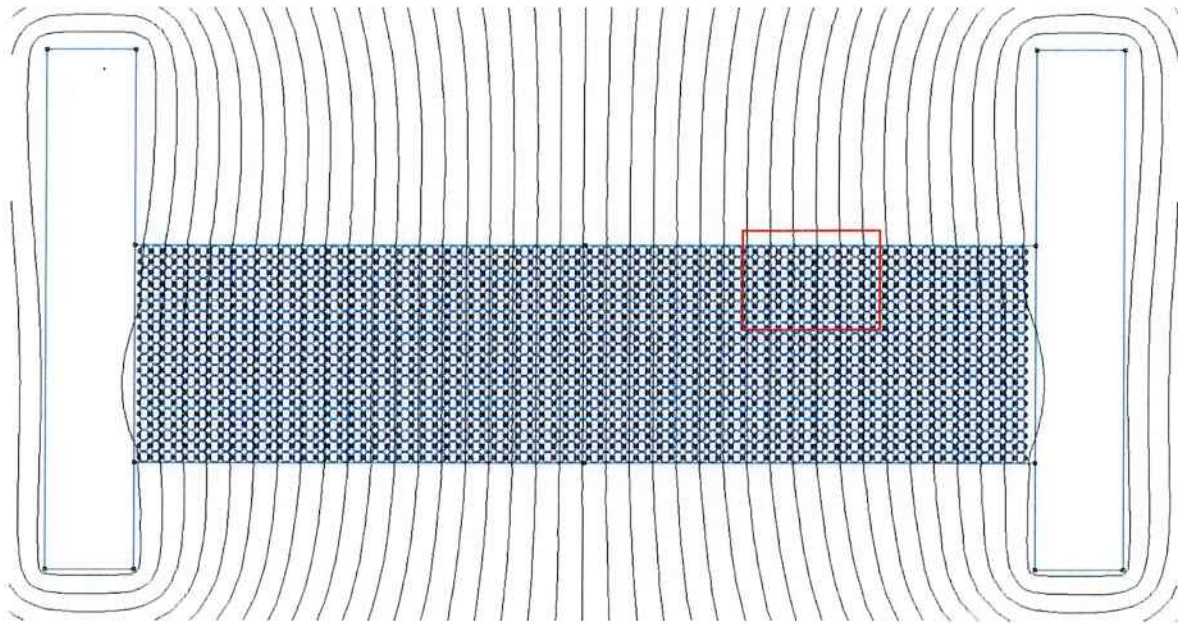


Figura 7 - Linhas de indução no circuito

A região em destaque na Figura 7 é indicada na Figura 8, a fim de se obter a visualização das linhas de campo magnético através das estruturas colunares do fluido.

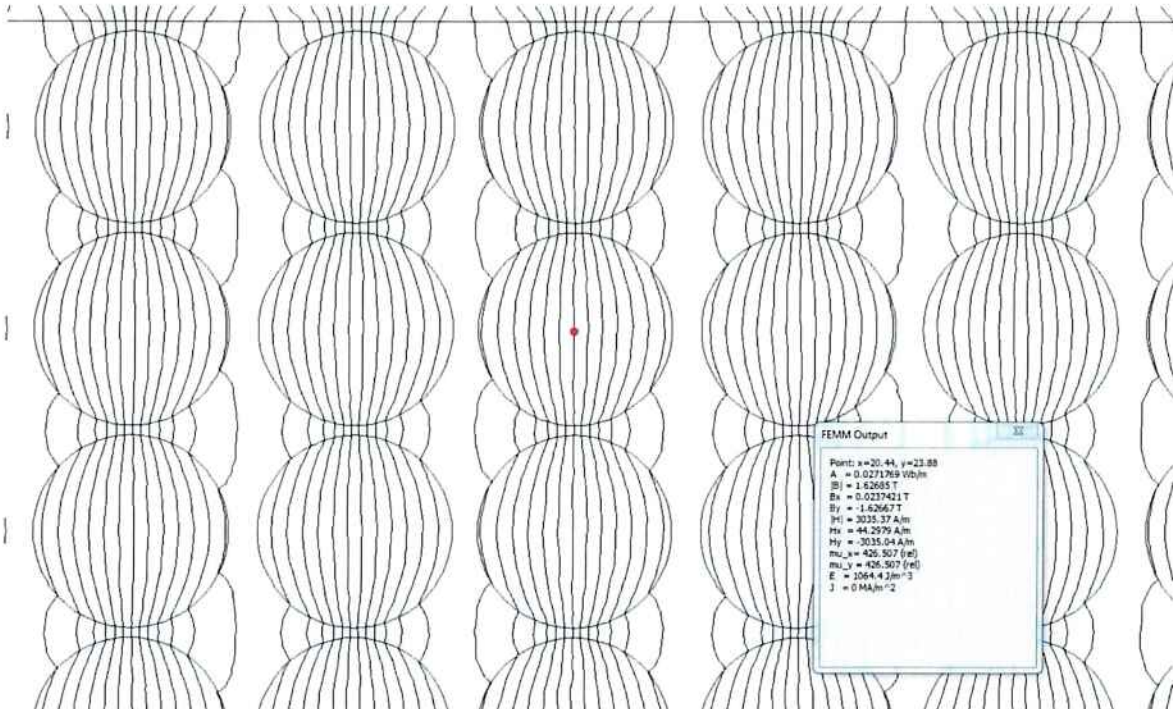


Figura 8 - Linhas de campo na estrutura do fluido

Foi gerado um relatório de dados para o ponto em destaque na Figura 8. O valor da indução no centro da esfera corresponde a 1.63T, para 4000A.espiras de força magneto-motriz gerada pela bobina. Esse valor de densidade de fluxo magnético corresponde ao valor máximo de indução para uma linha horizontal radial na esfera.

Por fim, na Figura 9 e na Figura 10 é representada a densidade de fluxo magnético no circuito, em escalas de cores. Quanto mais próximo da cor vermelha, maior será a indução magnética na região. De forma semelhante, quanto mais próximo do tom azulado, menor será a densidade de fluxo magnético na região em questão.

Como esperado, é possível notar pela Figura 9 que na bobina há baixa indução magnética, uma vez que praticamente não há linhas de campo magnético nesse local, conforme indicado anteriormente na Figura 7. Além disso, na região do entreferro há maior densidade de fluxo magnético nas estruturas colunares de esferas, indicada na Figura 10, em consonância com as linhas de campo magnético apresentadas na Figura 8.

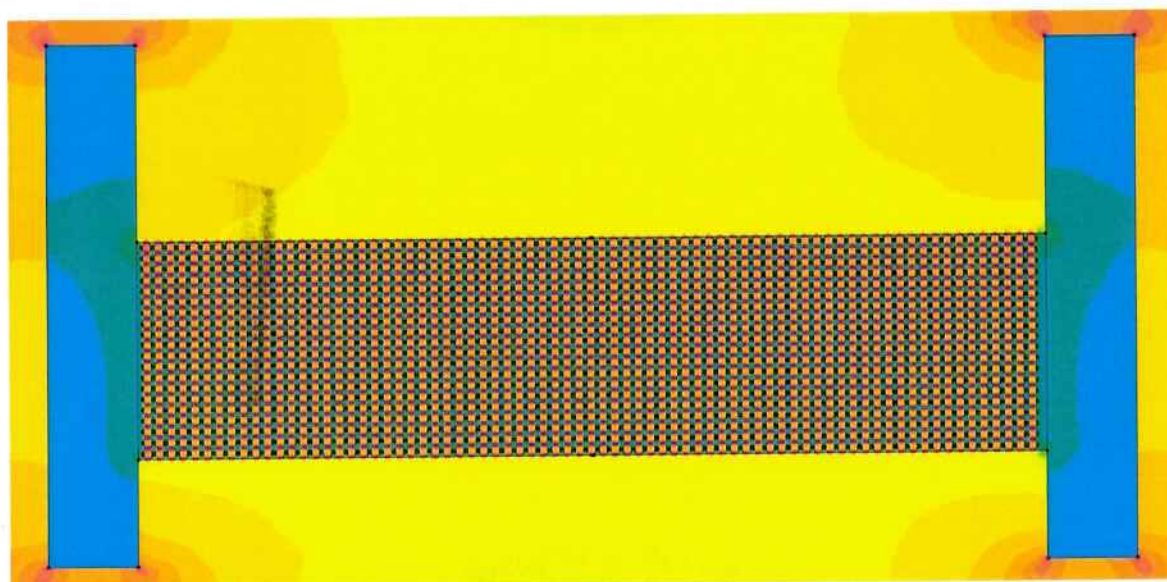


Figura 9 - Densidade de fluxo magnético no circuito

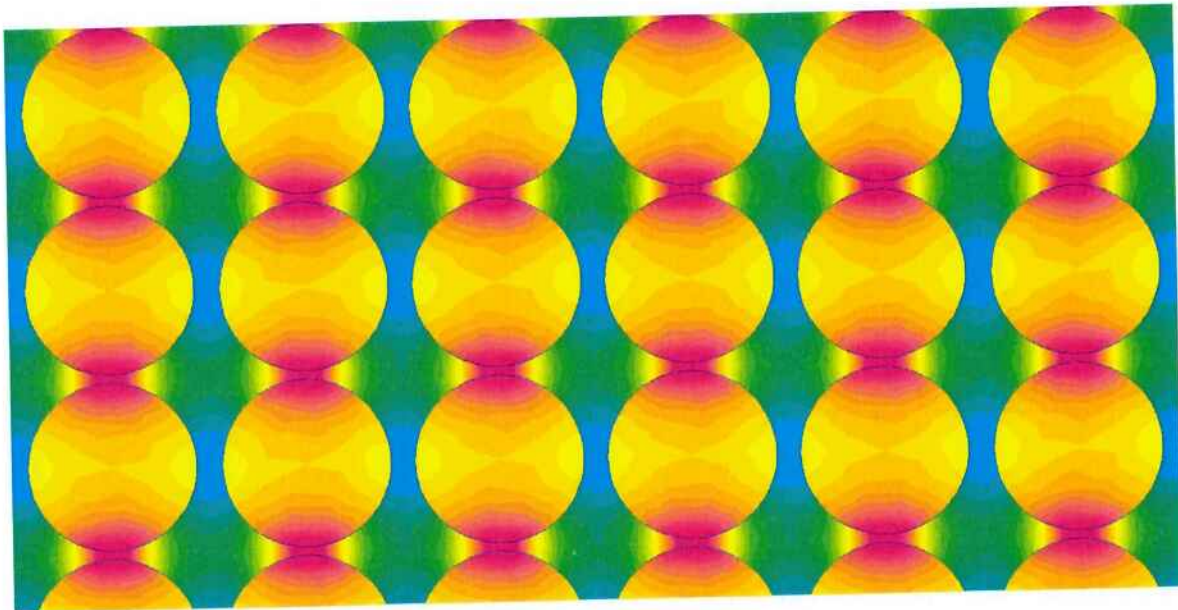


Figura 10 - Densidade de fluxo magnético no entreferro

A caracterização do fluido foi realizada a partir da curva de magnetização (curva BH). Para que isso pudesse ser realizado, foram levantados os seguintes dados: a indução magnética média na seção transversal do entreferro, o campo magnético que percorre o fluido, e a força magneto-motriz através do fluido. Além disso, foi auferido o valor máximo da indução magnética nas esferas, para que se pudesse calcular o fator de forma, cujo valor é fundamental na consideração tridimensional do fluido. Como a simulação é planar, ao invés de esferas, o software simula como se fossem cilindros, de forma que a densidade de fluxo magnético no plano YZ é constante. Para corrigir esse efeito, é calculado o fator de forma. A variação da indução ao longo da seção do entreferro é apresentada na Figura 11.

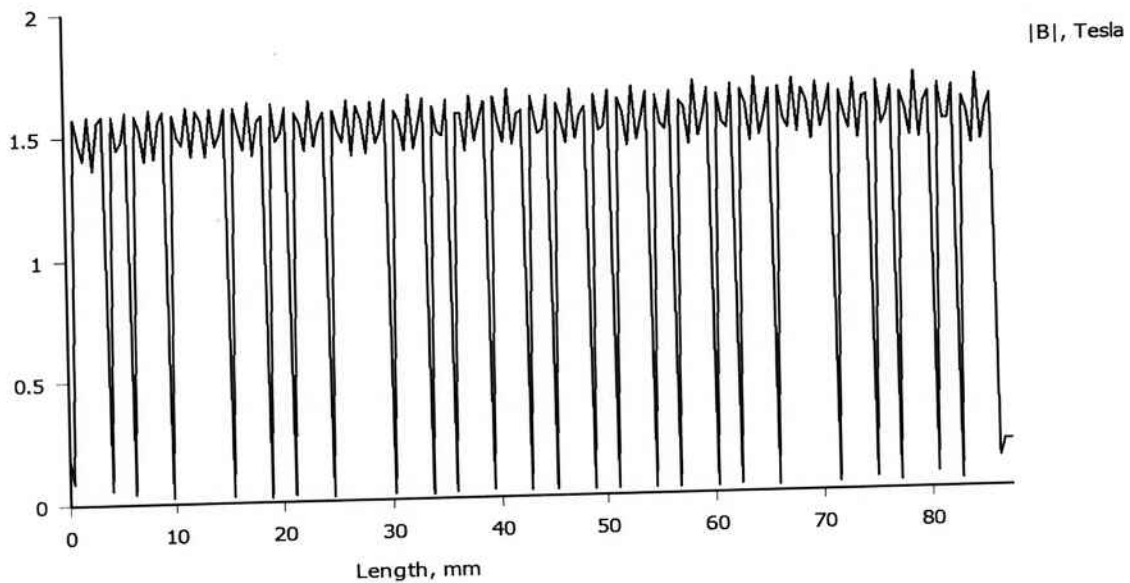


Figura 11 - Indução ao longo do entreferro

Para o levantamento dos dados citados anteriormente variou-se a corrente elétrica na bobina. A fim de automatização do processo, foi utilizada a linguagem de programação LUA, que possui interação com o software FEMM. Através desse processo é possível garantir que todos os dados são auferidos nos mesmos pontos geométricos. Dessa forma, são apresentadas na Figura 12 e na Figura 13, retratando a curva BH e a variação da permeabilidade relativa com o campo magnético, apenas na situação bidimensional. O valor da permeabilidade magnética relativa foi calculado ponto a ponto, através da equação (16):

$$\mu_{rel} = \frac{B}{H} * \frac{1}{\mu_0} \quad (16)$$

Em que:

μ_{rel} : Permeabilidade magnética relativa do fluido magneto-reológico.

μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo.

B : Indução magnética média no fluido magneto-reológico.

H : Campo magnético no fluido magneto-reológico.

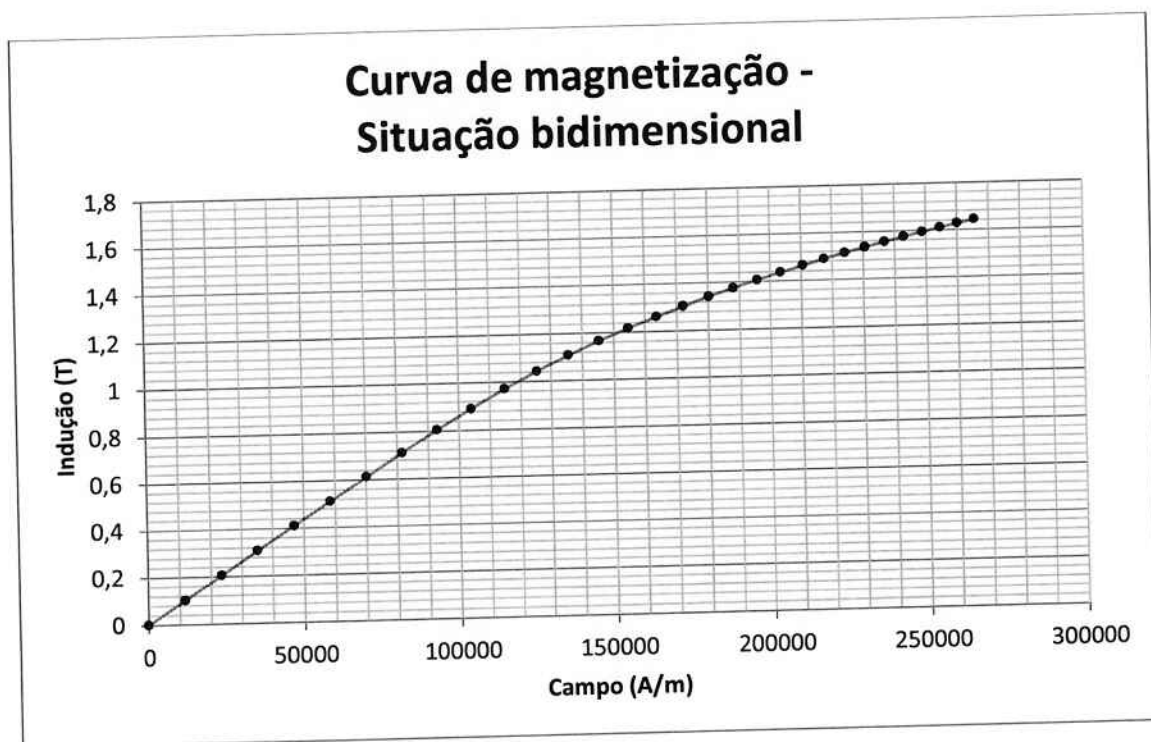


Figura 12 - Curva BH com consideração bidimensional

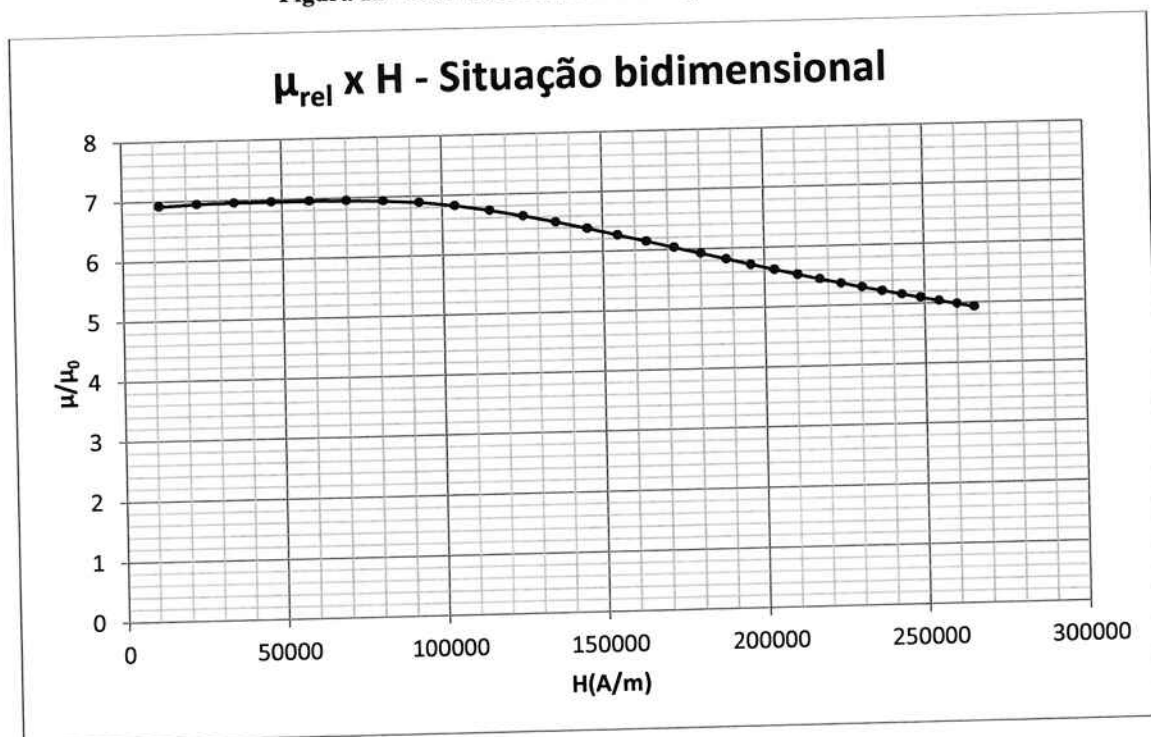


Figura 13 - Permeabilidade relativa para situação bidimensional

Para cada ponto foi aferido o valor da indução média, $B_{m\u00e9dio}$, e da indução m\u00e1xima, $B_{m\u00e1x}$, ao longo da se\u00e7\u00e3o transversal do entreferro. Dessa forma, o fator de forma foi calculado

pela equação (17). O valor resultante para todos os pontos foi de 0.87. Esse valor foi utilizado como um multiplicativo à indução magnética da situação bidimensional, para obter os valores reais, da situação tridimensional.

$$f = \frac{B_{médio}}{B_{máx}} \quad (17)$$

Portanto, foi possível levantar a curva BH e o comportamento da permeabilidade magnética relativa com a situação tridimensional, apresentadas na Figura 14 e na Figura 15.

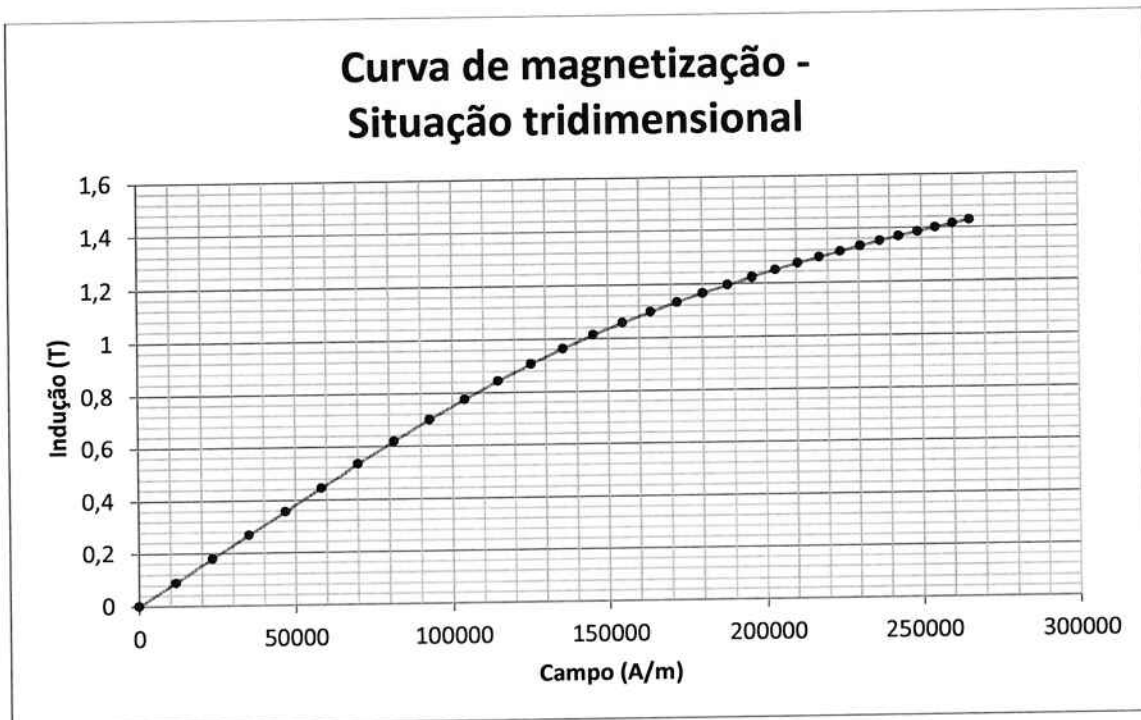


Figura 14 - Curva BH com consideração tridimensional

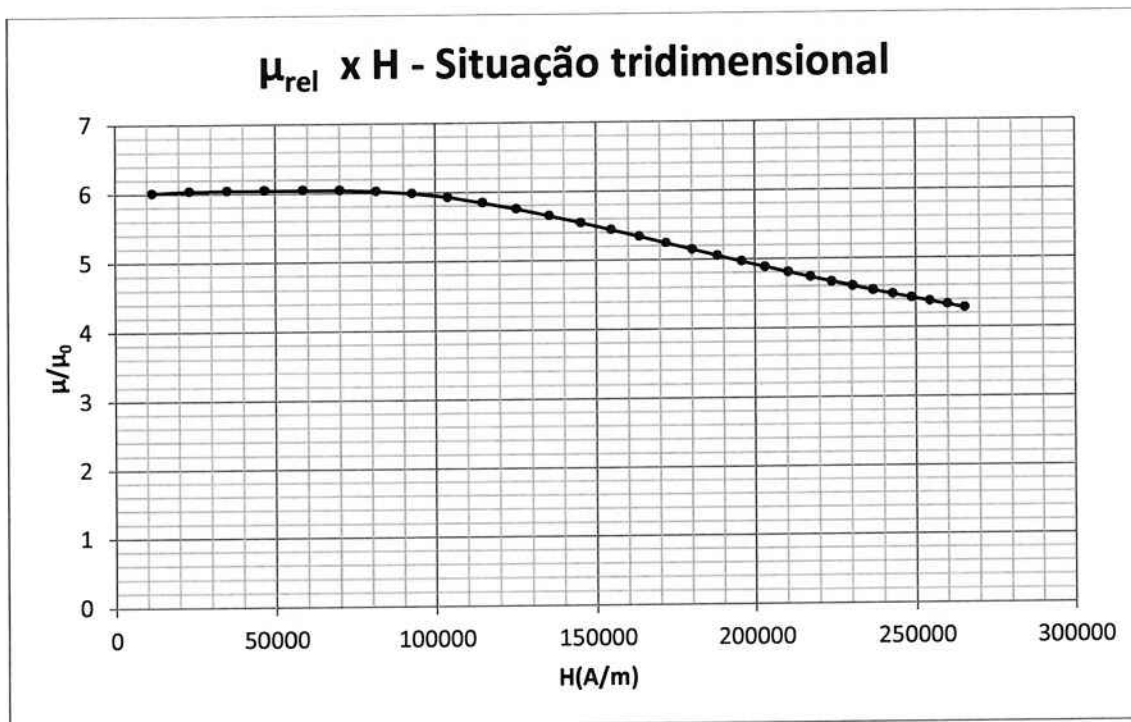


Figura 15 - Permeabilidade relativa para situação tridimensional

4.2 Tensão de cisalhamento

Nesta etapa do trabalho foi levantada a curva de tensão de cisalhamento em função da densidade de fluxo magnético, para o caso estático. A tensão de cisalhamento no fluido resulta de forças de relutância devido à separação das estruturas colunares entre si. Dessa forma, deslocou-se metade da estrutura colunar do fluido em relação ao seu ponto original, conforme Figura 16, que indica o modelo do fluido apresentado anteriormente.

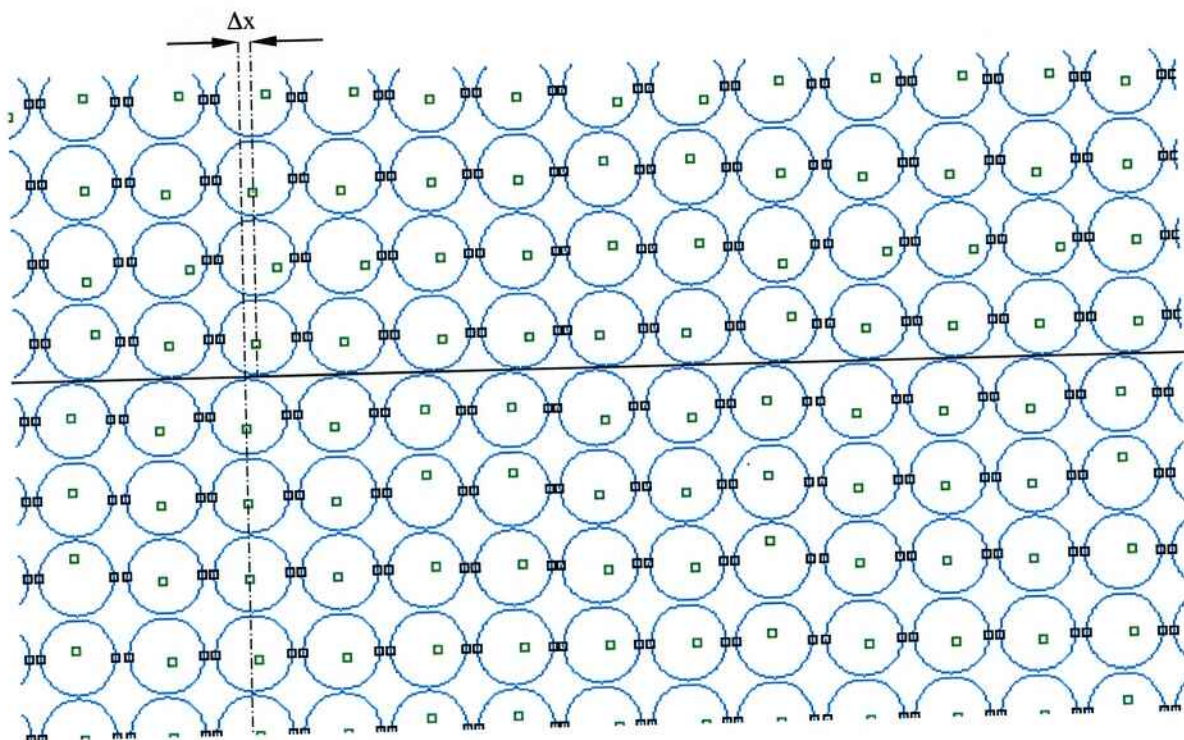


Figura 16 - Deslocamento das estruturas colunares

Esse deslocamento foi realizado gradativamente, de forma a se obter o valor máximo da tensão de cisalhamento em cada caso, mantendo-se a força magneto-motriz constante, através de simulações. Em cada uma das situações foi obtida, através do software FEMM, a tensão de cisalhamento através de uma linha horizontal entre o deslocamento das colunas. A curva que representa essa variação é indicada na Figura 17.

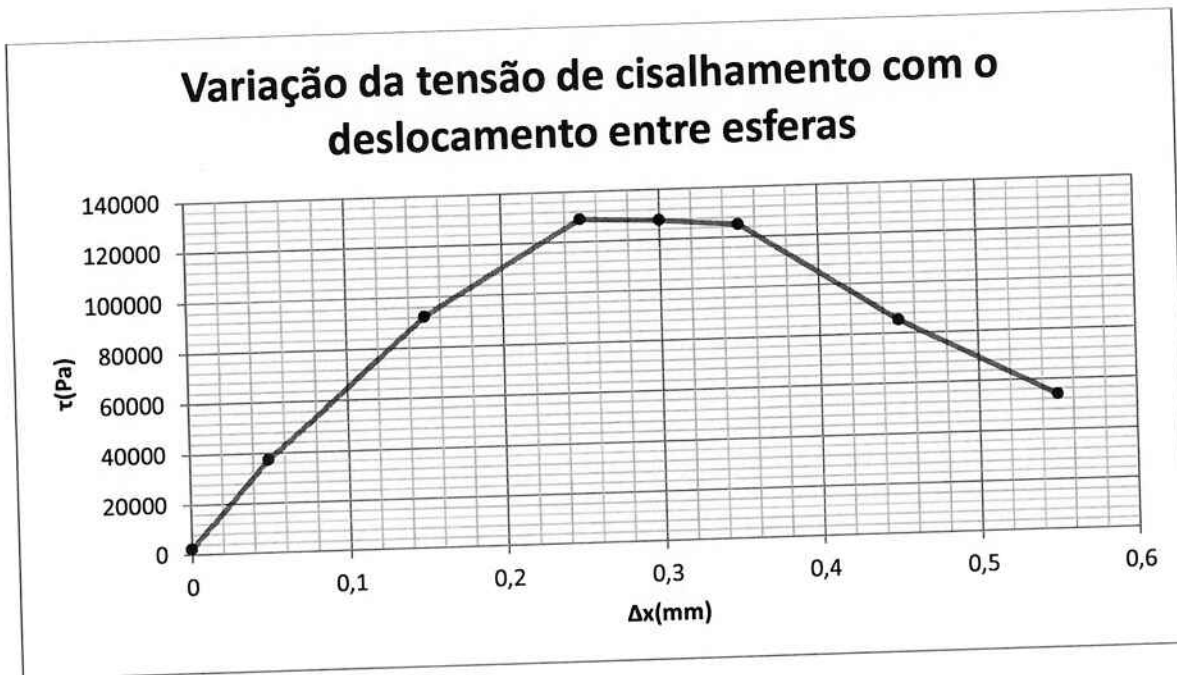


Figura 17 - Tensão de cisalhamento em função do deslocamento entre as colunas

A partir desses resultados, foi possível realizar simulações mantendo o deslocamento vertical entre as colunas no valor de 0,25mm na escala do desenho, correspondendo a 2,5 μ m reais. Variou-se então gradativamente a indução magnética através da corrente de excitação do circuito, e a tensão de cisalhamento foi novamente medida, da mesma forma como feito anteriormente. A curva resultante dessas simulações é indicada na Figura 18.

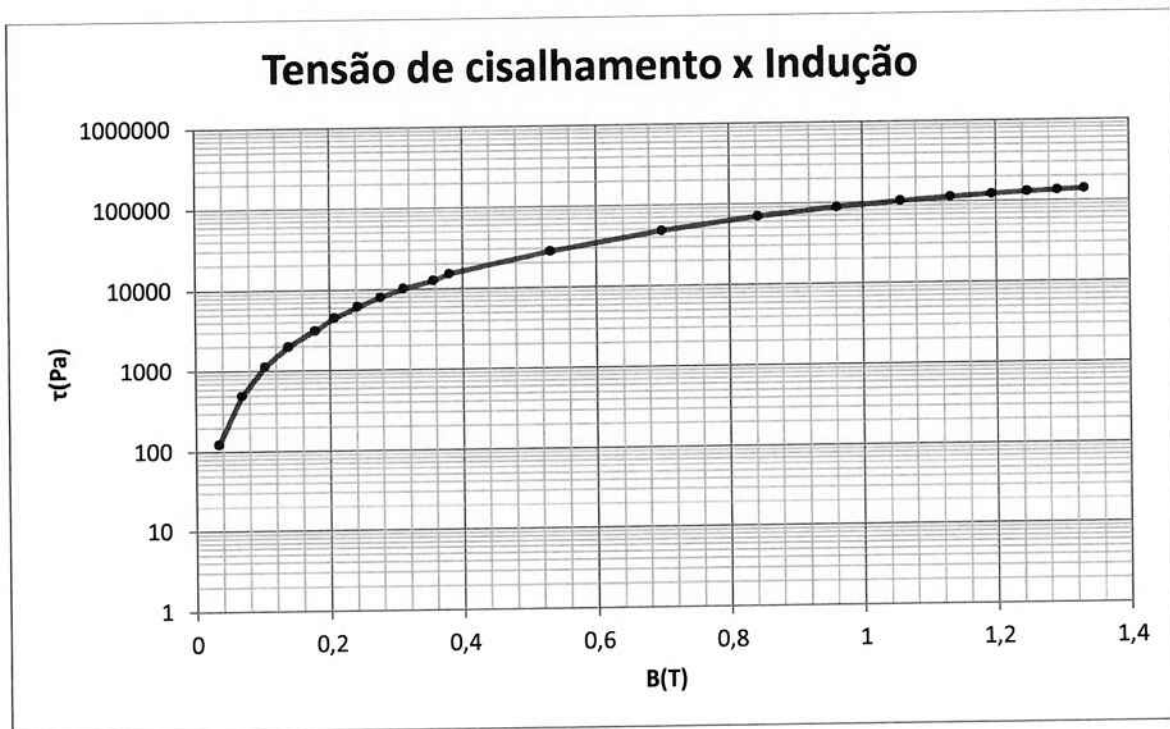


Figura 18 - Tensão de cisalhamento em função da indução magnética

Além disso, foi comparado o levantamento de dados teórico nesse projeto com as curvas levantadas anteriormente durante o projeto de iniciação científica, ilustrado na Figura 19.



Figura 19 - Comparação das curvas de tensão de cisalhamento

Nota-se na Figura 19 que há uma grande proximidade entre as curvas levantadas a partir das amostras com óleo Singer e com óleo de transformador. Por outro lado, a curva obtida com os dados simulados apresentou-se diferente daquelas obtidas experimentalmente, indicando imprecisões no modelo adotado para a quantificação da tensão de cisalhamento, através de forças de relutância na separação das partículas magnéticas. Por outro lado, o aspecto geral das curvas é semelhante, indicando que um modelo mais refinado a partir do atual deve ser elaborado.

5 FREIO ELETROMECAÂNICO

5.1 Projeto do freio

O freio consiste em um equipamento dinamométrico controlado através do fluido magneto-reológico em seu interior. O freio utilizará uma bobina que será excitada, a fim de induzir campo magnético no líquido. Sua aplicação mais comum é para aplicar carga mecânica e medir o conjugado e potência de motores e moto-redutores, principalmente de baixa rotação e elevado torque.

Para o projeto, foi aproveitado parte do trabalho sobre embreagens, de Felipe Estrella Barros [9]. Dessa forma, as dimensões do freio estavam previamente definidas, sendo representadas e especificadas a seguir. As partes e componentes principais, como rotor, estator e bobina, foram reutilizados, com pequenas modificações mecânicas por meio de usinagem. Foram projetados e construídos a base e o sistema de apoio e suporte, como os pedestais e os mancais de apoio. A estrutura magnética foi simulada e foram feitos os cálculos de previsão dos torques capazes de serem produzidos pelo freio.

A descrição dos componentes segue abaixo:

- Cubo 1:

Peça constituída por aço SAE1020. Possui um disco acoplado a uma luva, a qual abriga o mancal, que é constituído por dois rolamentos e um retentor. O disco possui seis furos espaçados entre si de 60°, por onde passam os parafusos de fixação. Há também um furo por onde passa o fio de alimentação da bobina eletromagnética. Além disso, há um rolamento externo, que foi fixado em uma base utilizada para suporte. Por fim, há um eixo acoplado um disco solidário, suportado pelo mancal, e que constitui a parte onde o torque de reação será produzido.

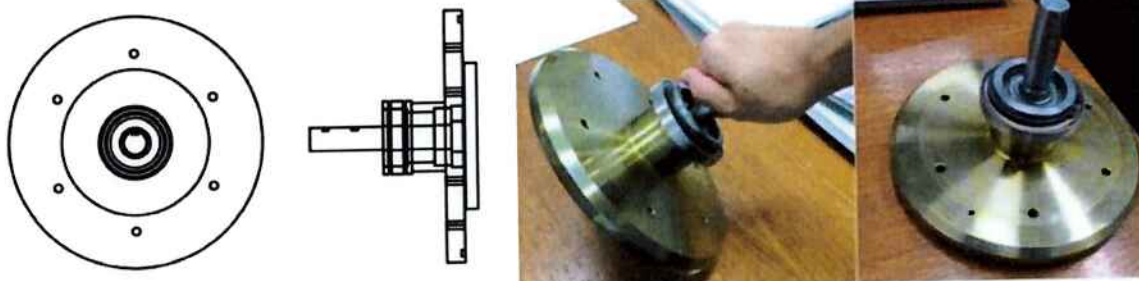


Figura 20 - Vistas do cubo 1

- Cubo 2:

Seu material também é aço SAE1020. Possui um disco acoplado a uma luva, que possui seis furos com as mesmas características de diâmetro, espaçamento e distância em relação ao eixo de simetria, por onde passam os parafusos de fixação. Criou-se também o canal para fixação do anel externo de aço. Dois furos com rosca cônica e diametralmente opostos foram introduzidos, utilizados para a inserção do fluido na embreagem. Os furos são fechados e vedados com bujões. Além disso, possui um rolamento externo, para fixação a uma base que foi utilizada.



Figura 21 - Vistas do cubo 2

- Anel externo:

Com o objetivo de fechar o caminho do fluxo magnético e proteger a bobina eletromagnética, introduziu-se um disco radialmente externo à bobina eletromagnética. Esse disco possui canais laterais circunferenciais que se encaixam nos cubos 1 e 2. Seu material constituinte é aço SAE1020.

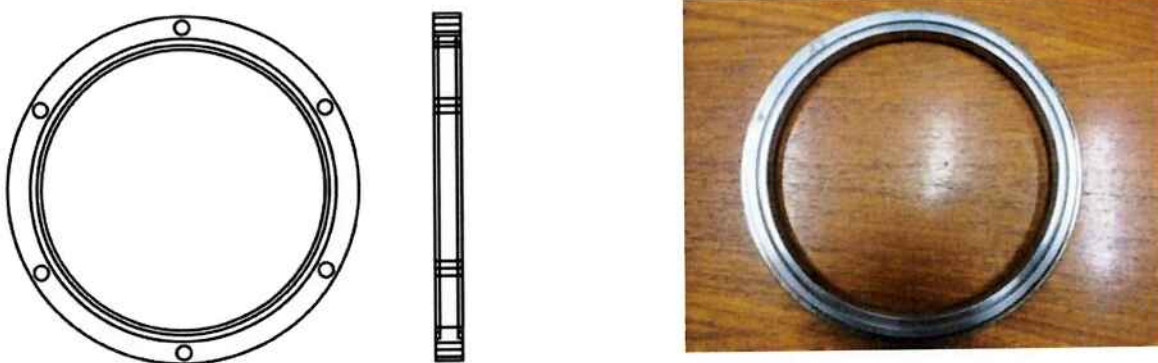


Figura 22 - Vistas do anel externo

- Anel não magnético:

Para que ocorra concatenação do fluxo magnético pelos filmes do fluido magneto-reológico e seção lateral do disco ligado ao eixo móvel, introduziu-se um disco de material não magnético no raio diretamente inferior ao da bobina eletromagnética. O disco possui seis furos com as mesmas características de diâmetro, espaçamento e distância do eixo em relação aos furos dos cubos 1 e 2, por onde passam os parafusos de fixação. O anel também possui um canal em cada lateral, cujo objetivo é alojar o rings de vedação, os quais impossibilitam o vazamento do fluido para fora de sua câmara.

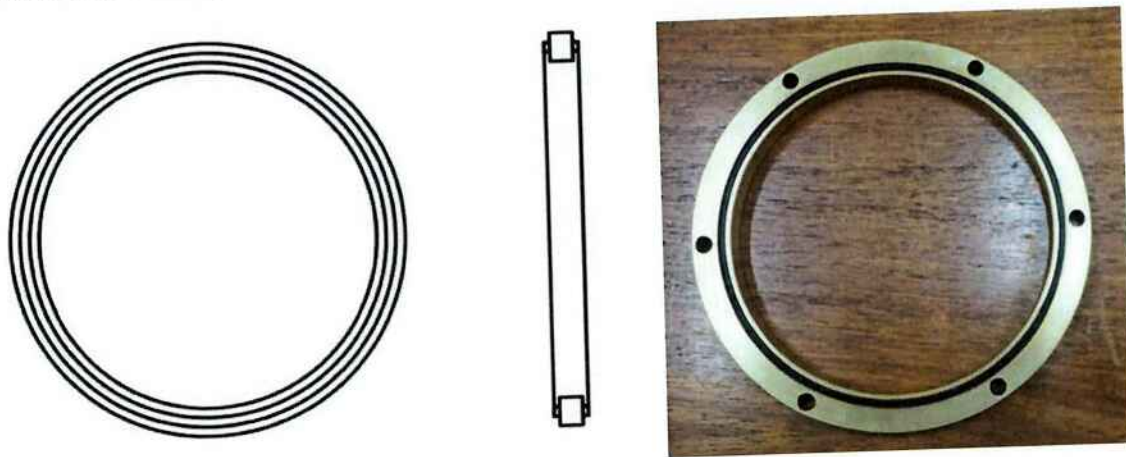


Figura 23 - Vistas do anel não magnético

Além disso, foi utilizada uma bobina de 290 espiras, com fio de cobre de seção 26 AWG e de resistência de 28.8Ω , ilustrada na Figura 24.



Figura 24 - Bobina de excitação

5.2 Execução do freio

A partir da montagem das partes do freio, indicada na Figura 25, foi introduzido fluido magneto-reológico à base de óleo de transformador, que foi produzido em abril de 2014 em quantidades maiores que as amostras anteriores. Isso decorre do volume de aproximadamente 72mL que ele irá preencher no freio e considerando as perdas de líquido por adesão, no momento de transposição do recipiente em que ele foi produzido para o freio.

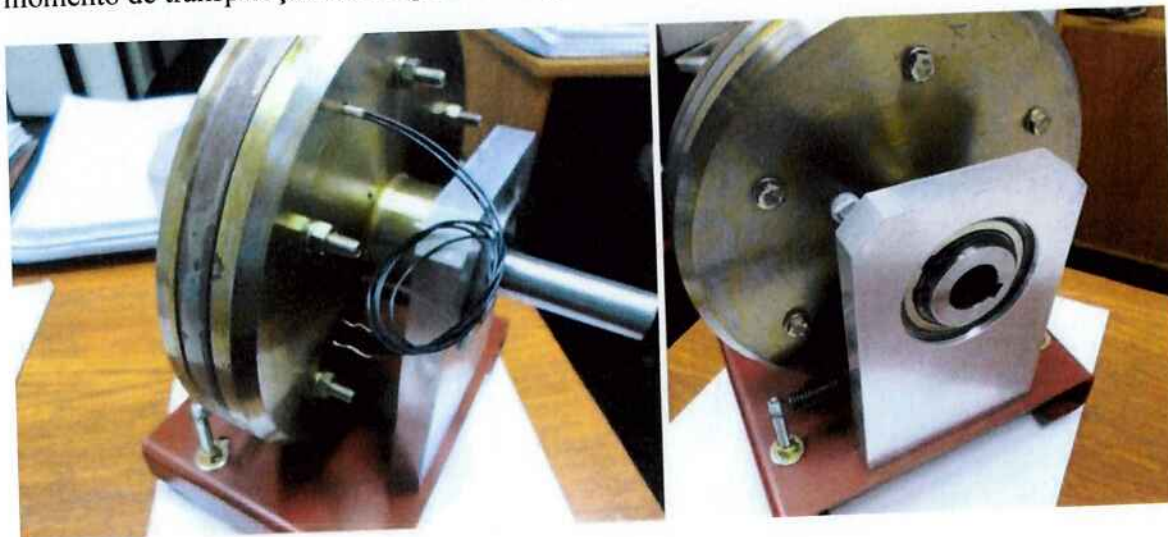


Figura 25 - Vistas do freio montado

Dessa forma, utilizando a mesma composição e métodos de preparação, foi feito um fluido com as seguintes quantidades:

- 240g de partículas de ferro;
- 96g de óleo de transformador;
- 8g de graxa branca de lítio;

Por fim, para o preenchimento do freio, foi utilizada uma seringa acoplada a uma pequena mangueira para a retirada de ar do interior do dispositivo. Porém, ainda assim houve dificuldade em obter o resultado esperado, pois eventualmente pode ter ocorrido a formação de bolsões de ar, prejudicando o total preenchimento da câmara com o fluido, o que pode afetar parcialmente as medidas.

5.3 Resultados preliminares

A partir da geometria do freio foram realizadas simulações magnéticas a fim de se levantar a curva de torque do equipamento. No software FEMM, a região do fluido foi definida a partir da curva de magnetização obtida previamente. Novamente, foi abordado um problema de circuito magnético, porém, dessa vez com simetria em relação a um eixo (axissimétrico). Na Figura 26 é indicado o circuito a ser simulado no FEMM.

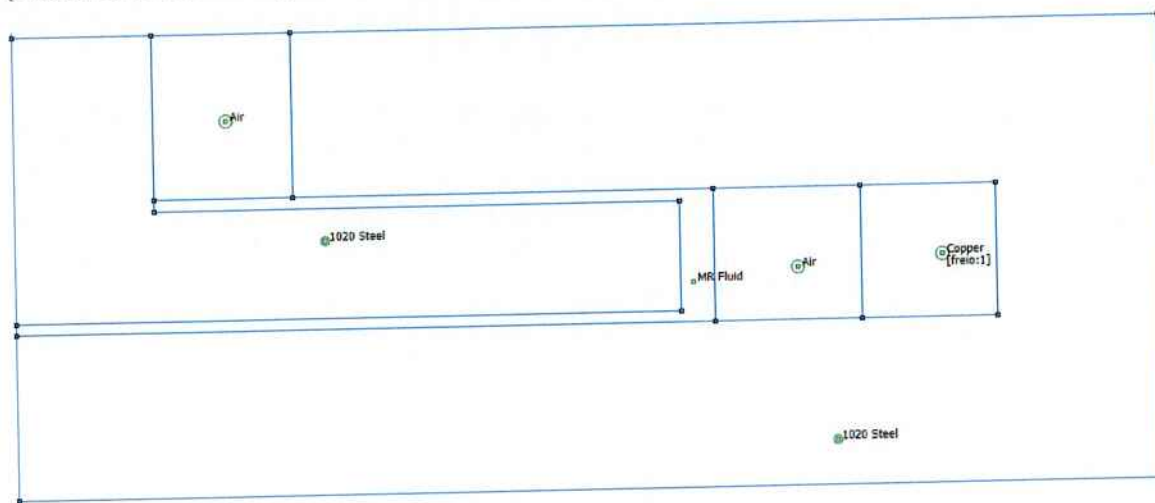


Figura 26 - Seção do freio no FEMM

As análises magnetostáticas foram feitas da seguinte maneira: através do software de simulações magnéticas FEMM variou-se a corrente elétrica nas espiras, obtendo-se a densidade de fluxo magnético em diferentes pontos. O processo de simulação foi otimizado utilizando a linguagem de programação LUA para a automatização dos comandos no FEMM. A simulação foi realizada subdividindo o espaço em que o líquido está contido em 20 diferentes regiões. O torque em cada local foi calculado a partir da força tangencial naquela região - fornecida no resultado da simulação - e do raio médio de rotação de cada local. Integrando-se o torque resultante em cada uma dessas regiões, obteve-se o conjugado total.

Nas figuras seguintes são apresentadas as curvas de torque para duas situações: a primeira, correspondendo à atual simulação; a segunda, comparando uma simulação feita durante a iniciação científica, considerando $\mu=8$ para a permeabilidade relativa do fluido e a simulação atual. Nota-se através das curvas que há pouca diferença entre as duas situações.

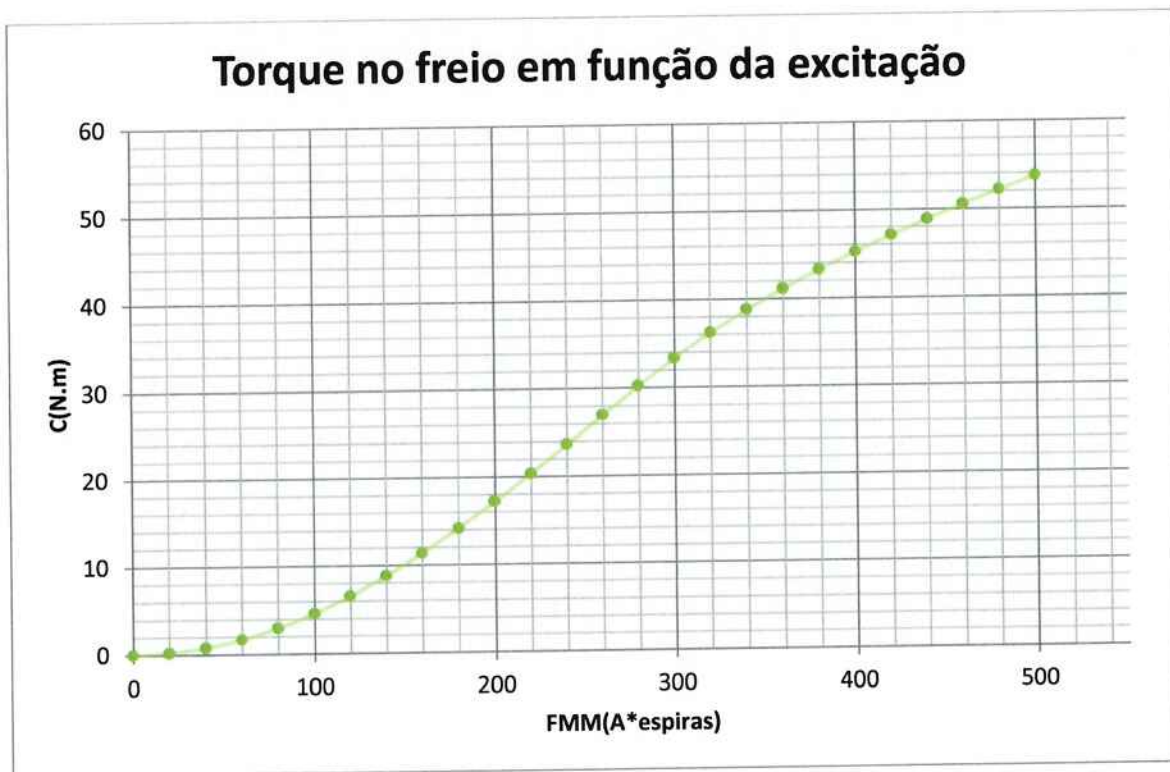


Figura 27 - Curva de torque do freio

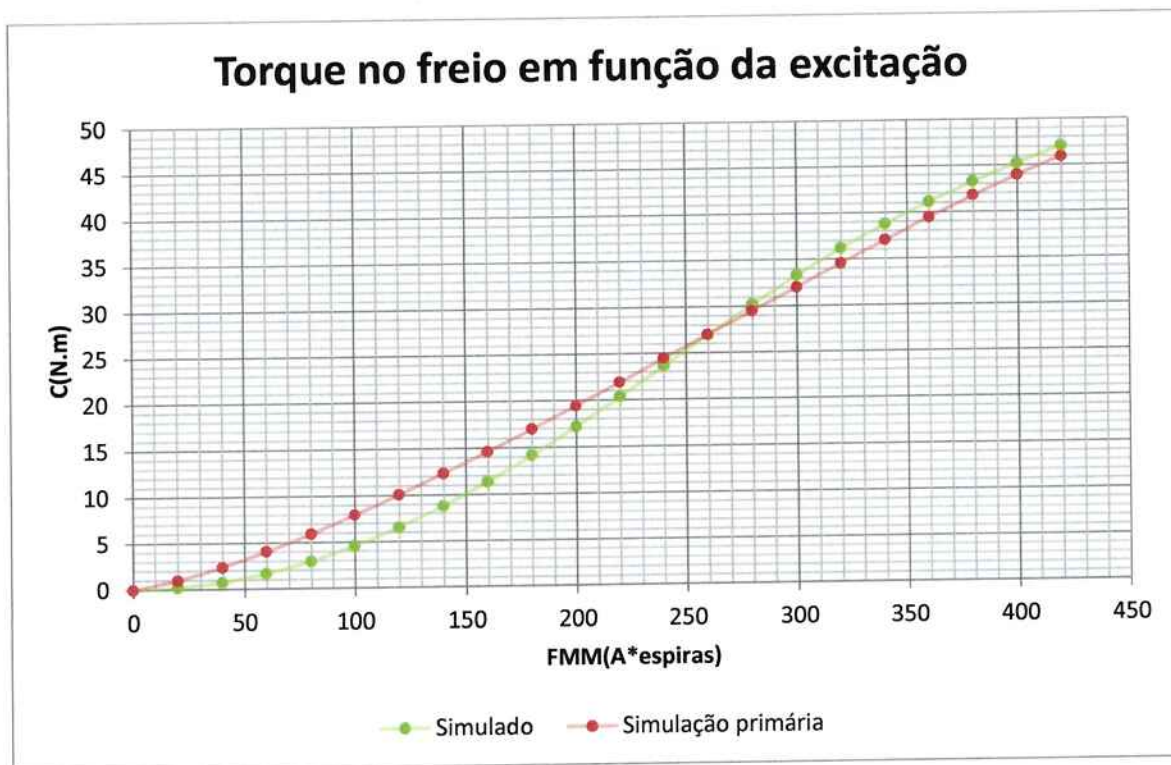


Figura 28 - Curvas de torque para o modelo realístico do fluido e considerando-o homogêneo

5.4 Medidor de torque

A medição do torque aplicado pelo freio foi realizada através da associação de molas calibradas com um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) associado a um circuito eletrônico, que será apresentada a seguir.

O LVDT é um transdutor de deslocamento – ou seja, converte o deslocamento do eixo em um sinal elétrico - composto por uma bobina primária, e duas secundárias, todas submetidas a um mesmo fluxo magnético, em equilíbrio, conforme ilustrado na Figura 29.

As bobinas secundárias são associadas em série, com uma das bobinas sendo conectada em seu ponto de polaridade de forma reversa. Com isso, a saída será dada pela diferença de potencial entre as duas bobinas. Quando não há qualquer deslocamento no núcleo de ferro, a diferença de potencial é nula. Assim que há um deslocamento no eixo do LVDT, uma das bobinas secundárias é induzida com um maior fluxo magnético em detrimento da outra, gerando uma diferença de potencial.

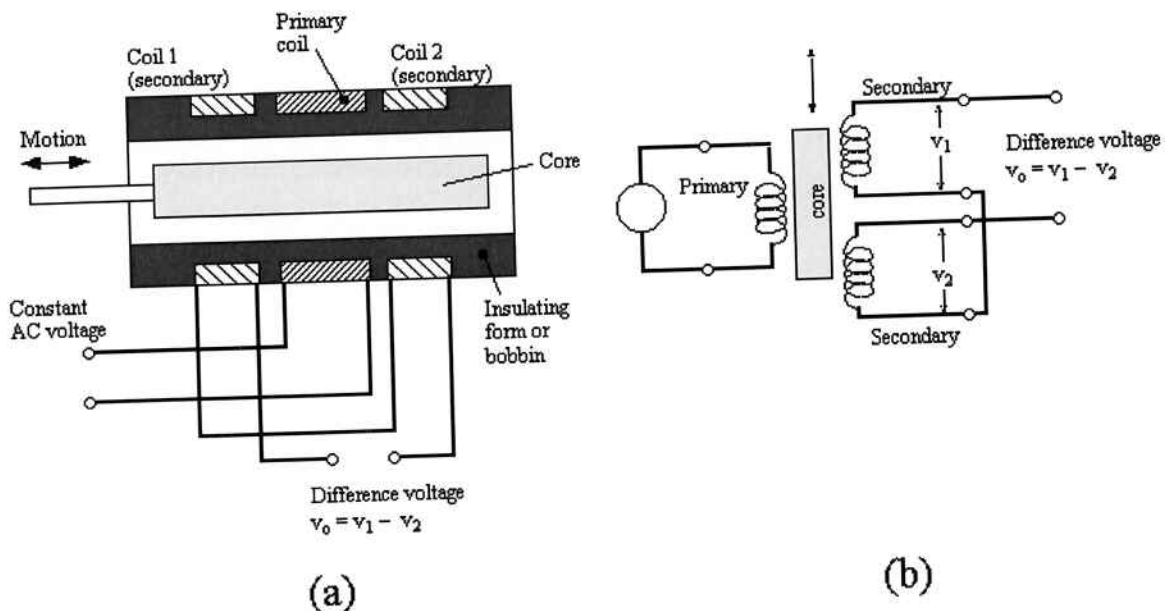


Figura 29 - Representação esquemática do LVDT

Além disso, a fim de converter essa medição de deslocamento em uma escala de torque, o LVDT foi associado a um circuito eletrônico, cujo projeto já estava concebido, utilizando um micro amperímetro para indicar a grandeza de interesse, conforme apresentado na Figura 30, cujos elementos serão explicados a seguir.

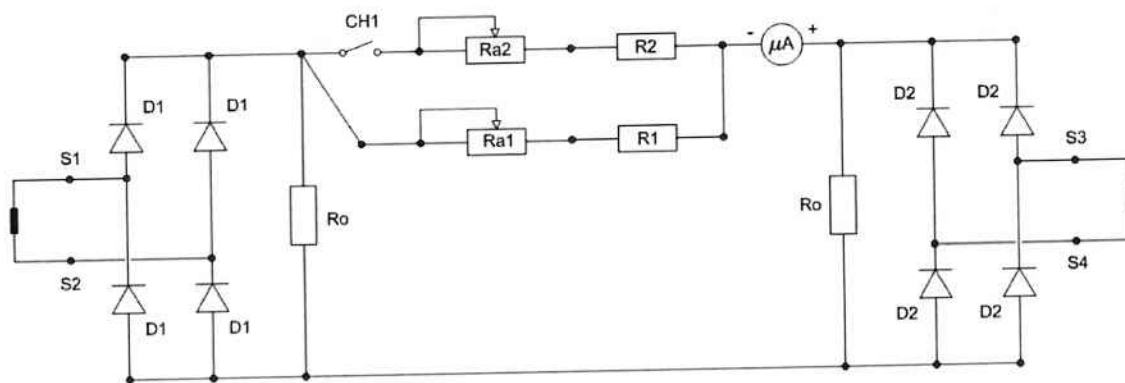


Figura 30 - Circuito de condicionamento do LVDT

Os pontos S1, S2, S3 e S4 correspondem aos terminais das bobinas secundárias. Os diodos têm por função retificar a tensão, para que a corrente possa ser lida pelo micro amperímetro CC, em uma escala de -100 a $100 \mu\text{A}$. A chave CH1 tem como finalidade alterar a escala de medição de torque, em uma relação de 1:4. R_{a1} e R_{a2} correspondem a potenciômetros, cuja finalidade é ajustar precisamente a escala de medição. As especificações de cada componente são:

- D_1 e D_2 : diodos modelo N4004
- R_0 : $5.6 \text{ k}\Omega$
- R_1 : $22 \text{ k}\Omega$
- R_2 : $5.6 \text{ k}\Omega$
- R_{a1} : $50 \text{ k}\Omega$
- R_{a2} : $10 \text{ k}\Omega$

Por fim, o circuito de alimentação do LVDT é indicado na Figura 31.

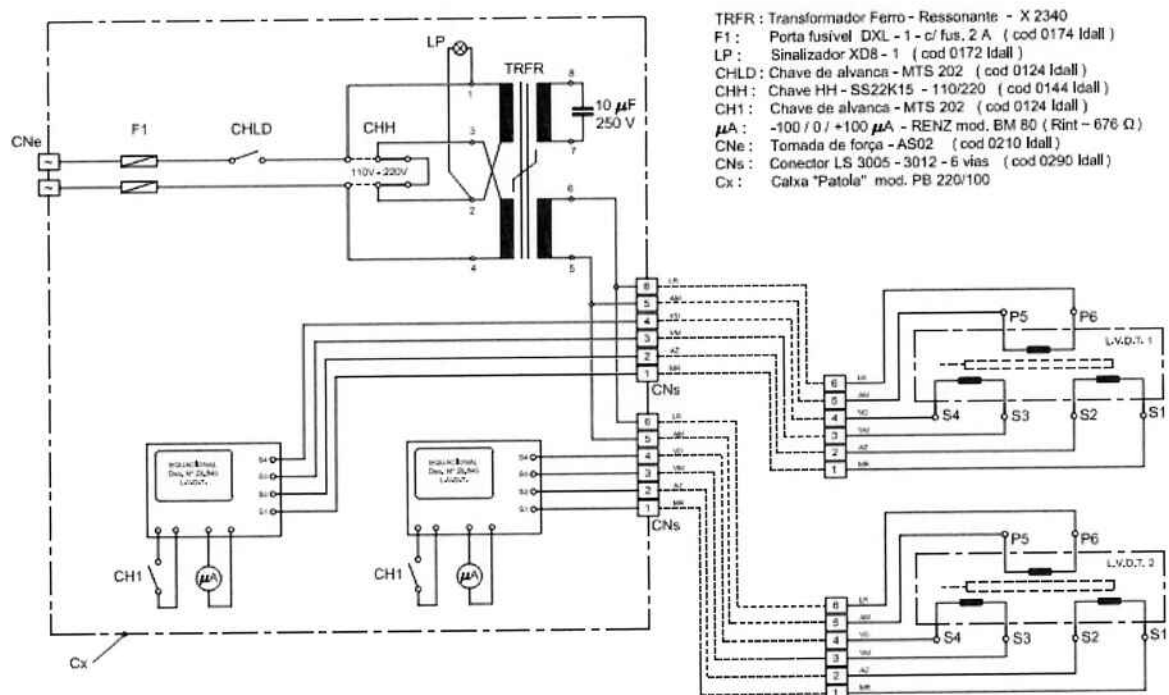


Figura 31 - Circuito de alimentação do LVDT

Ressalta-se aqui que só foi utilizado um LVDT no equipamento de medição, além de ter sido usado um transformador convencional, cuja relação de transformação era de 127/20V, com potência aparente de 10 VA. Na Figura 32, Figura 33, Figura 34, e Figura 35 é possível verificar a montagem final do medidor de torque, realizada no laboratório.

A calibração do equipamento final foi feita através da seguinte forma: o eixo do LVDT foi deslocado de distâncias conhecidas, medidas por meio de um equipamento já desenvolvido em projetos anteriores no LMAG. Variou-se inicialmente o potenciômetro de maior valor, de forma que, quando houvesse 2mm de deslocamento no eixo do LVDT, o ponteiro do micro amperímetro deveria atingir o limite da escala. Procedimento análogo foi realizado para o outro potenciômetro, de forma que esse fosse utilizado para uma escala mais sensível, alterando a posição da chave CH1. Salienta-se que a escala de medição deve ser considerada percentualmente, e seu valor de fundo de escala em N.m foi calculada posteriormente, como será explicado neste documento.



Figura 32 - Vista frontal do medidor de torque



Figura 33 - Vista traseira do medidor de torque

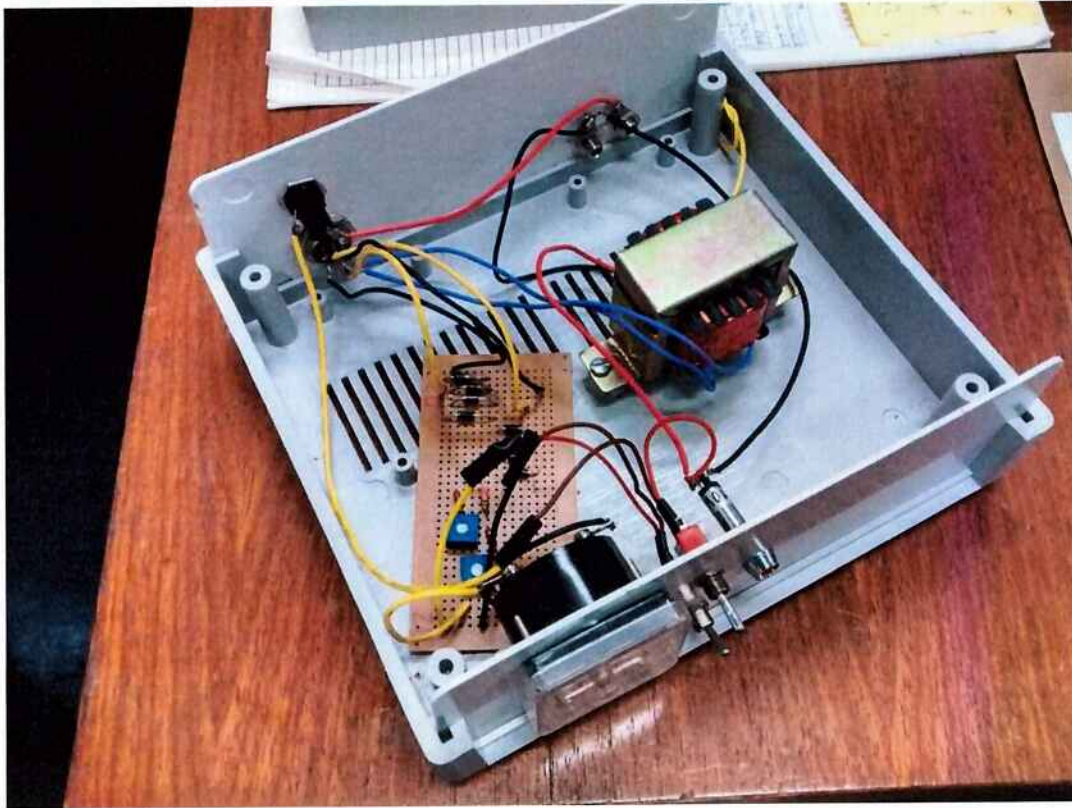


Figura 34 - Interior do medidor de torque

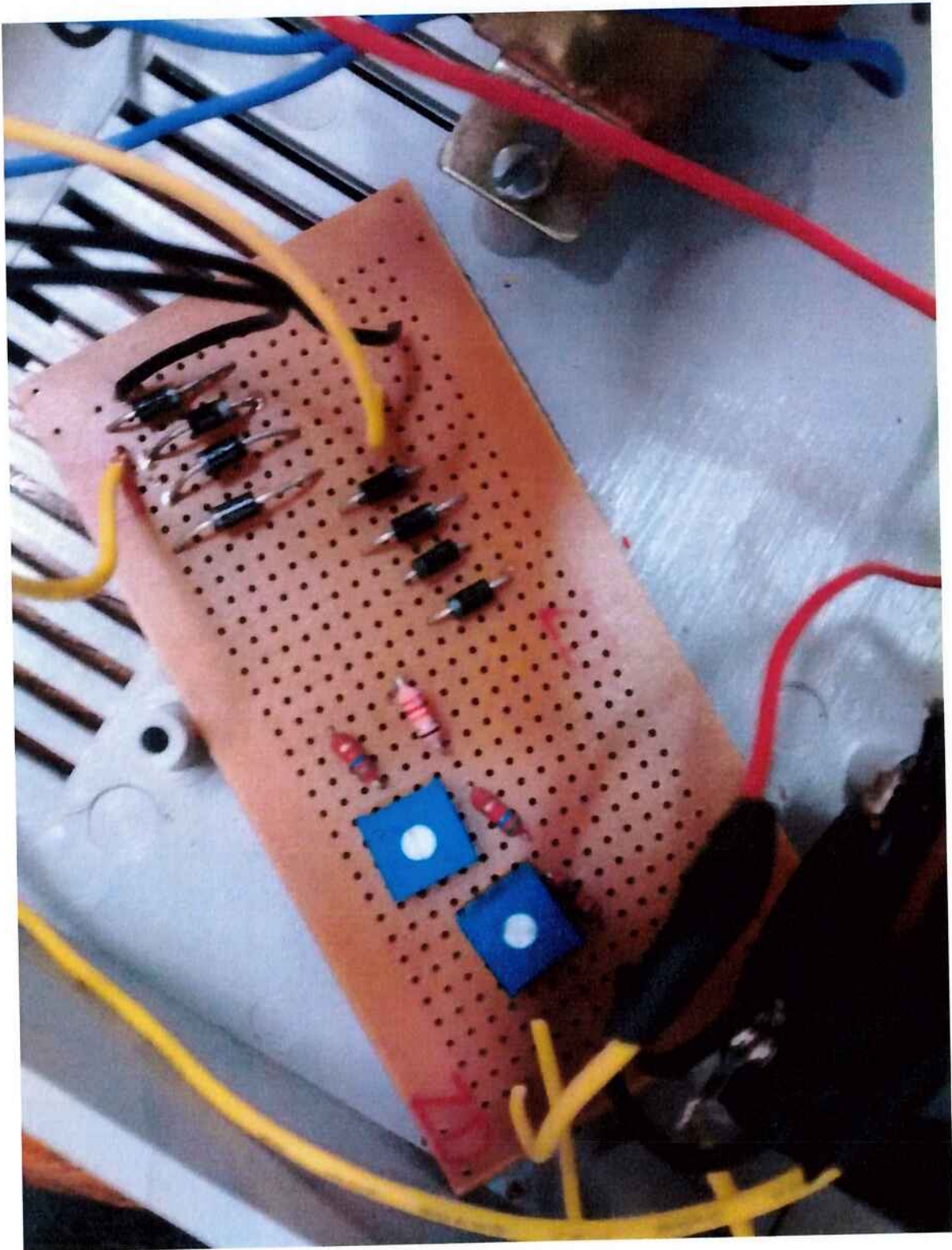


Figura 35 - Circuito associado ao LVDT

5.5 Medidor de velocidade

A fim de auferir a velocidade rotacional no eixo do freio foi elaborado um sistema de medição dessa grandeza. Para tanto, foi utilizado um instrumento que utiliza como base o relé "reed". Seu princípio de funcionamento é apresentado na Figura 36. O relé é composto por uma ampola com dois contatos magnéticos, que se fecham na presença de linhas de campo magnético. No momento em que isso ocorre é gerado um pequeno sinal elétrico no circuito do medidor de velocidade, convertido em um sinal digital no visor do medidor.



Figura 36 - Esquema de funcionamento do relé reed

No medidor de velocidade em questão, o ímã está acoplado ao eixo do freio, enquanto a ampola é fixada em um determinado local, de forma que a distância entre a ampola e o ímã seja de 1mm no momento em que os dois objetos estão o mais próximo possível. Assim, o sinal elétrico é gerado na mesma frequência de rotação do eixo do motor. Entretanto, a indicação no visor do medidor de velocidade está indicada em metros por hora, de forma que é necessário utilizar um fator corretivo para obter a velocidade em rpm, além de indicar o valor do raio do eixo do motor no medidor de velocidade. Dessa forma, utiliza-se a equação (18) para calcular o fator de correção.

$$v = \omega \cdot r \quad (18)$$

Substituindo o valor do raio de rotação, e indicando as correções nas unidades de medição da velocidade e da rotação, obtêm-se as equações (19) e (20).

$$\frac{v}{3600} = \left(\omega * \frac{2\pi}{60} \right) * 8.5 * 10^{-3} \quad (19)$$

$$\omega = K * v \quad (20)$$

Em que K é calculado em 0.312, para que v esteja em metros por hora e ω , em rotações por minuto.

5.6 Adaptações ao freio

A fim de acoplar o medidor de torque e o medidor de velocidade ao freio eletromecânico, foram necessárias algumas adaptações. Para o primeiro medidor foi utilizado um par de molas que limitasse a oscilação do freio em 2mm. Além disso, foi adaptado um suporte para que o LVDT ficasse fixo ao freio, bem como uma biela para conectar o eixo do LVDT e as partes do freio que oscilam. Para o segundo medidor, foi adaptado um suporte para a ampola, de forma a fixá-la a 1mm do ímã preso ao eixo do freio quando este se aproximasse da ampola. O conjunto do freio com suas adaptações aos medidores pode ser visto nas figuras seguintes.

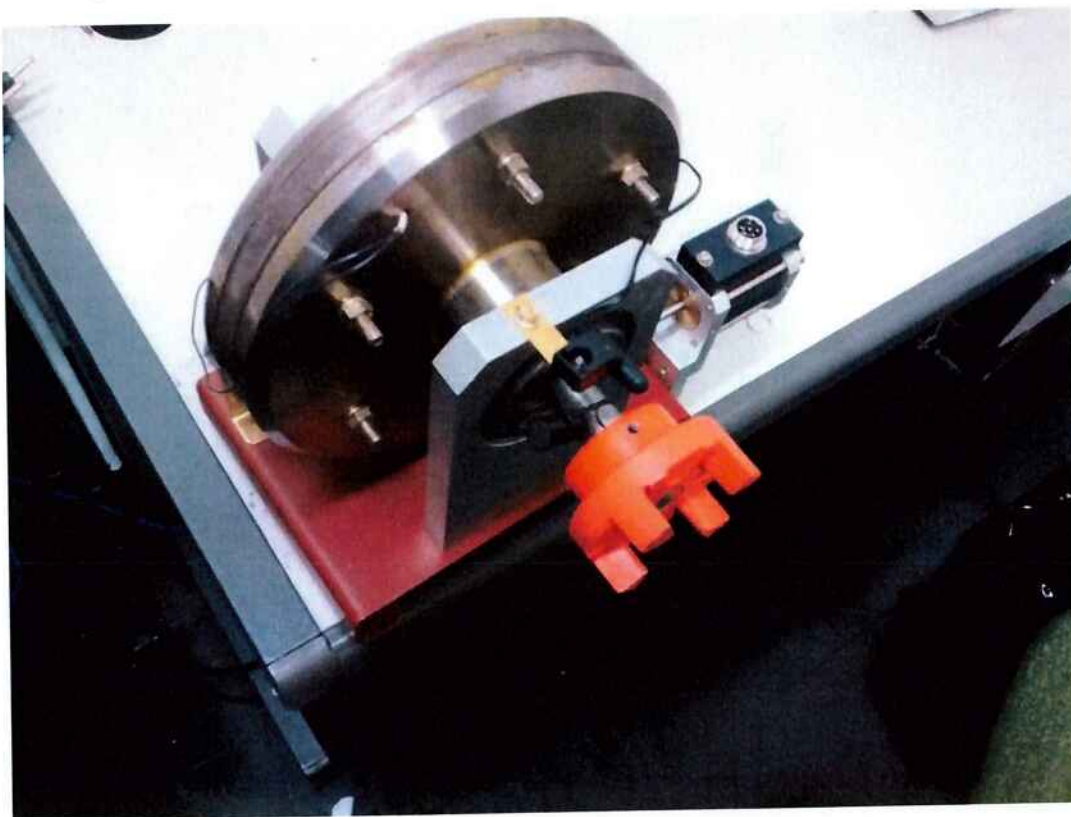


Figura 37 - Freio com adaptações

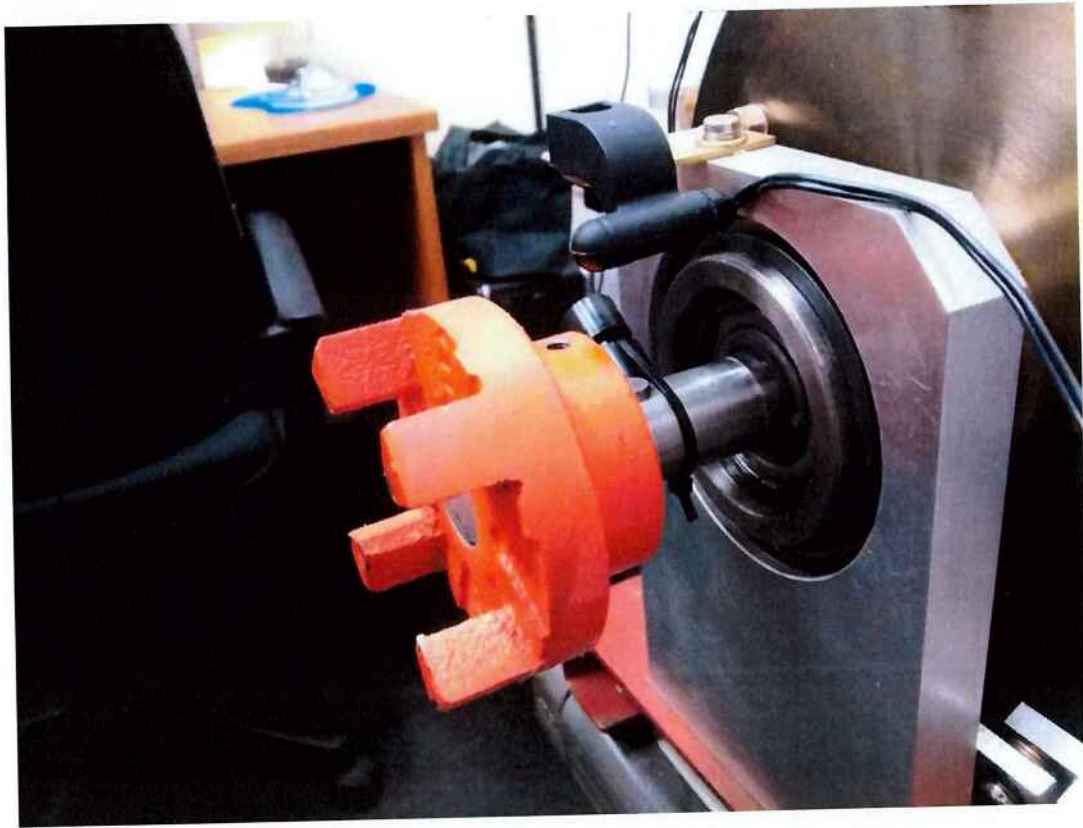


Figura 38 - Em detalhe, a ampola e o ímã do medidor de velocidade

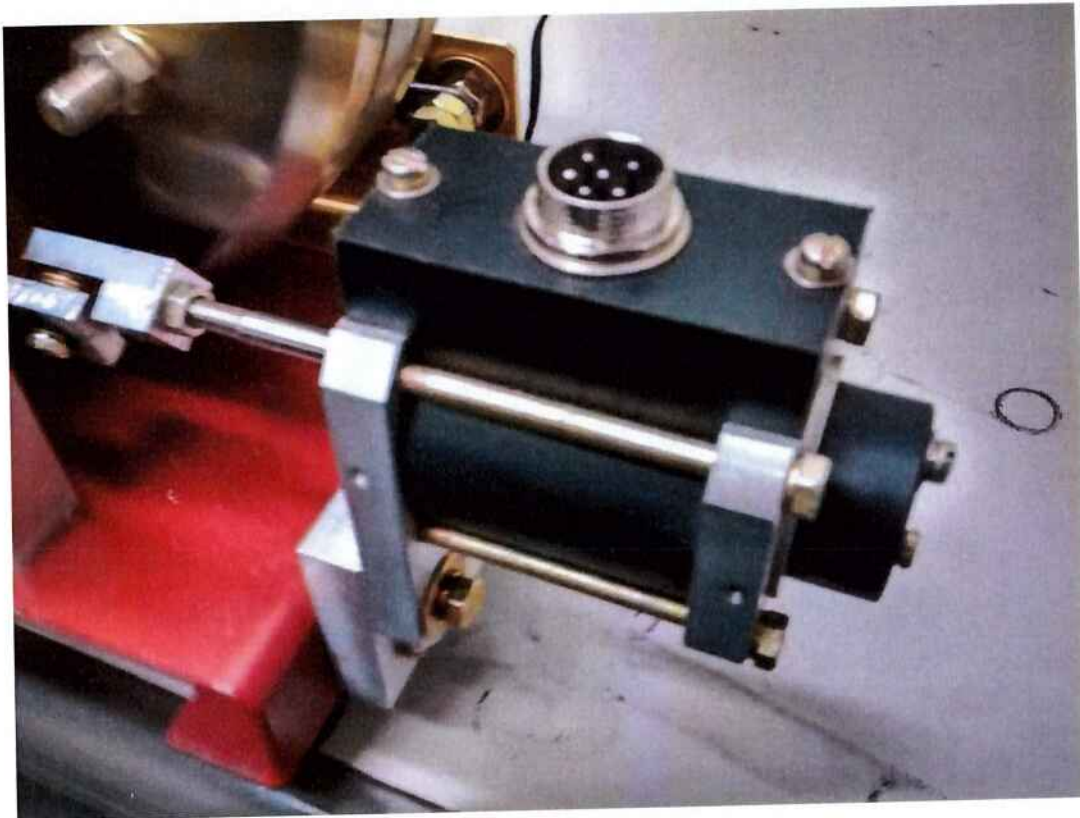


Figura 39 - Em detalhe, LVDT com seu suporte e a biela

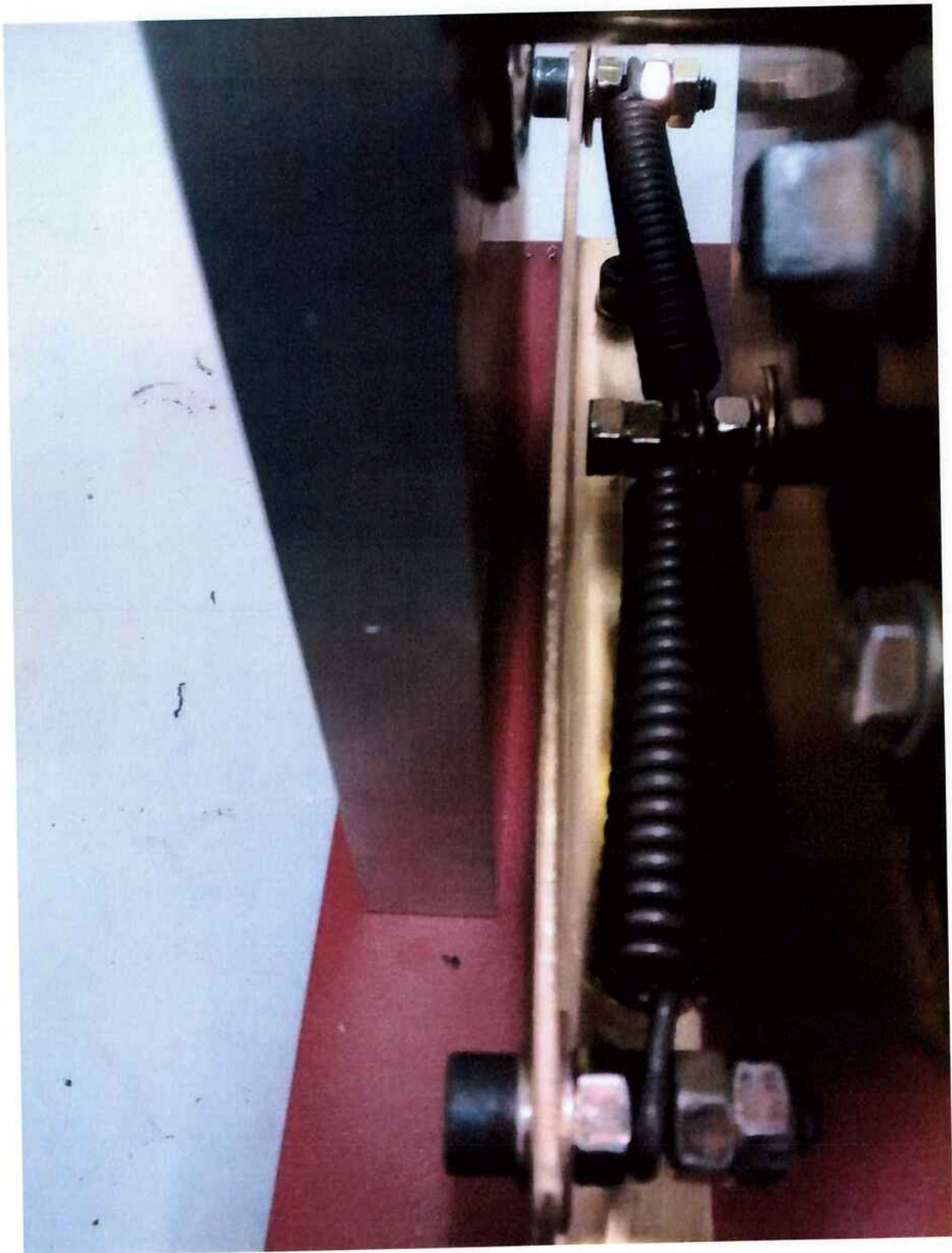


Figura 40 - Em detalhe, par de molas

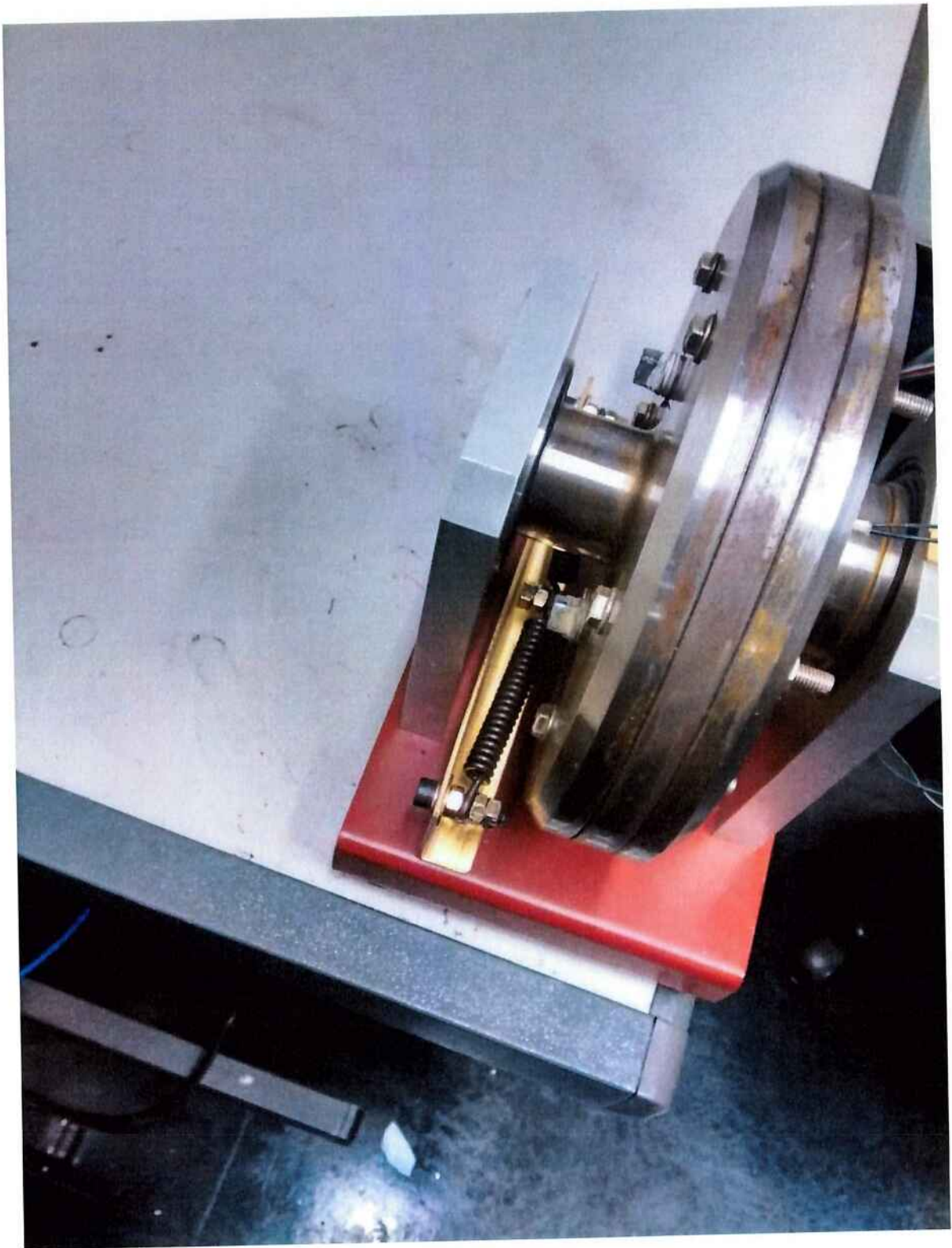


Figura 41 - Localização do par de molas no freio

Além disso, o projeto do freio e suas adaptações foi feito a partir de desenhos realizados previamente no software AutoCAD. A concepção do projeto com suas vistas é apresentada na Figura 42.

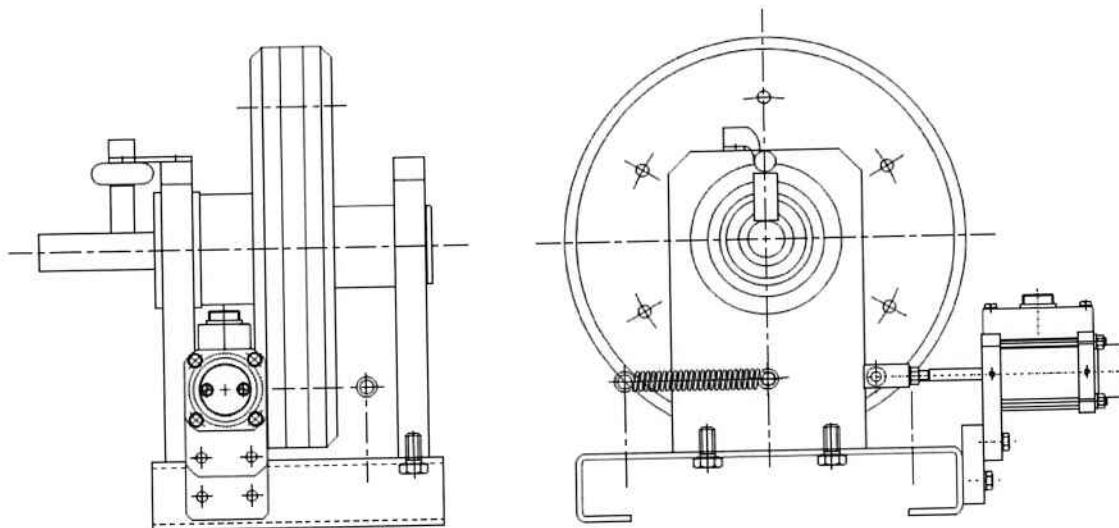


Figura 42 - Vistas do freio com adaptações

5.7 Resultados finais

5.7.1 Calibração

A partir do equipamento desenvolvido foi levantada experimentalmente a curva de torque do freio, que será explicada com maiores detalhes posteriormente. Antes de realizar os experimentos, foi necessário calibrar o par de molas a fim de se obter uma leitura confiável no medidor de torque.

Para este procedimento foi utilizada uma haste rígida presa em um dos cubos do freio, disposta horizontalmente e de maneira simétrica em relação à disposição do par de molas em repouso. Em seguida, foi adicionada uma massa conhecida em um dos lados da haste rígida, a fim de gerar um torque no freio. Esse torque foi aferido pelo medidor de torque, que utiliza como parâmetro de entrada a compressão de uma das molas. O braço do momento criado pela massa foi variado até que se atingisse o fundo de escala do medidor. Em seguida, foi medido o braço correspondente, a fim de se obter o valor do torque em N.m correspondente ao fundo de escala do medidor. Além disso, o medidor foi configurado de forma a indicar a escala menos sensível. A Figura 43 ilustra o arranjo montado para calibração.

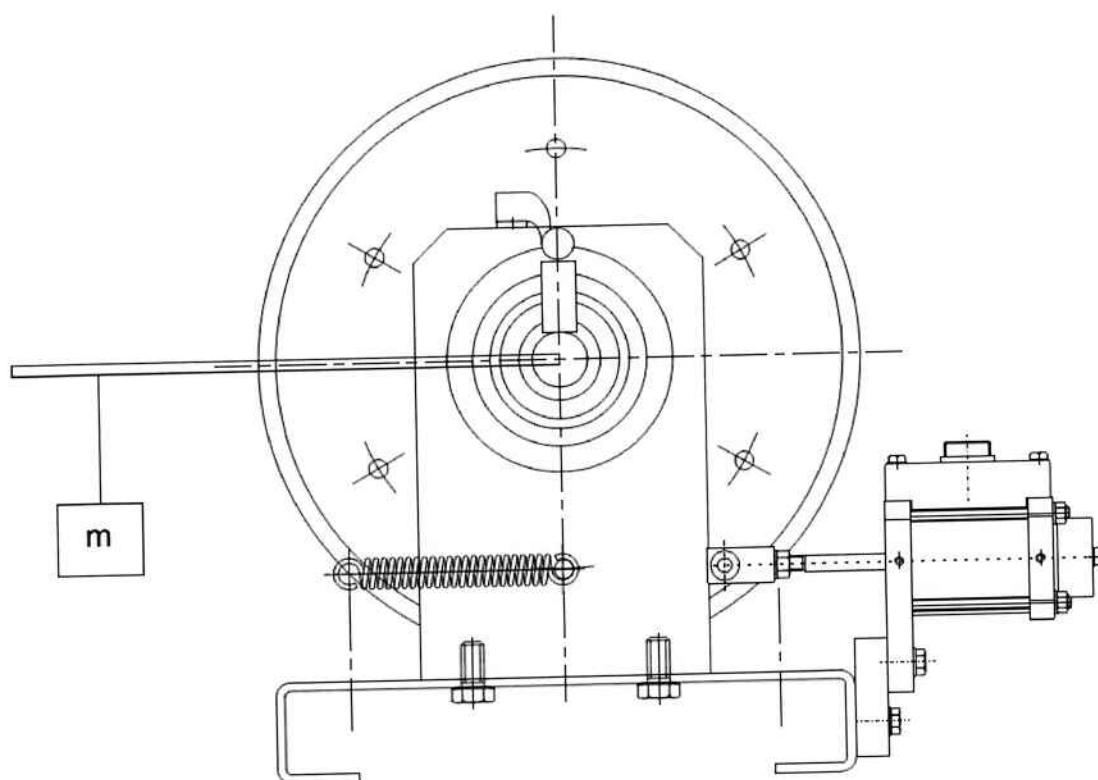


Figura 43 - Calibração do medidor e da mola

A massa utilizada foi de 2.76 kg, medida através de uma balança eletrônica disponível em um dos laboratórios do Departamento PEA, com precisão de 2g. O braço foi medido através de uma escala graduada em centímetros, indicando o valor de 36.7cm. Adotando-se o módulo aceleração gravitacional local como 9.81m/s^2 , resulta um torque dado pela equação (19):

$$C = m * g * d \quad (19)$$

Em que:

C : torque correspondente ao fundo de escala do medidor de torque.

m : massa conhecida utilizada para gerar o torque.

g : módulo da aceleração gravitacional local.

d : braço de alavanca para o qual se atinge o fundo de escala do medidor de torque.

Dessa forma, calcula-se o torque correspondente ao fundo de escala do medidor em 10.02 N.m. Apenas para efeito de verificação das medidas, a massa foi reposicionada com

metade do valor do braço obtido anteriormente. O resultado foi indicação de 50% da escala no medidor de torque, conforme esperado.

Além disso, a partir dos resultados é possível calcular a constante elástica equivalente do par de molas. Utilizando a Lei de Hooke, e sabendo que o braço de atuação do par é conhecido, dimensionado em 73mm, decorre que a constante elástica equivalente é calculada através da equação (20).

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{C}{b * \Delta x} \quad (20)$$

Em que:

k : constante elástica equivalente do par de molas.

C : torque correspondente ao fundo de escala do medidor de torque.

b : braço de alavanca correspondente ao par de molas.

Δx : compressão de uma das molas para o referido valor do torque.

Ao atingir o fundo de escala do medidor de velocidade há um deslocamento de 2mm no eixo do LVDT e, portanto, o mesmo valor de compressão em uma das molas. Assim, calcula-se a constante elástica equivalente do par de molas em 68.62kN/m. Devido à configuração de associação das duas molas, conclui-se que cada uma delas deve possuir uma constante elástica de 34.31kN/m.

5.7.2 Curva de torque

A curva de torque do freio eletromecânico foi levantada a partir de ensaios realizados no LMAG, através da metodologia que será descrita a seguir. A aquisição de dados do freio foi realizada acoplado uma haste rígida ao eixo do equipamento. Além disso, alimentou-se a bobina, a fim de induzir campo magnético no fluido, gerando um conjugado. Ao longo da haste adicionou-se carga que gerasse um conjugado mensurável no medidor de torque. Foram medidos o torque e a corrente de alimentação.

Inicialmente, alimentou-se a bobina com uma fonte de corrente contínua em cerca de 800 mA, que seriam suficientes para superar o torque resistivo criado pela carga. Em seguida, reduziu-se a corrente de alimentação até o ponto em que o torque resistivo superasse o torque gerado pelo freio, decorrente do fluido magneto-reológico. Repetindo-se o procedimento para um novo valor de conjugado mensurável no medidor de torque foi possível levantar a curva de torque do freio eletromecânico, representado na Figura 44. A força magneto-motriz foi calculada sabendo-se o número de espiras da bobina, 290, conforme indicado anteriormente.

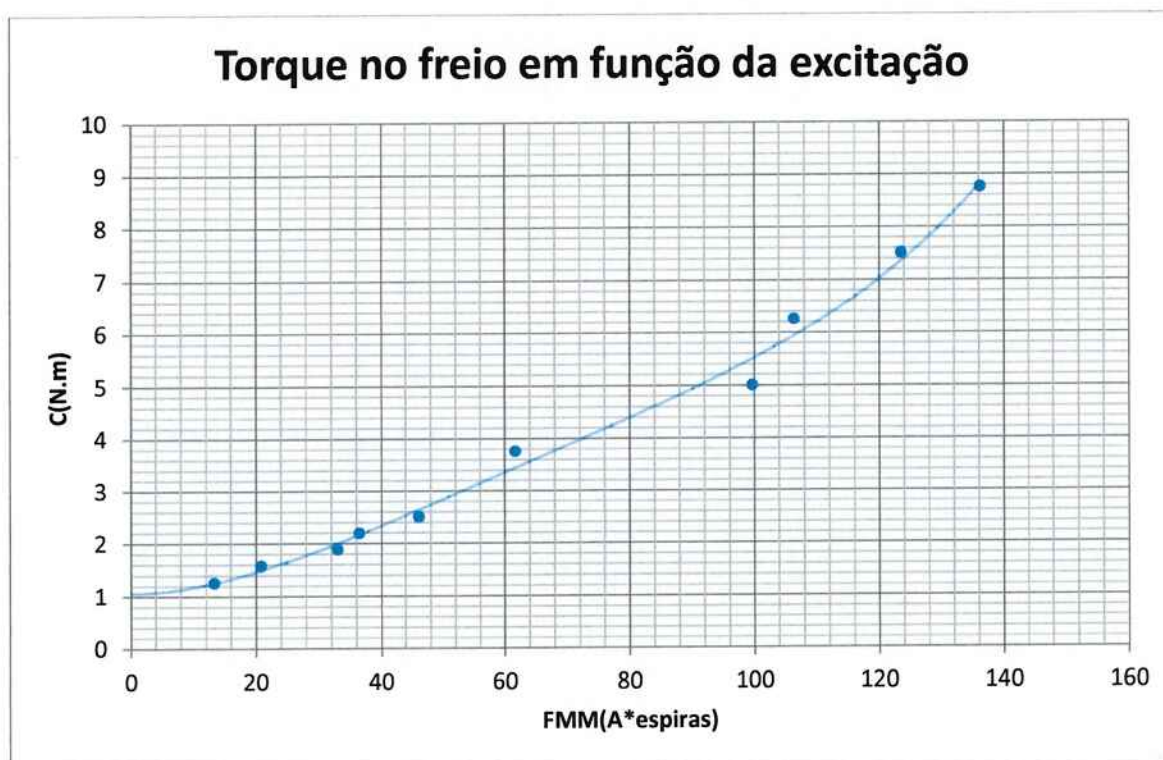


Figura 44 - Curva de torque levantada em laboratório

Por fim, são comparadas as curvas de torque levantadas experimentalmente e através de simulações magnetostáticas, durante o projeto de formatura. O resultado é indicado na Figura 45. É importante notar que as curvas se aproximam em excitações mais elevadas, induzindo a uma convergência entre os resultados. Por outro lado, a diferença entre as medidas no início da curva se deve à dificuldade de medição do torque para baixas excitações, uma vez que o fluido se torna pouco resistente, e basta um pequeno conjugado para superar o torque resistivo do freio. Adicionalmente, existe o atrito estático das vedações existentes entre o eixo e o cubo para impedir o vazamento do fluido, que justificam o torque não nulo para corrente de excitação igual a zero. Aliado a isso há a imprecisão na escala do medidor.

Torque no freio em função da excitação

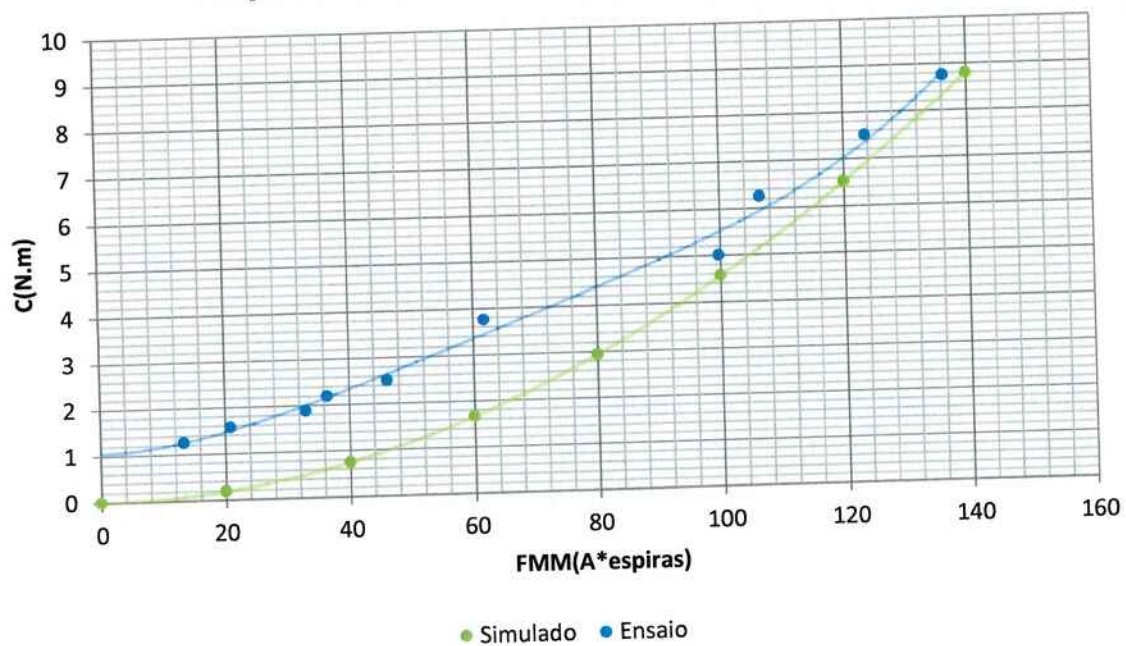


Figura 45 - Comparação entre a curva de torque experimental e teórica

6 CONCLUSÃO

Durante a primeira metade do período do Trabalho de Formatura, os estudos no fluido magneto-reológico foram aprofundados, a fim de caracterizá-lo e aplicá-lo a um freio eletrodinâmico. No segundo período, foram aplicados métodos de medição de torque e de velocidade rotacional no freio. O projeto de formatura deu continuidade aos estudos desenvolvidos sobre o fluido magneto-reológico durante o projeto de iniciação científica realizado pelo mesmo aluno e orientador.

A caracterização foi realizada por meio de simulações magnetostáticas no fluido, através de um modelamento prévio, para levantamento da curva de magnetização do material. O modelo foi feito de acordo com as publicações da literatura sobre o fluido magneto-reológico, através de estruturas colunares, na presença de campo magnético. Além disso, também foi levantada uma curva da permeabilidade magnética, μ , do fluido em função do campo magnético, a fim de analisar o comportamento de μ . Essas medidas foram de grande relevância, pois, até o momento, o fluido magneto-reológico havia sido descrito como um material cuja permeabilidade estava entre uma faixa de valores, sem uma caracterização mais precisa.

Além da caracterização feita por meio da curva de magnetização, também foi levantada a curva da tensão de cisalhamento no fluido em função da indução magnética. Este procedimento foi feito através de simulações magnetostáticas.

Em seguida, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados do freio. Primeiramente, foi adaptado um medidor de velocidades baseado em contatos magnéticos, que foi acoplado ao eixo do motor. Além disso, foi desenvolvido um medidor de torque a partir de um transdutor de deslocamento linear, o LVDT, e de um circuito eletrônico para a leitura do deslocamento em uma escala de torque. Para tanto, foi utilizado um par de molas com elevada constante elástica. Isso decorreu do fato de que o deslocamento máximo no eixo do LVDT deve ser de 2 milímetros. Todo o sistema foi calibrado durante o projeto e o conjunto completo é indicado na Figura 46.

Por fim, foram levantadas duas curvas de torque do freio. Uma delas foi realizada através de simulações magnetostáticas, enquanto a outra foi levantada por meio de ensaios utilizando o medidor de torque desenvolvido no projeto.

Salienta-se que o freio eletromecânico com suas adaptações pode ser utilizado em motores de elevado conjugado e baixa rotação e está disponível para utilização no LMAG. Como sugestão de melhorias futuras no equipamento, é indicada a utilização de escalas mais precisas de medição da velocidade e torque.

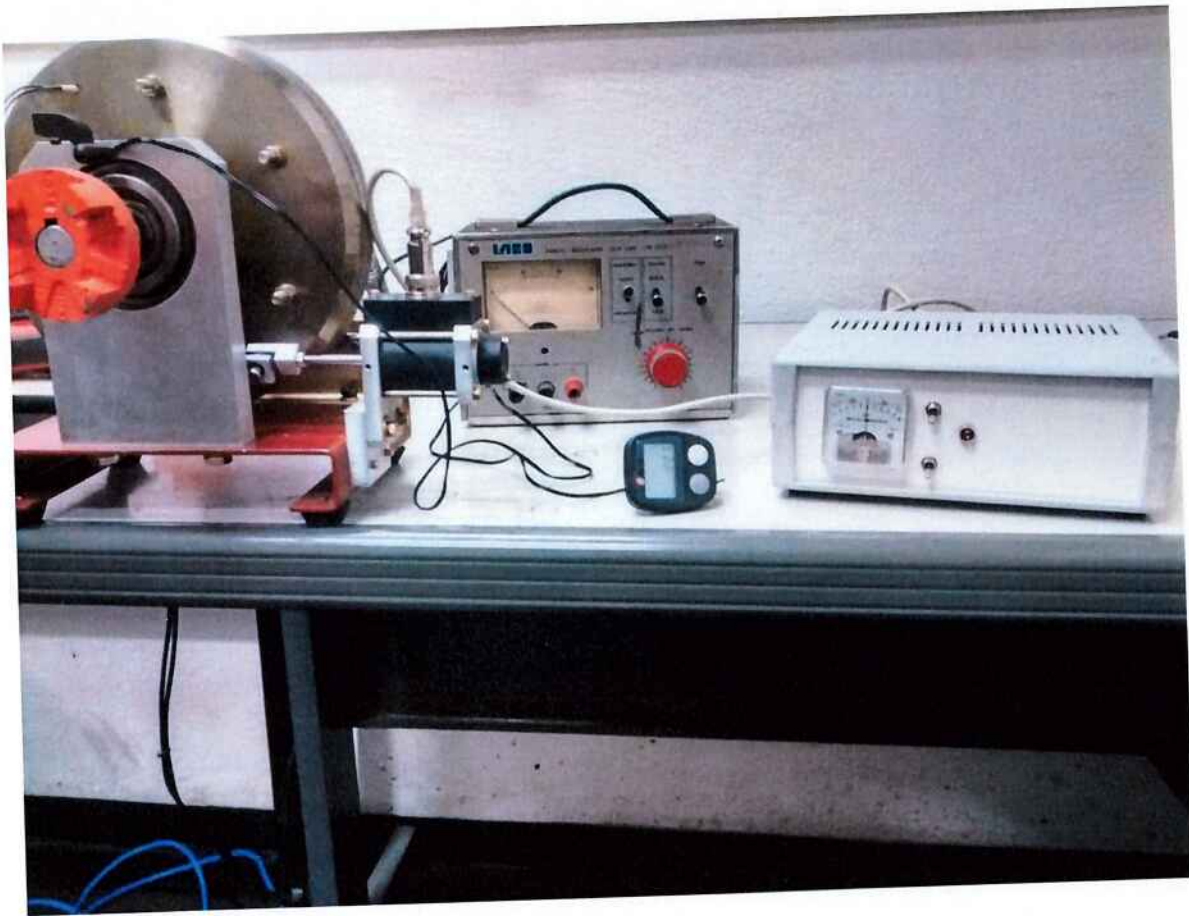


Figura 46 - Conjunto do freio com seus medidores e fonte de excitação da bobina

REFERÊNCIAS

1. Klingenberg, Daniel J. **Magnetorheology: Applications And Challenges**. AIChE Journal. United States, v.47, no2, feb. 2001.
2. Bender, Jonathan W.; Carlson, J. David; Jolly, Mark R. **Properties and applications of commercial magnetorheological fluids**. Lord Corporation internal publication. United States.
3. Carlson, J. David. **What makes a good MR fluid?** Lord Corporation internal publication. United States.
4. Dr. Dave, **Do-It-Yourself: Magnetorheological Fluid**. Lord Corporation. United States. 2004
5. Gourishankar, Vembu. **Electromechanical energy conversion**. 1965.
6. Falcone, Aurio Gilberto. **Eletromecânica**. Editora Blucher, 1979. v. 1.
7. Falcone, Aurio Gilberto. **Eletromecânica**. Editora Blucher, 1979. v. 2.
8. Streeter, Victor L.; Wylie, Benjamin. **Mecânica dos Fluidos**. 1982.
9. Barros, Felipe Estrella. **Estudo e desenvolvimento de acoplamentos mecânicos através de fluido magneto-reológico**. 2006. Projeto de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
10. Milecki, Andrzej. **Investigation and control of magneto-rheological fluid dampers**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Poland, v.41, p. 379-391, feb. 2001.
11. Ebara, Yoshiaki; Long, Quan Qi; Nagaya, Kosuke; Pranoto, Tjahjo. **Vibration suppression device using permanent-electromagnet and MRF shear damper**. Journal of Materials Processing Technology. Japan, v.181, p. 235-240, jan. 2007.
12. Bossis, Georges; Kuzhir, Pavel; López-López, Modesto T.; Mingalyov, Pavel. **Preparation of well-dispersed magnetorheological fluids and effect of dispersion on their magnetorheological properties**. Springer-Verlag. v.47, p. 787-796, sep. 2008.
13. Deng Zhong-chao; Muhammad Aslam; Yao Xiong-liang. **Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control**. Journal of Marine Science and Application. China, v.5, p. 17-29, sep. 2006.
14. Doebelin, Ernest O. **Measurement Systems**. Editora McCraw-Hill, 1976. 802 p.