

Desenvolvimento de um Dispositivo de Feedback de Força Usando Fluidos Magneto-Reológicos

César Ricardo Araújo Soares

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Gabriel Magalhães Mendes

Coorientador: Prof. Dr. António Manuel Ferreira Mendes Lopes



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização de Automação

Setembro 2016

À minha família

Resumo

A crescente evolução tecnológica veio melhorar a interação entre o utilizador e as interfaces de controlo de sistemas, nomeadamente pela introdução de sistemas hápticos. Esta solução é particularmente útil no controlo remoto de sistemas, pois permite dar ao utilizador uma informação mais rica, que inclui, para além da parte numérica, o *feedback* sensitivo de algumas das variáveis do sistema, por exemplo força, temperatura, vibração, entre outros.

Assim, esta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo de *feedback* de força para o controlo sensitivo de um atuador com um grau de liberdade. Aliando esta necessidade ao interesse da utilização de materiais “inteligentes” e suas aplicações, realizou-se uma pesquisa de soluções existentes no mercado, tendo-se optado pelos fluidos magneto-reológicos como elemento ativo do sistema.

Atendendo às necessidades magnéticas de ativação destes fluídos, projetou-se e desenvolveu-se uma solução composta por elementos estruturais metálicos, elementos de ativação magnéticos, instrumentação e condicionamento de sinal.

Para o desenvolvimento do controlo do sistema optou-se por uma placa de aquisição de dados em conjunto com o *software LabVIEW 2013*.

O desempenho de todo o sistema foi avaliado experimentalmente usando o robô ABB IRB2400/16, para impor um movimento a velocidade constante, tendo os resultados sido muito positivos, apesar de se tratar de um protótipo inicial.

A solução desenvolvida poderá ser útil em várias áreas, nomeadamente na reabilitação, teleoperação e aplicações industriais.

Palavras chave: Fluidos magneto-reológicos, háptico, feedback de força, magnetostática

Development of a force feedback device using magnetorheological fluids

Abstract

Since the introduction of haptic systems, the increasing technological evolution enhanced the interaction between the user and the control interfaces. The use of haptic systems is particularly convenient in remote controlled systems because it gives the user a richer environmental information in addition to the numeric portion, providing a sensory feedback of some of the system variables, such as strength, temperature, vibration among others.

Therefore, this work aimed to develop a force feedback device for the sensitive control of an actuator with one degree of freedom. Combining this need with the interest in smart materials and their applications, a research of existing solutions commercially available was carried out. After this analysis, the magnetorheological fluids were deemed the best choice to act as the active element of the system.

Due to the magnetics necessities for activating these fluids, a solution was designed and developed composed of metal structural elements, magnetic activation elements, instrumentation and signal conditioning.

For the control system was chosen a data acquisition board with the software LabVIEW 2013.

The performance of the entire system was evaluated experimentally using the robot ABB IRB2400 / 16, with a constant speed movement, and the results considered very positive although it still is an initial prototype.

The developed solution may be useful in several areas, including rehabilitation, teleoperation and industrial applications.

Keywords: Magneto rheological fluids, haptics, force feedback, Magnetostatics

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus orientadores, Professor Joaquim Gabriel e Professor António Mendes Lopes, pelo tempo e recursos disponibilizados, pelo conhecimento transmitido ao longo da realização deste trabalho e pela oportunidade que me concederam em desenvolver este projeto.

Ao Professor Carlos Manuel de Sousa Moreira da Silva e Professor Joaquim Oliveira Fonseca pela ajuda no desenho do dispositivo.

Aos técnicos das oficinas de mecânica pelo trabalho prestado na manufatura dos componentes metálicos.

Ao Sr. Joaquim Silva e Sr. António Ramalho pela permanente ajuda e disponibilidade, transmissão de conhecimentos, amizade e boa disposição durante a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de laboratório, em especial o Fábio, Jorge e Tiago pela ajuda e companhia.

Aos meus Pais, pela ajuda e sacrifício, que me permitiram chegar a este ponto.

Ao meu irmão pelo incentivo e apoio anímico para a conclusão deste trabalho.

À minha avó e à minha madrinha por todo o apoio ao longo dos anos.

À Goreti, por todo o carinho, compreensão, apoio transmitidos e sempre acreditar nas minhas capacidades durante esta fase.

Ao Márcio e à Inês, pela amizade, apoio e motivação sem os quais este trabalho não teria sido possível.

A todas as amigadas que levo da FEUP, em particular ao João Nuno, Bruno, Hugo, Alexandre, Luís, Eduardo, José Nuno, João Teixeira, Vasco e Fábio Pinto.

Aos amigos de sempre, Davide e Tiago Oliveira, por estarem sempre prontos a ajudar e à distância de uma chamada.

Por último, mas não menos importante, a todas as pessoas cujas as ações, direta ou indiretamente, me ajudaram a concluir esta dissertação.

A todos, o meu sincero Obrigado!

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação do projeto.....	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura da dissertação	1
2	Estado da Arte.....	3
2.1	Contextualização.....	3
2.2	Dispositivos hápticos	3
2.2.1	Sistemas hápticos	5
2.2.2	Tipos de sistemas hápticos	5
2.2.3	Sistemas hápticos existentes no mercado.....	6
2.3	Fluidos MR/ER	10
2.3.1	Modo de funcionamento em dispositivos	13
2.3.2	Aplicações	14
2.4	FMR aplicados a sistemas hápticos	18
2.4.1	LORD RD-8058/8191 TFD	19
2.4.2	Travão linear com FMR e campo magnético serpenteante.....	20
2.4.3	Simulador cirúrgico baseado em FMR	22
3	Projeto do dispositivo	25
3.1	Especificações do sistema.....	25
3.2	Arquitetura do sistema	25
3.3	Propriedades magnéticas dos materiais.....	27
3.4	FMR em detrimento de FER.....	30
3.5	Modelação mecânica e eletromagnética	33
3.5.1	Modelos CAD 3D	34
3.5.2	Simulações eletromagnéticas	37
3.6	Sistema elétrico	51
3.6.1	Sensor de deslocamento	52
3.6.2	Célula de carga.....	52
3.6.3	Controlador de Corrente <i>LORD Wonder Box®</i>	54
3.6.4	Placa de aquisição de dados	55
3.7	Conclusão.....	56
4	Desenvolvimento do protótipo.....	59
4.1	Obtenção de materiais	59
4.1.1	Aço de baixo teor em carbono	59
4.1.2	Vedantes e cintas de guiamento	60
4.2	Desenhos de definição para maquinagem.....	60
4.3	Bobinagem do núcleo	61
4.4	Montagem do dispositivo.....	63
4.5	Caracterização dos sensores e controlador de corrente.....	64
4.5.1	Transdutor potenciométrico	64
4.5.2	Célula de carga.....	65
4.5.3	Controlador de corrente	65
4.6	<i>Software</i> e interface gráfico	66
4.6.1	Interface gráfica e controlo	66
5	Verificação Experimental	71
5.1	Testes	71
5.1.1	Bobinas	71
5.1.2	Transdutor potenciométrico	74

5.2	Testes ao sistema	75
5.2.1	Experiência 1 – Força do sistema	76
5.2.2	Experiência 2 – Parede virtual	77
5.2.3	Experiência 3 – Controlo automático de força	79
5.3	Discussão de resultados	80
6	Considerações Finais	83
6.1	Conclusões	83
6.2	Trabalho Futuro	83
	Referências	85
ANEXO A:	Desenhos de definição	89
ANEXO B:	Aplicação de LabVIEW para controlo	95
ANEXO C:	Esquemas Elétricos	96

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Geomagic Sculpt, exemplo de um sistema háptico aplicado:	4
Figura 2.2 – Interação homem, dispositivo háptico, máquina [6]	5
Figura 2.3 – Luva CyberTouch II	6
Figura 2.4 – Luva CyberGrasp	7
Figura 2.5 – Sistema CyberForce	8
Figura 2.6 – Dispositivos Geomagic Touch [12]	8
Figura 2.7 – a) Phantom® Premium™ 1.5; b) Phantom® Premium™ 3.0/6DOF	9
Figura 2.8 – FMR; 1 – fluido de transporte; 2 – partícula ferromagnética[13].....	11
Figura 2.9 – FRM sob um campo magnético externo, pormenor dos dipolos nas partículas ferromagnéticas[13].....	12
Figura 2.10 – Tensão de corte vs. taxa de deformação [15].....	12
Figura 2.11 – Esquema de um FER, com e sem um campo elétrico aplicado[19].....	13
Figura 2.12 – Modos de funcionamento dos FMR; a) modo de deslizamento; b) diferencial de pressão; c) modo de compressão	14
Figura 2.13 – exemplo de um amortecedor com FMR.....	15
Figura 2.14 – Sistema MagneRide da BWI GROUP [23][31]	16
Figura 2.15 – Sistema amortecedor MagnShock 3 Gen [24]	16
Figura 2.16 – Travão e embraiagem com FMR comercializados pela LORD	17
Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um sistema steer-by-wire	19
Figura 2.18 – RD-8191 TFD (veio perfurado) e esquema de funcionamento.....	19
Figura 2.19 – Exemplo de aplicação comercial do dispositivo[42].	20
Figura 2.20 – a) percurso do fluxo de campo magnético; b) esquema do dispositivo; c) haste e bobinas [39].....	21
Figura 2.21 – Simulação em elementos finitos do fluxo de campo magnético [39]	21
Figura 2.22 – Protótipo final do dispositivo [39]	21
Figura 2.23 – Exemplo da fácil alteração de equipamento cirúrgico [40].	22
Figura 2.24 – a) simulação EF do B; b) protótipo final; c) demonstração experimental [40]..	23
Figura 3.1 – Possível solução para um dispositivo háptico baseado num arranjo cilindro – êmbolo [39]	26
Figura 3.2 – Haste sem êmbolo e de secção constante	27
Figura 3.3 – Diagrama funcional do atuador	27
Figura 3.4 – Domínios magnéticos antes e depois da magnetização.....	29
Figura 3.5 – Coercividade de alguns materiais magnéticos[17].....	30
Figura 3.6 – Curvas B-H típicas para materiais ferromagnéticos [44].....	30
Figura 3.7 – Propriedades magnéticas do MRF-132DG; a) tensão de cedência vs intensidade de campo magnético; b) Fluxo magnético vs intensidade de campo	33

Figura 3.8 – a) Recipiente FMR; b) FMR no estado não ativo; c) FMR sob um campo magnético de ímã de neodímio (NdFeB).....	33
Figura 3.9 – Modelos Solidworks do núcleo do dispositivo.....	34
Figura 3.10 – Pormenor do núcleo final; 1) rebaixo.....	35
Figura 3.11 – Modelo da primeira iteração da tampa, modelo SolidWoks a) tampa modular; b) tampa em corte; c) pormenor dos rasgos para saída de fios.....	35
Figura 3.12 – Tampa final, modelo SolidWorks.....	36
Figura 3.13 – a) Placa de isolamento em alumínio; b) tampa lateral.....	36
Figura 3.14 – Haste.....	37
Figura 3.15 – Modelo de uma bobina.....	37
Figura 3.16 – Render do dispositivo final; vista em corte do dispositivo.....	37
Figura 3.17 – Área de influência do campo magnético sobre a haste.....	39
Figura 3.18 - Esquema da simplificação do circuito magnético.....	40
Figura 3.19 – Interface do software Ansys Maxwell.....	40
Figura 3.20 – Interface de edição de materiais.....	41
Figura 3.21 – Definição da corrente no modelo.....	41
Figura 3.22 – Condições fronteira das bobinas.....	42
Figura 3.23 – Vetor densidade de fluxo magnético para uma excitação nas bobinas de 250 A·t.....	42
Figura 3.24 – Pormenor no FMR da magnitude de B.....	43
Figura 3.25 – Linhas de densidade e vetor de fluxo magnético (B) para 250 A·t.....	43
Figura 3.26 – Magnitude de B para a secção transversal para 250 A·t.....	44
Figura 3.27 – Magnitude e vetor de B para a secção longitudinal e 250 A·t.....	44
Figura 3.28 – Polyline de contorno da haste.....	45
Figura 3.29 – Valores de B ao longo do comprimento da polyline, para as várias correntes de alimentação.....	45
Figura 3.30 – Distribuição do fluxo magnético em meia haste.....	45
Figura 3.31 – Polyline longitudinal.....	46
Figura 3.32 – Valores de B ao longo do comprimento da polyline longitudinal em mT.....	46
Figura 3.33 – Dimensões da peça a simular e pormenor da espessura de parede do núcleo...	47
Figura 3.34 – Densidade de fluxo magnético para núcleo com espessura de parede de 0,57mm; I = 250 A·t.....	47
Figura 3.35 – Simulação secção transversal do dispositivo; a) linhas de B; b) vetor de B; c) pormenor no FMR magnitude B.....	49
Figura 3.36 – Valores de B ao longo do comprimento da polyline, para as várias correntes de alimentação.....	50
Figura 3.37 – Distribuição do fluxo magnético em meia haste.....	50
Figura 3.38 - Valores de B ao longo do comprimento da polyline longitudinal.....	51
Figura 3.39 – GEFran PZ34 – S – 125.....	52

Figura 3.40 – Tedeo-Huntleigh Model 615	53
Figura 3.41 – mV transmitter 2261	53
Figura 3.42 – LORD Wonder Box®; A) entrada de alimentação; B) saída de corrente; C) potenciômetro para controle manual; D) entrada BNC para controle em tensão; E) Switch para controle on-off da corrente de saída	54
Figura 3.43 – Característica do controlador de corrente, para uma carga de 4 Ω	55
Figura 3.44 – Placa NI USB-6008.....	56
Figura 4.1 – Vedante Turcon® Variseal® M2 [50]	60
Figura 4.2 – Cinta de guiamento Turcite® Slydring® [51]	60
Figura 4.3 – Vedantes labiais	60
Figura 4.4 – Peças finais, excluindo haste.....	61
Figura 4.5 – Recortes de Nomex® para uma bobina.....	62
Figura 4.6 – Núcleo revestido com Nomex®.....	62
Figura 4.7 – Núcleo bobinado com 220 espiras por bobina	62
Figura 4.8 – Dispositivo montado; 1- cabos de alimentação das bobinas; 2 – orifício para FMR + vedação; 3 – tampa; 4 – Haste; 5 – Núcleo; 6 – Transdutor potenciométrico	63
Figura 4.9 – Sistema final.....	64
Figura 4.10 – Medição da corrente de alimentação das bobinas	65
Figura 4.11 – Corrente vs. Tensão de controle.....	65
Figura 4.12 – Página inicial da interface desenvolvida	66
Figura 4.13 – Janela do transdutor.....	67
Figura 4.14 – Janela da célula de carga	67
Figura 4.15 – Janela do menu Virtual Wall.....	68
Figura 4.16 – Janela do menu Force Out.....	69
Figura 4.17 – Configuração do menu lateral; a) frontend; b) backend;	69
Figura 4.18 – Parte da Backend do ciclo while principal, de aquisição de sinal e características dos sensores	70
Figura 4.19 – Case Structure, backend da janela Force out	70
Figura 4.20 – Bloco funcional de exportação de dados.....	70
Figura 5.1 – Ponte LCR;.....	71
Figura 5.2 – Setup para realização dos testes com ponte LCR e multímetro	72
Figura 5.3 – Setup de medição de densidade de campo magnético (B)	73
Figura 5.4 – Representação gráfica da Corrente vs. Densidade de fluxo	74
Figura 5.5 – Amplitude do sinal do transdutor	74
Figura 5.6 – Esquema de um filtro passa-baixo.	75
Figura 5.7 – Diagrama de Bode do filtro.....	75
Figura 5.8 – Setup de testes com o robô ABB.....	76
Figura 5.9 – Representação gráfica experiência 1; $I_{\min} = 0A$; $V = 15 \text{ mm/s}$	77

Figura 5.10 – Representação gráfica experiência 1; $I= 0,60A$; $V= 50 \text{ mm/s}$	77
Figura 5.11 – Representação gráfica experiência 2; $x= 60\text{mm}$; $I= 0,60A$; $V= 50 \text{ mm/s}$	78
Figura 5.12 – Representação gráfica experiência 2; $x= 60\text{mm}$; $I= 0,60A$; $v= 25 \text{ mm/s}$; botão de recoil on.....	78
Figura 5.13 – Representação gráfica experiência 2; $x= 60\text{mm}$; $I= 0,60A$; $v= 50 \text{ mm/s}$; botão de recoil on.....	79
Figura 5.14 – Representação gráfica experiência 3; $F= 40N$; $v= 15 \text{ mm/s}$	80
Figura 5.15 – Representação gráfica experiência 3; $F= 40N$; $v= 15 \text{ mm/s}$	80

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Especificações dos dispositivos Geomagic	9
Tabela 2.2 – Especificações dos dispositivos Phantom Premium	10
Tabela 2.3 – Propriedades típicas de um FMR[13]	11
Tabela 2.4 – Alguns dispositivos que usam FMR	15
Tabela 2.5 – Propriedades de alguns dispositivos hápticos baseados em FMR	18
Tabela 2.6 – Diferentes TFD da LORD® [28].....	19
Tabela 2.7 – Especificações do dispositivo [39]	22
Tabela 3.1 – Permeabilidade relativa de alguns materiais.....	29
Tabela 3.2 – FMR vs. FER.....	31
Tabela 3.3 – Diferenças entre 3 FMR [17].....	31
Tabela 3.4 – Orçamento recebidos para a compra do MRF	32
Tabela 3.5 – Propriedades dos FMR da LORD®.....	32
Tabela 3.6 – Materiais aplicados ao modelo	41
Tabela 3.7 – Corrente alimentação real e em simulação	42
Tabela 3.8 – Especificações do transdutor	52
Tabela 3.9 – Algumas características do mV transmitter 2261 [47].....	54
Tabela 3.10 – Especificações do controlador de corrente	55
Tabela 3.11 – Propriedades da placa NI USB-6008 [48]	56
Tabela 4.1 – Composição química de AISI 1010 e AISI 12L14.....	59
Tabela 4.2 – Propriedades do fio de cobre AWG28.....	61
Tabela 5.1 – Valores obtidos para a medições efetuadas às bobinas	72
Tabela 5.2 – Valores de B para cada alimentado independentemente	73
Tabela 5.3 – Valores obtidos alimentando as duas bobinas em série.....	73
Tabela 5.4 – Valores de ajuste do segundo método de Ziegler Nichols[54].....	79

Lista de Acrónimos

DAQ – Dispositivo de aquisição de dados
DOF – *Degree of Freedom*
ECU – *Electronic Control Unit* (Centralina)
EF – Elementos finitos
FER – Fluídos eletro-reológicos
FMR – Fluídos magneto-reológicos
MR – Magneto-reológico
RV – Realidade virtual

Lista de símbolos

μ_0 – Permeabilidade do vázio [H/m]
 μ_r – Permeabilidade relativa
 χ_M – Suscetibilidade magnética
A – Área [m²]
B – Fluxo magnético [T]
F – Força [N]
 \mathcal{FMM} – Força magneto motriz [A·t]
H – Intensidade de campo magnético [A/m]
I – Corrente [A]
 \mathcal{R} – Relutância [A·t/Wb]
R – Resistência [Ω]
v – Velocidade [m/s]
 γ – Taxa de deformação [s⁻¹]
 η – Viscosidade [Pa·s]
 μ – Permeabilidade [H/m]
 τ – Tensão de corte [Pa]
 Φ_B – Fluxo magnético [Wb]

1 Introdução

No presente capítulo pretende-se apresentar o tema do trabalho realizado – Desenvolvimento de um dispositivo de *feedback* de força usando fluídos magneto-reológicos – , o respetivo enquadramento e objetivos bem como a estrutura deste documento.

1.1 Enquadramento e motivação do projeto

Os dispositivos de *feedback* de força são cada vez mais usados nas interações Homem – máquina, podendo estas interações ser locais ou remotas. Nas interações locais abre-se a possibilidade de vários tipos de comando de sistemas em que seja indispensável o utilizador ter a perceção da força que o sistema está a executar. Uma área em que os dispositivos com feedback de força vieram a revolucionar o estado da arte foi a reabilitação motora. Com estes dispositivos abre-se a porta à interação física dos pacientes com objetos virtuais para a estimulação muscular e desenvolvimento de novas ligações cerebrais que adotam eventuais funções perdidas. Na manipulação remota de sistemas é relevante que o utilizador tenha a informação mais completa possível sobre o sistema a controlar para tomar as decisões mais ajustadas, mesmo estando a milhares de quilómetros do sistema. A possibilidade de ter acesso ao *feedback* de força, além de permitir ao utilizador sentir os esforços que atuam sobre o sistema, permite uma interação mais rápida e natural. Este trabalho pretende aliar o *feedback* de força aos avanços tecnológicos desenvolvidos na área dos materiais inteligentes, por forma a tirar partido desta combinação.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo de *feedback* de força usando fluidos magneto-reológicos (FMR) para a manipulação de sistemas.

Para a execução deste objetivo definiram-se as seguintes tarefas:

- Pesquisa bibliográfica sobre FMR;
- Análise aos dispositivos de *feedback* de força (*haptic devices*) existentes no mercado;
- Projeto e aquisição dos materiais necessários à conceção de um protótipo;
- Construção de um protótipo, com um grau de liberdade, usando FMR;
- Teste e caracterização da solução desenvolvida;

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento está organizado em 6 capítulos, conforme descrito seguidamente.

Capítulo 1 – Introdução – No qual esta secção se insere, faz-se uma apresentação do tema da presente dissertação, motivações, enquadramento e objetivos que se pretendem atingir.

Capítulo 2 – Estado da Arte – Apresenta-se uma breve contextualização do tema e uma pesquisa bibliográfica de soluções existentes no mercado ou em fase de desenvolvimento, focando as suas características, princípios de funcionamento e aplicações.

Capítulo 3 – Modelação do dispositivo – são enunciadas as especificações e requisitos do sistema, bem como todo o trabalho de conceção e modelação, mecânica e eletromagnética, de modo a ser realizado o protótipo.

Capítulo 4 – Desenvolvimento do protótipo – descreve-se a aquisição de materiais, montagem e sensorização do dispositivo, sendo apresentada a estrutura final deste. Posteriormente é exposta a interface gráfica que permitirá o controlo e interação do utilizador com o dispositivo e a lógica de controlo desenvolvida.

Capítulo 5 – Verificação Experimental – apresentam-se os testes realizados ao protótipo.

Por último, no capítulo 6 – Considerações Finais – apresentam-se as principais conclusões retiradas da elaboração deste trabalho, expondo também algumas considerações sobre trabalhos futuros a realizar sobre o sistema.

2 Estado da Arte

2.1 Contextualização

A realidade virtual (*virtual reality – VR*) é uma forma de interação entre o Homem e a máquina, na qual o utilizador está imerso numa realidade simulada através de uma interação sensorial em tempo real, proporcionada por simulações gráficas, som 3D e *feedback* háptico [1].

Feedback háptico em realidade virtual refere-se em geral ao *feedback* de força e tato, para além naturalmente do visual. No caso do *feedback* de força o sistema realiza uma oposição ao movimento do utilizador, conseguindo este obter informação sobre dureza, peso e inércia do objeto ou sobre a realidade que está a ser simulada. No caso de *feedback* tátil é possível obter informação de texturas e presença de objetos através de pequenas vibrações por parte do dispositivo.

Aplicações de RV tornaram-se muito comuns nos últimos anos e a sua utilização tende a massificar-se devido ao realismo que é possível obter em tais aplicações. A RV está a ser utilizada em muitas áreas industriais e médicas, na educação, artes, aplicações militares para treino simulado, entre outras. A utilização de sistemas hápticos em RV veio trazer uma nova camada de realismo à simulação e permitir a expansão do campo de aplicações a que esta estava limitada.

Nos dispositivos hápticos é muito usual o método de acionamento ser efetuado através de motores elétricos, mas também é possível encontrar atuadores pneumáticos ou outro tipo de acionamento menos convencional[1]. Desenvolvimentos na área reológica, nos últimos anos, abriram portas à possível utilização de fluídos ativos (*inteligentes*) nos dispositivos hápticos, mais propriamente (FMR) e fluidos eletro-reológicos (FER), sendo o objetivo deste trabalho a elaboração de um dispositivo háptico usando FMR.

2.2 Dispositivos hápticos

O termo Háptico refere-se à manipulação e sensibilidade através do tato/toque. Este começou a ser utilizado no início do século XX por psicólogos no estudo do tato de objetos reais por parte de humanos. Em meados de 1980, com o desenvolvimento de novas máquinas associadas ao toque, nasceu uma disciplina que necessitou de uma nova denominação para a identificar. Em detrimento da criação de uma nova terminologia, optou-se por expandir o significado do termo háptico, passando a englobar o estudo do toque mecânico e as interações táteis entre o Homem e a máquina. A definição de háptico inclui, deste modo, todos os aspetos da recolha e tratamento de dados das manipulações de objetos por humanos, máquinas, ou uma combinação dos dois, podendo os ambientes onde ocorrem essas manipulações serem reais, virtuais ou remotos [2].

É nesta linha que toda a pesquisa e desenvolvimento em sistemas hápticos se foca. Contudo, devido à grande multidisciplinidade presente e ao ritmo que aumentava, foi necessário criar 3 grandes subáreas [2]:

1 – “*Human haptics*” – Estudo do toque humano

2 – “*Machine haptics*” – Desenho, construção e uso de máquinas para melhorar ou substituir o tato humano

3 – “*Computer haptics*” – Desenvolvimento de algoritmos e *software* associados à criação de toque e sensibilidade de objetos virtuais (análogo a gráficos computacionais).

Esta multidisciplinidade expande-se por outras áreas, entre as quais a biomecânica, neurociências, psicofísica, *design* e controlo de robôs, modelação e simulação matemática e engenharia de *software*. Com o convergir de todas estas ciências surgiu uma variedade de aplicações hápticas relacionadas com várias áreas, como por exemplo *design* de produto e equipamento de simulação e reabilitação (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Geomagic Sculpt, exemplo de um sistema háptico aplicado:

a) design de produto [3]; b) Dispositivo de reabilitação [4]; c) Design molecular [5]

Os sistemas hápticos estão cada vez mais em rápida expansão devido à maior necessidade de manipular e interagir com informação, tanto real como virtual. Desta forma, os sistemas hápticos permitem melhorar a capacidade humana de lidar com tal informação. Estes desenvolvimentos fazem-se notar nas capacidades moto-sensoriais: tato, cinestética e capacidades motoras associadas ao sistema cognitivo, assegurando assim uma maneira única e bidirecional de compreensão de informação por parte do cérebro.

Esta interação ainda se encontra, apesar de tudo, subutilizada. Por exemplo, se for adicionada uma realimentação de força e/ou tato de forma a ser obtida uma resolução e largura de banda suficiente para emular a capacidade das mãos (ou outra parte do corpo), abre-se um grande leque de aplicações, por exemplo: simuladores de voo mais realistas para pilotos, ou

equipamento para invisuais realizarem tarefas do dia a dia. Avanços nas tecnologias de informação e miniaturização de sensores e atuadores permitem cada vez mais aplicações nestas áreas.

2.2.1 Sistemas hápticos

Atualmente as operações entre o homem e a máquina fazem parte da rotina diária de uma grande parte da população mundial. Uma das formas de melhorar estas interações é criar mecanismos capazes de fornecer sensações ao utilizador - não apenas visuais - e alargar o espetro para outros sentidos.

Recentemente foi adotado o termo “*Haptics*” para designar a ciência que se dedica ao estudo do tato, da pressão, textura, vibração e outras sensações relacionadas. Torna-se, deste modo, possível criar objetos hápticos virtuais bem controlados para perceber como o tato e as subjacentes funções cerebrais trabalham. Estes sistemas funcionam através de atuadores que fornecem um movimento mecânico à pele para criar uma sensação de tato em resposta a um estímulo elétrico. Tendo em conta esta premissa, começaram a ser desenvolvidos mecanismos que tiram partido do tato para fornecer uma melhor interação homem-máquina, que usam forças, vibrações ou movimentos para recriar sensações de toque [2]. É assim possível usar estes mecanismos na criação de ambientes/objetos virtuais e interagir com eles (Figura 2.2).

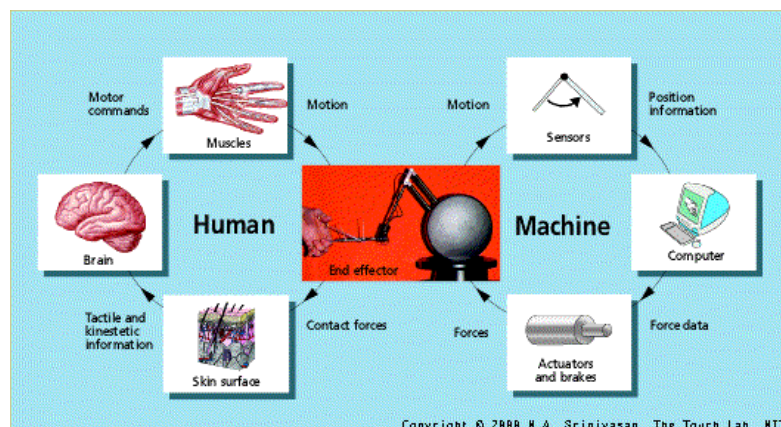


Figura 2.2 – Interação homem, dispositivo háptico, máquina [6]

Uma área que beneficiou muito deste desenvolvimento foi o controlo remoto de máquinas e dispositivos, pelo que começou a ser possível “sentir” a interação do dispositivo a controlar, com o ambiente. Será assim possível concluir que “os mecanismos hápticos estão para o tato como estão os gráficos computadorizados para a visão” [7]

Aquando da implementação inicial destes sistemas em máquinas, notou-se uma melhoria da produtividade e menor risco de dano na função normal da máquina, devido ao operador poder “sentir” a diferença dos objetos que estaria a manipular adequando assim as suas ações sobre os controlos.

2.2.2 Tipos de sistemas hápticos

Como os dispositivos hápticos interagem com os recetores nervosos da pele que sentem o calor, pressão ou textura, é possível propor uma subdivisão destes sistemas em:

- Sistemas de simulação de texturas: criam uma fricção na pele do utilizador, simulando assim diferentes texturas usando por exemplo atuadores eletrostáticos;
- Sistemas de simulação de força: usam atuadores mecânicos para impedir ou criar movimento de forma a interagir com os músculos e tendões, produzindo uma sensação

de força a ser aplicada sobre o utilizador. São muito usados em simulações que têm por objetivo:

- deteções de colisão;
- entretenimento e realidade virtual;
- modelação e montagem virtual;
- treino e aquisição de capacidade de utilizadores para a realização de tarefas específicas: pilotos, controladores de robôs remotos, treino médico;
- reabilitação motora e visual;
- tele operação: aplicações médicas (robôs cirúrgicos), manipulação remota de materiais perigosos.

2.2.3 Sistemas hápticos existentes no mercado

A empresa *CyberGlove Systems* [8] disponibiliza luvas hápticas para interação com objetos 3D virtuais e monitorização de movimento. No caso da luva *CyberTouch II* (Figura 2.3), esta interação deve-se a sensações vibro-tácteis, sendo que a monitorização fica a cargo de 22 sensores piezoresistivos e há comunicação sem fios com um recetor. O sistema háptico é constituído por 6 atuadores pequenos e leves adaptados à luva, um para cada dedo e um para a palma. Cada um destes atuadores pode ser programado independentemente de modo a provocar o nível de *feedback* desejado. Os atuadores podem gerar:

- Pulsos ou vibrações contínuas para visualização de dados (vibrações proporcionais à intensidade de campos magnéticos), aproximação a matérias perigosas, quantidade de água ou até intensidade de luz. A capacidade é de 1.2 N de força à frequência de 125 Hz.
- Vibrações customizadas que geram simulações tácteis no espaço-tempo, como por exemplo, o movimento ou um escoamento de um fluido através da mão.



Figura 2.3 – Luva *CyberTouch II*

Nos últimos anos uma área que tem utilizado *feedback* tátil é a dos dispositivos móveis (*smartphones*) e a área dos videojogos, para informar o utilizador de uma certa ação que este realiza sobre o dispositivo. Para tal, estes dispositivos usam a vibração como meio de atuação. Estes tipos de sistemas surgiram nos *smartphones* devido à necessidade de informar o utilizador que estava a interagir com o ecrã. Para os videojogos, a intenção acabava por ser transmitir aos

jogadores alguma imersão no ambiente virtual. Por exemplo, um simulador de condução onde é possível sentir irregularidades no asfalto.

Tanto nos dispositivos móveis como na indústria de videogames os sistemas hápticos evoluíram, passando a ter uma componente de simulação em 3 dimensões, através de vários sensores e atuadores. Nos *smartphones* é característico encontrar capacidade de análise e reação a diferentes pressões devido ao toque (*apple 3dtouch*) [9]. A empresa “*Tanvas*” [10] usa tecnologia eletrostática para simular texturas que podem ser sentidas pelas pontas dos dedos quando movimentados por uma determinada zona de um ecrã. Outra tecnologia que permite modelar o atrito nos vidros dos *touchscreens*, está a ser desenvolvida pela *TPaD Tablet Project* [11] e envolve o uso de tecnologia de ultrassons.

Quanto aos videogames, a capacidade de distinção de força já era algo usado há alguns anos, mas em 2007 foram introduzidos dispositivos de *feedback* de força, onde neste momento é possível encontrar muitos tipos de sistemas comerciais para *feedback* háptico, devido à massificação da realidade virtual e manipulação de sistemas remotos. Tendo várias empresas apresentado as suas soluções para minimizar o vazio tecnológico que se criou.

Uma destas empresas foi a, já referida, *CyberGlove Systems*, que, para além de *feedback* tátil, tem disponível uma luva para *feedback* de força – *CyberGrasp* (Figura 2.4). O *CyberGrasp* funciona como um leve exosqueleto que se aplica a uma luva de aquisição de dados *CyberGlove* e, assim, aplica uma força resistiva independente, cerca de 12N, a cada dedo da mão relativamente à palma da mão, transmitindo ao utilizador formas e tamanhos de objetos simulados em realidade virtual.



Figura 2.4 – Luva CyberGrasp

Este dispositivo é constituído por uma rede de tendões sintéticos que percorre o exosqueleto até à ponta dos dedos. Cada dedo tem um atuador independente e totalmente programável, de forma a impedir que haja um esmagamento ou penetração do objeto virtual. Estes atuadores estão num pequeno módulo que pode ser colocado numa secretária ou, no caso de se necessitar de mobilidade extra, é possível adquirir uma mochila *GraspPack* para tornar o sistema móvel. O dispositivo aplica a força na perpendicular à ponta dos dedos durante o movimento, permite o movimento completo da mão e não impede a movimentação do utilizador. O dispositivo foi desenhado inicialmente para a marinha dos EUA a pensar na teleoperação robótica, ou seja, controlar uma mão robótica à distância e poder sentir o objeto que está a ser manipulado.

O sistema é composto por dois sistemas robóticos, o *CyberForce* (Figura 2.5) que, em conjunto com o exosqueleto *CyberGrasp*, permite aplicar à mão e ao braço forças externas em tempo real, sendo possível ter 6 graus de liberdade para mapeamento dos movimentos de translação e rotação da mão. Com estes dispositivos torna-se possível interagir e manipular intuitivamente objetos virtuais através de uma sensação e de transmitir ao utilizador informações da inércia e peso de objetos virtuais quando estes estão a ser manipulados.

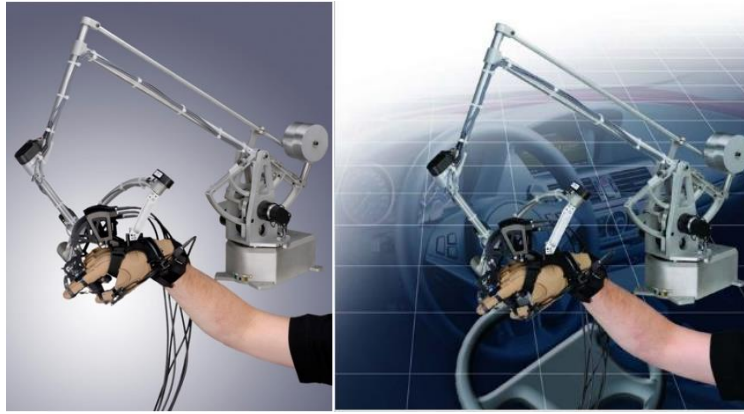


Figura 2.5 – Sistema *CyberForce*

A 3DSYSTEMS [12] disponibiliza uma gama alargada de dispositivos que permitem *feedback* háptico e navegação 3D, estes são capazes de medir posição no sistema cartesiano (x,y,z) e orientação (rotação, inclinação longitudinal, inclinação transversal ou *roll, pitch, yaw*) do *stylus* do dispositivo podendo este ser customizável em alguns dos modelos disponíveis. O dispositivo de feedback de força, está disponível em 3 (x,y,z) ou 6 (x, y, z, *roll, pitch, yaw*) graus de liberdade.

Estes dispositivos usam motores elétricos para criar as forças de interação com a mão do utilizador obtendo-se assim a sensação de toque e interação com os objetos remotamente controlados ou virtuais.

Como não existe um *standard* em programas de controlo háptico, cada empresa tem os seus *softwares* proprietários, no caso da 3DSYSTEMS isso não é diferente, disponibilizando assim o *software* de interface OpenHaptics® toolkit. Com este *toolkit* é possível aceder a todos sensores, controlar atuadores e integrar facilmente o dispositivo em aplicações já existentes.

Os dispositivos *Geomagic Touch* são a gama de entrada dos dispositivos hápticos desta empresa, tem uma alta implementação na indústria devido à sua relação custo-qualidade, apresentam 6 DOF, sendo que 3 possuem *feedback* de força. Na Figura 2.6 apresentam-se os 3 dispositivos desta gama e na Tabela 2.1 as suas especificações.



Figura 2.6 – Dispositivos *Geomagic Touch* [12]

Tabela 2.1 – Especificações dos dispositivos Geomagic

	Touch 3D Stylus	Geomagic® Touch™	Geomagic® Touch™ X
Espaço de trabalho (mm)	265 x 241 x 89	160 x 120 x 70	160 x 120 x 120
Tipo de movimento	movimento da mão girando o pulso		
Resolução (mm)	0,084	≈0,055	≈0,023
Força máxima (N)	3,4	3,3	7,9
GL feedback de força	3 (x, y, z)		
GL na aquisição de posição	(x, y, z) encoders digitais (roll, pitch, yaw) (±5% potenciômetros lineares)		
Interface	USB 2.0	Ethernet RJ45	Ethernet RJ45

Os dispositivos da gama Phantom® Premium™ foram construídos a pensar na durabilidade e na fácil ligação ao PC, introduzem elevada exatidão de medição e maior área de trabalho.

Como dito anteriormente alguns destes modelos oferecem *feedback* de força nos 6 graus de liberdade, ou seja, binário disponível em torno dos eixos coordenados (Tx, Ty, Tz)

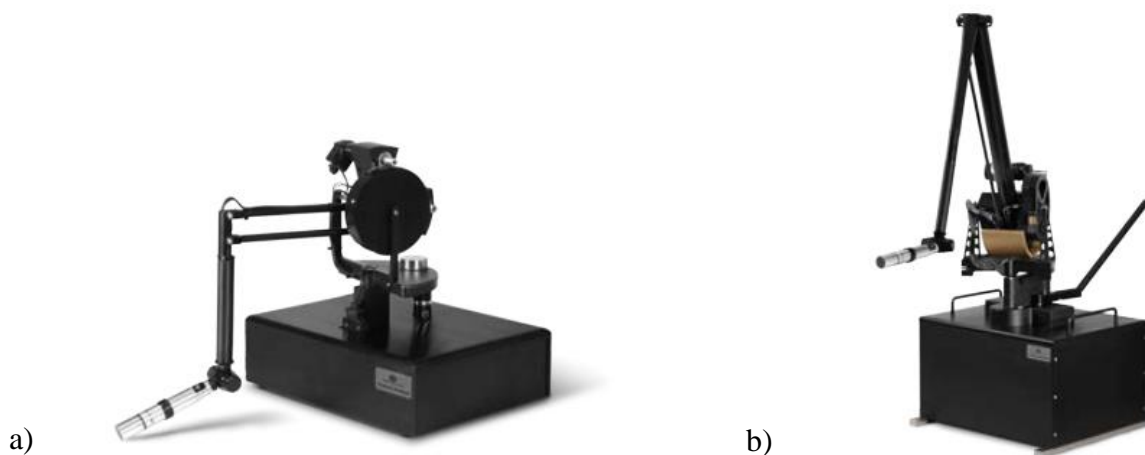


Figura 2.7 – a) Phantom® Premium™ 1.5; b) Phantom® Premium™ 3.0/6DOF

As especificações destes são apresentadas na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Especificações dos dispositivos Phantom Premium

		Premium 1.5	Premium 1.5/6DOF	Premium 1.5 High Force	Premium 1.5 High Force/6DOF	Premium 3.0/6DOF
Espaço de trabalho	Translação	381 x 268 x 191 (mm)		381 x 268 x 191 (mm)		838 x 584 x 406 mm
	Rotação					
	Yaw	297°				
	Pitch	260°				
	Roll	335°				
Tipo de movimento		Movimento do antebraço rodando o cotovelo				Movimento total do braço rodando o ombro
Resolução (mm)	Translação	860 dpi/0,03mm		3784 dpi/0,007 mm		> 1000 dpi /~0,02 mm
	Rotação					
	Yaw e Pitch	0,0023°				
	Roll	0,008°				
Força máxima (N)	Translação	8.5 (N)		37.5 (N)		22 (N)
	Rotação					
	Yaw e Pitch	515 mNm				
	Roll	170 mNm				
Rigidez		3.5 N mm-1				1 N mm-1
GL feedback de força		x, y, z	x, y, z Tx, Ty, Tz	x, y, z	x, y, z Tx, Ty, Tz	x, y, z Tx, Ty, Tz
GL na aquisição de posição		x, y, z, roll, pitch, yaw				
Interface		Porta paralela				
Apontadores opcionais		Encoder cardan	Tesouras/ Almofada para dedo (pressão)	Encoder cardan	Tesouras/ Almofada para dedo (pressão)	Tesouras/ Almofada para dedo (pressão)

2.3 Fluidos MR/ER

Desde o final do século XX a ciência dos materiais tem evoluído no sentido de criar novos materiais, ou a possibilidade de alterar as suas propriedades através de ações externas, nomeadamente pela aplicação de campos elétricos ou magnéticos, estímulos térmicos ou químicos. Estes novos materiais foram designados como “materiais inteligentes” e vieram possibilitar um sem numero de aplicações inovadoras. Na verdade, muitos deles já fazem parte do dia a dia como, por exemplo, os materiais piezoelétricos, magneto reostáticos, eletro reostáticos e metais com memória de forma.

Reologia, tem origem na palavra Grega *Rheos*. que significa fluir ou escoar e é a ciência que estuda os escoamentos sobre condições de cargas externas. No caso dos FMR essa propriedade é a viscosidade aparente. Esta propriedade é alterada quando o fluido é exposto a um campo magnético e a alteração na viscosidade faz com que o fluido passe de um estado

semilíquido para um estado semissólido. Tal mudança de estado acontece com uma elevada rapidez (ordem dos 15ms).

Os FMR são compostos por micropartículas ferromagnéticas (*soft magnetic particles*) de diâmetro 2-10 μm , suspensas num fluido de transporte (tipicamente um óleo sintético) (Figura 2.8), podendo conter mais algumas substâncias de forma a obter uma suspensão mais estável e de longa duração.

No caso de as partículas terem diâmetros superiores a 10 μm seria instável a sua suspensão no fluido de transporte, devido ao fenómeno de sedimentação (*stokes settling velocity*).

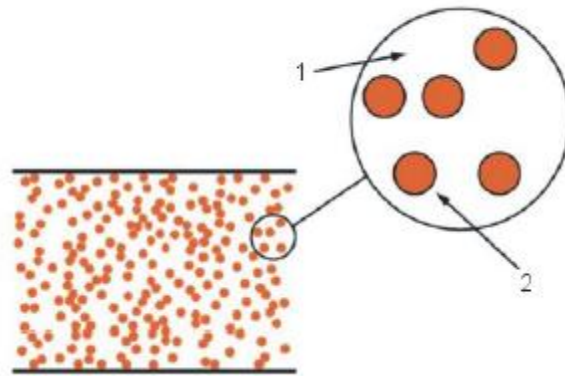


Figura 2.8 – FMR; 1 – fluido de transporte; 2 – partícula ferromagnética[13]

A Tabela 2.3 apresenta as características gerais de um fluido magneto reológico.

Tabela 2.3 – Propriedades típicas de um FMR[13]

Propriedade	Valor típico
Viscosidade inicial	0,2 – 0,3 (Pa.s a 25 °C)
Densidade	3 – 4 (g/cm ³)
Intensidade campo magnético	150 – 250 (kA/m)
Tensão de cedência	40 – 100 (kPa)
Tempo de resposta	10 – 15 (ms)
Fonte de alimentação	2 – 25 V, 1 – 2 A
Temperatura de funcionamento	-50 a 150 (°C)

A utilização de partículas de menores dimensões seria uma possibilidade para tornar a suspensão mais estável, ou seja, diminuir o tamanho das partículas ferromagnéticas. Se o diâmetro das partículas for menor do que 1 μm é possível tornar a suspensão mais instável devido ao efeito de movimento Browniano (*Brownian motion*) [14] segundo o qual as partículas efetuam movimentos aleatórios colidindo entre si. Para além disso, seria economicamente inviável a sua utilização devido ao maior custo de fabrico.

Outra possibilidade é usar nano partículas, os óxidos por exemplo, como os usados em dispositivos de gravação magnética, estes apresentam diâmetros muito baixos, na ordem dos 30 nm, tornando a suspensão muito estável, mas devido à sua baixa saturação magnética, a tensão de corte disponível ronda os 5 kPa. Têm uma elevada viscosidade plástica devido à sua grande área superficial.

Na ausência de um campo magnético os fluídos comportam-se como fluídos newtonianos. Aquando da aplicação de um campo magnético ao fluido, as partículas ferromagnéticas adquirem um dipolo magnético alinhado com a direção do campo magnético externo (Figura 2.9) limitando o seu movimento. Tal limitação, por sua vez, regula o movimento do fluido de transporte. Para romper este alinhamento é necessária a aplicação de uma tensão de corte.

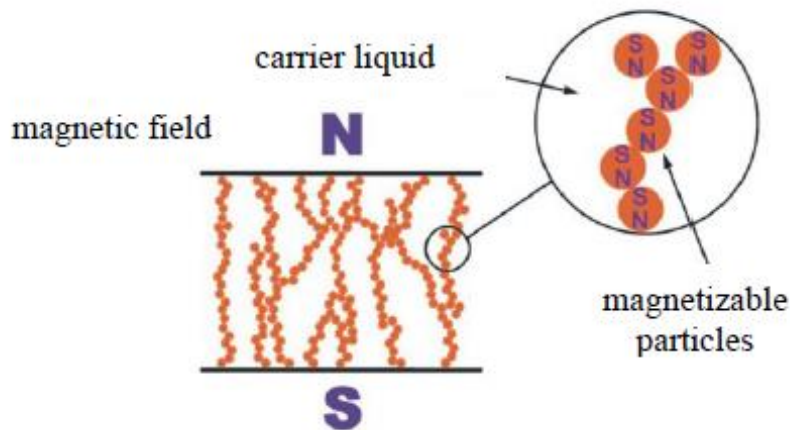


Figura 2.9 – FRM sob um campo magnético externo, pormenor dos dipolos nas partículas ferromagnéticas[13]

Com o aumento da intensidade de fluxo magnético (B) no FMR, aumenta a tensão de corte do fluido, este deixa de ser um fluido newtoniano e passa a ser um fluido não newtoniano em que a sua tensão de cedência não é diretamente proporcional à taxa de deformação – o fluido só começa o seu escoamento quando se vence a tensão de cedência.

Na Figura 2.10 apresenta-se o gráfico da relação entre tensão de corte e taxa de deformação. A verde a reta que representa os fluídos newtonianos com uma relação proporcional e a roxo a representação dos plásticos de Bingham.

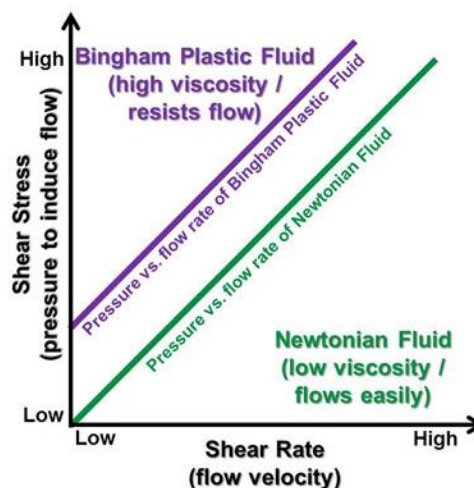


Figura 2.10 – Tensão de corte vs. taxa de deformação [15]

Para se obter a tensão de cedência na maior parte das aplicações em engenharia, nas quais este fluido é usado, pode descrever-se o comportamento usando o modelo plástico de *Bingham* (o teorema de Herschel-Bulkley [16] também podia ser usado mas introduzia complexidade desnecessária ao problema), que relaciona a tensão de cedência e a densidade de fluxo magnético com a taxa de deformação e a viscosidade plástica do fluido (2.1).

$$\tau = \tau_{yd}(B) + \eta\dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Em que:

$\tau_{yd}(B)$ – Tensão de cedência do FMR devido à densidade de fluxo magnético [Pa]

η – Viscosidade do fluido à velocidade correspondente [Pa·s]

γ – Taxa de deformação

Por norma, materiais MR conseguem atingir tensões de cedência entre 50 a 100 kPa para campos magnéticos de 150 a 250 kA/m. Descobriu-se que a rugosidade das superfícies de contacto com o fluido é importante para as tensões de cedência, especialmente no caso de baixos campos magnéticos [17]. Os FMR dentro de um campo magnético de 300 kA/m, atingem o seu ponto de saturação no qual o aumento do campo magnético não aumenta o valor da tensão de cedência do fluido. Tal limite pode ser estudado recorrendo a um *software* de simulação com base em elementos finitos.

Se o campo magnético diminuir ou deixar de existir, o fluido responde minimizando a sua viscosidade aparente ou colocando-a perto de zero. Quanto à temperatura de utilização, foi possível verificar que se obtém uma grande banda de utilização sem que as suas propriedades se alterem de -50 a 150 °C. O tamanho das partículas e a sua distribuição pela zona de trabalho pode influenciar substancialmente as propriedades magnéticas deste tipo de fluídos aquando da sua colocação num campo magnético.

Os FER são uma suspensão de finas partículas não condutoras, mas eletricamente ativas de diâmetros não superiores a 50 μm , suspensas num fluido de transporte eletricamente isolante. Estas partículas podem ser ferroelétricas ou feitas com material condutor com uma camada externa isolante [18].

Para ativação deste fluido é usado um campo elétrico o que provoca uma variação da viscosidade aparente deste, alterando a sua consistência de líquido para algo semelhante à de um gel, este efeito tem um tempo de resposta da ordem dos milissegundos.

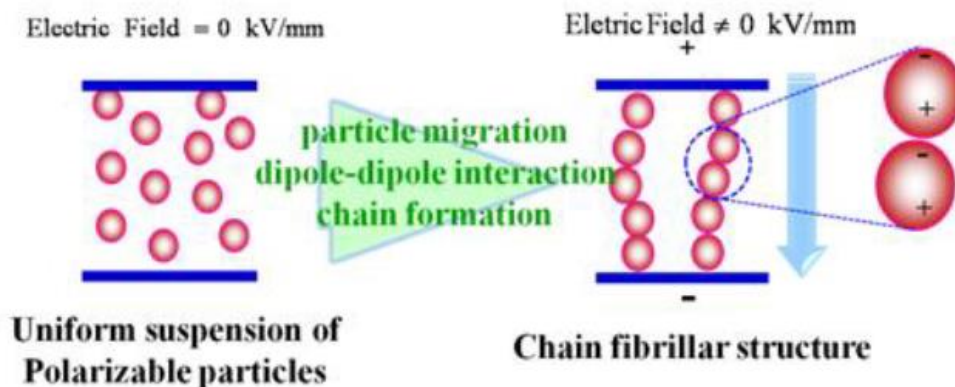


Figura 2.11 – Esquema de um FER, com e sem um campo elétrico aplicado[19]

Os FER foram desenvolvidos na década de 40 [20] para atuar válvulas hidráulicas e embraiagens através de um campo elétrico da ordem de 1 kV.

2.3.1 Modo de funcionamento em dispositivos

Na generalidade das aplicações pode-se classificar o funcionamento de FMR em dispositivos do seguinte modo:

- Polos fixos (escoamento com diferencial de pressões);
 - Servo-válvulas, amortecedores e absorsores.
- Polos móveis (modo de corte direto/deslizamento);
 - Embraiagens, travões, mandris e dispositivos de autobloqueio.

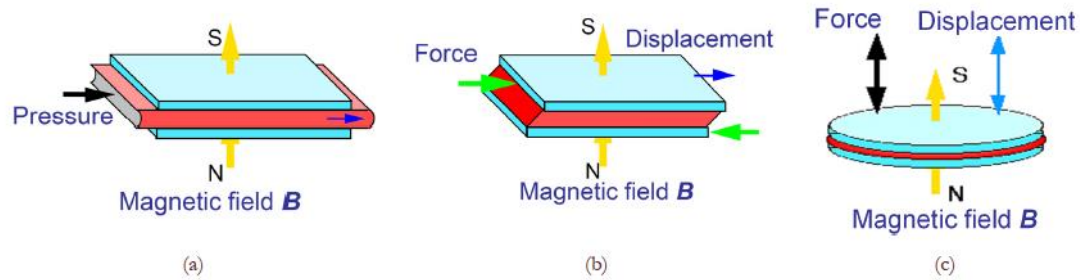


Figura 2.12 – Modos de funcionamento dos FMR; a) modo de deslizamento; b) diferencial de pressão; c) modo de compressão

Para estas configurações (Figura 2.12) pode-se assumir o fluido como a *interface* entre 2 placas paralelas.

Em modo de deslizamento, o FMR está estacionário e o que se move é uma ou ambas as paredes de contacto.

Quando se regista um escoamento com diferencial de pressões, as paredes de contacto estão estacionárias e o fluido movimenta-se.

Quando se têm polos móveis pode existir outro tipo de escoamento. O fluido pode ser comprimido entre as duas paredes de forma a ser obrigado a fluir. Tal modo é usado para movimentações muito pequenas e com uma elevada disponibilidade de força.

A resistência ao movimento é dada pela viscosidade do fluído, que pode ser alterada caso se altere o campo magnético a que este está sujeito. Quando não existe um campo magnético, a resistência ao movimento provém essencialmente dos vedantes e guiamento do sistema.

2.3.2 Aplicações

Sendo materiais inteligentes, o FMR apresenta características importantes para tornar os dispositivos adaptáveis a diferentes condições de funcionamento, permitindo a variabilidade das propriedades em que estes são aplicados de forma controlada e confiável, entre elas, rigidez, amortecimento e viscosidade. Uma das áreas em que os FMR se tornaram vitais é o controlo ativo de vibrações e movimento.

Com o aparecimento de microprocessadores, foi possível implementar estratégias de controlo em tempo real para sistemas com FMR, expandindo, desta forma, a sua comercialização. A venda de dispositivos com FMR começou em 1995 incorporado em travões para equipamentos de exercício de fisioterapia. Desde essa altura a tecnologia com FMR tem crescido de forma estável e, nos últimos anos surgiram outros produtos:

- Amortecedores de elevada dimensão para mitigar efeitos sísmicos em estruturas de engenharia civil [21];
- Amortecedores de grande dimensão para mitigar vibrações em cabos de pontes devido às forças do vento [22];
- Amortecedores lineares para controlo ativo de vibrações em camiões de elevada tara;
- Amortecedores para próteses de pernas;
- Amortecedores tipo esponja para máquinas de lavar;
- Amortecedores variáveis para automóveis [23][24];

- Coletes à prova de bala [25];
- Equipamento de polir [26];
- Travões lineares e rotativos para posicionamento preciso de atuadores pneumáticos [27];
- Travões rotativos para *feedback* de força em sistemas *steer-by-wire* [28];

A Tabela 2.4 apresenta as especificações de alguns amortecedores lineares com FMR.

Tabela 2.4 – Alguns dispositivos que usam FMR

Designação	capacidade de força	Curso
RD-8040-1 MR Damper (Short Stroke)[28]	>2447 N a 5cm/s e 1A;	55(mm)
RD-8041-1 MR Damper (Long Stroke)[28]	<667 N a 20cm/s e 0A	74(mm)
MR Damper for wind turbines [22]	± 12 kN a 0,9A; 22kN a 1,8A; 27 kN a 2,7A	40(mm)
Miniature Actuator for High force Locking and Damping[29]	1500 N	8 (mm)
MR brake for assistive knee braces [30]	20 Nm	360º

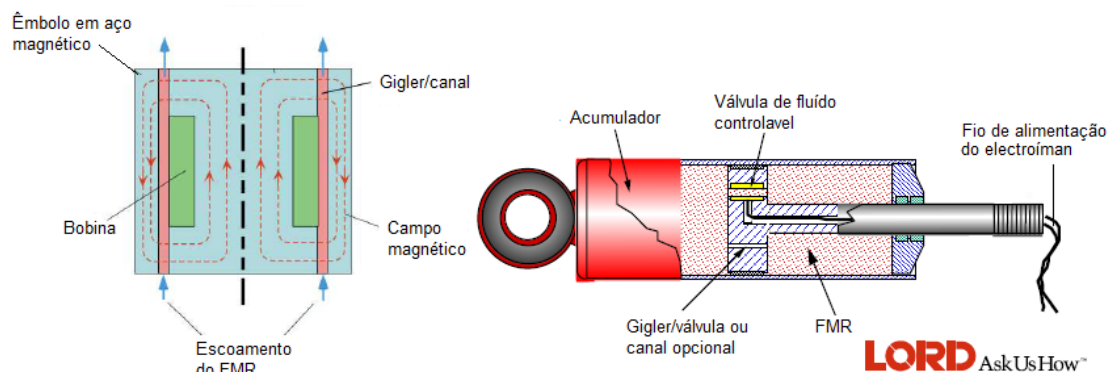


Figura 2.13 – exemplo de um amortecedor com FMR

A Figura 2.13 apresenta o esquema tecnológico usado na maioria dos amortecedores lineares com FMR. Como descrito anteriormente, a maior vantagem é a inexistência de peças móveis para a variação da capacidade de amortecimento e a possibilidade de definir razões de amortecimento para situações específicas através da implementação de algoritmos de controlo.

A indústria automóvel tem adaptado esta tecnologia de forma impressionante, devido à sua simplicidade e gama de controlabilidade. Empresas como a BWI GROUP ou a MagneShocks oferecem várias soluções comerciais para suspensões adaptativas em veículos comuns e desportivos.

Na Figura 2.14 e Figura 2.15 apresentam-se alguns componentes do sistema MagneRide™ e MagneShocks.

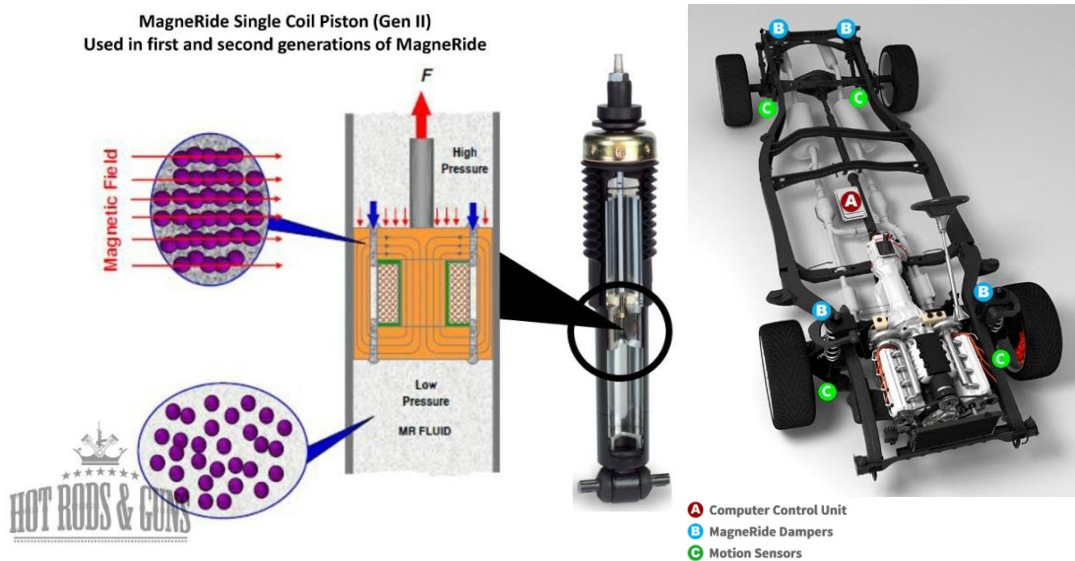


Figura 2.14 – Sistema MagneRide da BWI GROUP [23][31]



Figura 2.15 – Sistema amortecedor MagnShock 3 Gen [24]

Alguns dos benefícios que estes sistemas introduzem na indústria automóvel são:

- elevada fiabilidade e baixa manutenção;
- aumento das forças de amortecimento;
- redução das forças mínimas de amortecimento, melhorando o isolamento e suavidade de condução;
- amortecimento independente em cada roda controlado pela ECU que diminui o *body roll*;
- tempo de *loop* de controlo de aproximadamente 1ms;
- sensorização do amortecedor, disponibilizando a posição da roda em relação ao chassis (abrindo possibilidade de controlo desta altura);

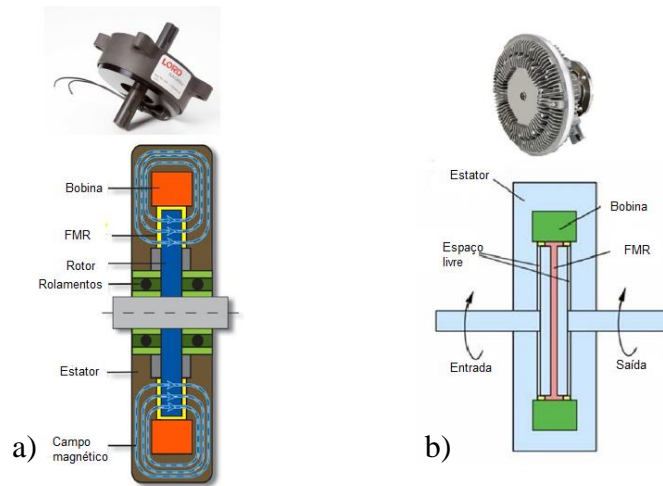


Figura 2.16 – Travão e embraiagem com FMR comercializados pela LORD

Os dispositivos da Figura 2.16 são comercializados pela LORD corp. e caracterizam-se por terem FMR na fenda entre as duas superfícies. A bobine é usada para criar o campo de ativação do fluido.

Tanto o poder de travagem como o binário de saída, no caso a) e b) respetivamente, são proporcionais à corrente de entrada na bobina.

2.4 FMR aplicados a sistemas hápticos

Como já descrito, a facilidade de controlo e transmissibilidade de força por parte dos FMR, permitiram a criação de dispositivos hápticos mais pequenos com menos partes móveis e com elevada capacidade de força.

Na Tabela 2.5 são apresentados alguns dispositivos hápticos baseados em FMR, que foram obtidas durante o levantamento bibliográfico efetuado.

Tabela 2.5 – Propriedades de alguns dispositivos hápticos baseados em FMR

Nome do dispositivo	Graus de liberdade	Tipo de grau de liberdade	Capacidade máxima de força		Estado comercial
			Menor atuador	Maior atuador	
LORD RD-8058/8191 TFD [32], [33]	1	Rotacional	12/5 [Nm]		Disponível
Haptic Glove with MR Brakes for virtual reality [1]	1	Rotacional	0,1/ 0,4* [Nm]	0,25/0,821* [Nm]	Protótipo
Compact MR-Brake with Serpentine Flux Path for Haptics [34]	1	Rotacional	10,9 [Nm]		Protótipo
Force Feedback Dampers for Telerobotic Systems [35]	2 5	Rotacional	Pequeno 2,5 / Grande 5 [Nm] 2,5 [Nm]		Protótipo
Design of a New 4-DOF Haptic Master Featuring Magnetorheological Fluid [36]	4	Rotacional	2 [Nm]		Protótipo
Haptic joystick with hybrid actuator using air muscles and spherical MR-brake [37]	2	Rotacional Linear	8,1 (4,4 + 3,7 atrito estático) [Nm] 16 N + 13,5 N com os músculos pneumáticos saturados		Protótipo
Miniature haptic button [38]	1	Linear	12 N		Protótipo
Linear magnetorheological brake with serpentine Flux path [39]	1	Linear	173,3 N		Protótipo
MR fluid for surgical simulators [40]	2	Linear	3 N		Protótipo
Permanent-Magnet Exciter [41]	3	n.a.	3,5 N		Protótipo

*valor com uma engrenagem 28:120

2.4.1 LORD RD-8058/8191 TFD

Os sistemas hápticos de *steer-by-wire* são dos que já utilizam comercialmente dispositivos com FMR. A LORD corp. tem, comercialmente disponíveis, 3 variantes deste dispositivo (Tabela 2.6), em que é possível escolher qual a melhor que se adequa a cada aplicação.

Tabela 2.6 – Diferentes TFD da LORD® [28]

Nome do dispositivo	Tipo de ligação	Capacidade máxima de força[Nm]	Preço
LORD RD-8058-1 TFD [32]	Veio plano	12	\$600
LORD RD-8191 TFD [33]	Veio perfurado	5	\$600
LORD RD-8191 TFD	Veio plano	5	\$600

Na Figura 2.17 pode observar-se o esquema de funcionamento do sistema *steer-by-wire*:

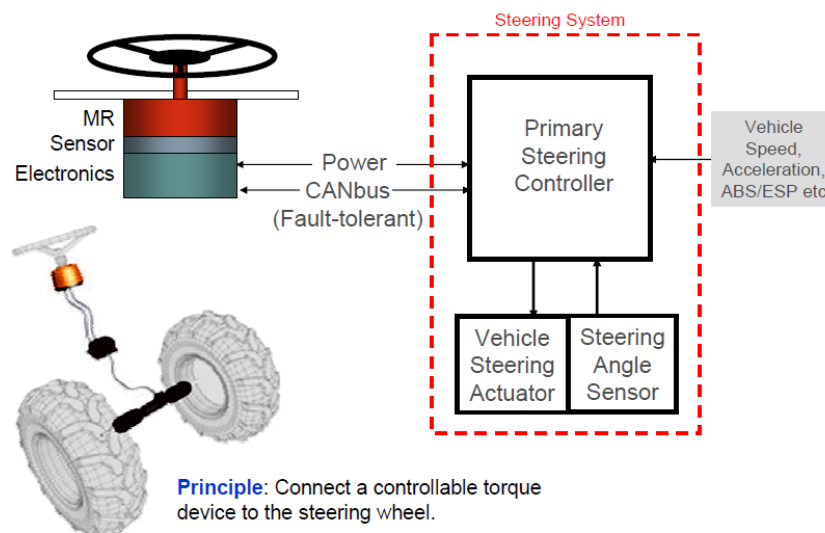


Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um sistema *steer-by-wire*

Este sistema utiliza um dispositivo de *feedback* de força com 1 grau de liberdade rotacional e os seus constituintes podem ser observados na Figura 2.18:

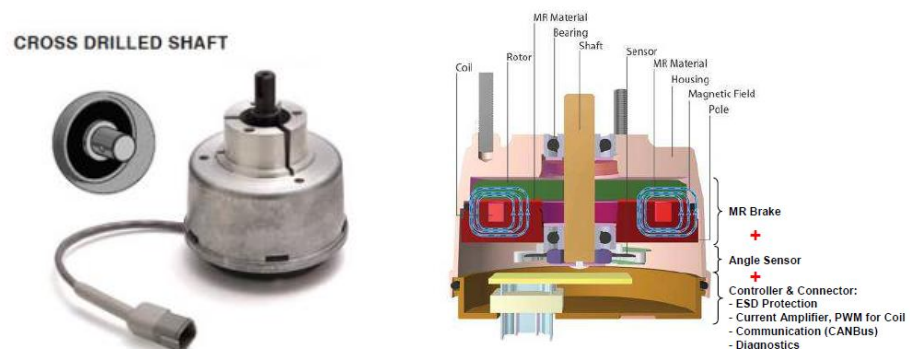


Figura 2.18 – RD-8191 TFD (veio perfurado) e esquema de funcionamento

Neste sistema o sensor angular envia a posição para a centralina (*ECU – electronic control unit*) de modo a atuar a direção das rodas. O binário do dispositivo é calculado baseado

na posição rodas, dinâmica do veículo e outras implicações de controlo (velocidade, paragens). Deste modo é criado um *feedback* para o utilizador baseado nas informações provenientes da ECU. Na Figura 2.19 apresenta-se um exemplo de aplicação comercial.



Figura 2.19 – Exemplo de aplicação comercial do dispositivo[42].

2.4.2 Travão linear com FMR e campo magnético serpenteante

Este dispositivo vem alterar a arquitetura dos travões lineares para sistemas hápticos diminuindo as forças de atrito de Coulomb não controláveis, isto é, atritos devido a vedantes, guiamento e diferenciais de pressão nas câmaras do cilindro.

Os objetivos são alcançados com a remoção do êmbolo do atuador, o que ao desaparecimento dos, diferenciais de pressão ao longo da haste e dos conjuntos de vedação e guiamento de elevada rigidez necessários para fazer frente às elevadas pressões. Por último, mas muito importante, o modo de funcionamento do FMR passou de modo válvula para um modo de corte puro. Na Figura 2.20 pode observar-se um esquema do dispositivo em questão.

Neste novo modo de funcionamento as equações de controlo tornam-se muito mais simples a utilização do modelo plástico de Bingham para descrever o comportamento do fluido, dado pela equação (2.1).

Como a segunda parte da equação (2.1) representa os efeitos de atritos não controláveis quando o dispositivo está desligado (*off-state*) e a sua contribuição para a força total do dispositivo foi calculada como sendo 0,43 N. Assim, foi desprezada devido à força com o dispositivo ativo ter um valor de 170 N. A força total é obtida pela equação (2.2):

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau_{yd}(B) + F_{Coulomb} \quad (2.2)$$

Sendo:

r – Raio da haste [m]

L – Comprimento da haste em contacto com FMR [m]

$F_{Coulomb}$ – Todas as forças não controláveis presentes no dispositivo [N]

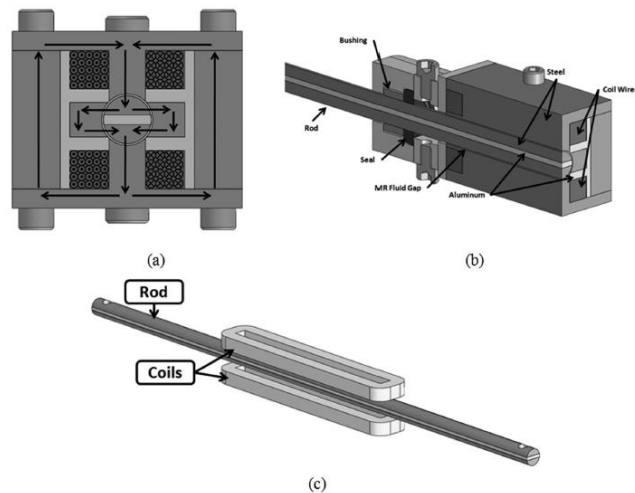


Figura 2.20 – a) percurso do fluxo de campo magnético; b) esquema do dispositivo; c) haste e bobinas [39]

Outra das características deste dispositivo é a presença de um campo magnético serpenteante, como se pode observar na Figura 2.20 a), que realiza 6 passagens pelo fluido ativando-o em quase toda a sua área de contacto com as superfícies. Desta forma, multiplica a capacidade de força do dispositivo sem a necessidade de aumentar o fluxo de campo magnético a que este está sujeito, diminui o tamanho do atuador e as necessidades energéticas em relação a apenas 2 passagens do campo magnético pelo fluido. Na Figura 2.21 mostra-se as linhas de fluxo do campo magnético, obtidas através da simulação em elementos finitos

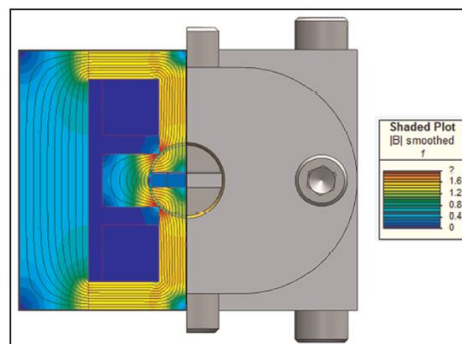


Figura 2.21 – Simulação em elementos finitos do fluxo de campo magnético [39]

Para atingir as especificações de força foi usado o FMR da BASF® com uma tensão de cedência máxima após saturação magnética de 106 kPa.

O dispositivo final (Figura 2.22) apresenta as seguintes especificações (Tabela 2.7):

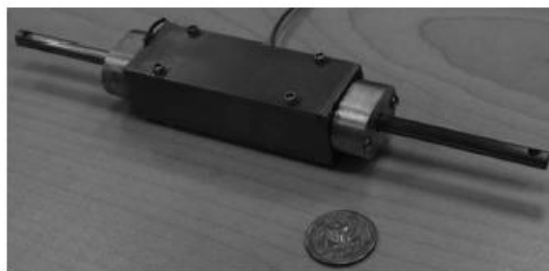


Figura 2.22 – Protótipo final do dispositivo [39]

Tabela 2.7 – Especificações do dispositivo [39]

Área de secção (mm²)	712
Volume (mm³)	79573
Curso (mm)	Infinito
Força máxima (N)	173.3
Forças de Coulomb (N)	5.4
Fonte de corrente (A)	1
Potência (W)	15

2.4.3 Simulador cirúrgico baseado em FMR

Com uma arquitetura bastante diferente do que até aqui tem sido evidenciado, este protótipo pretende simular forças resistivas ao corte em tecidos/órgãos humanos. A finalidade deste prende-se com o treino médico cirúrgico.

Com os dispositivos tradicionais de treino, existe um limite ao nível dos instrumentos que a estes estão acoplados, sendo difícil (ou até impossível) a sua troca (Figura 2.23). Este dispositivo vem permitir uma maior adaptabilidade ao equipamento cirúrgico de corte, visto que o utilizador pode colocar diretamente o objeto no fluido e sentir a força resistiva ao seu movimento.

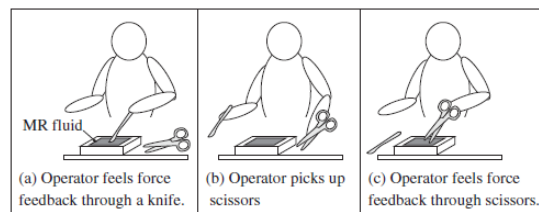


Figura 2.23 – Exemplo da fácil alteração de equipamento cirúrgico [40].

Como os FMR apresentam baixas viscosidades elásticas (ao contrário dos tecidos humanos), são implementados servomotores para mover o recipiente de fluido e, desta forma, obter uma representação da deformação dos tecidos.

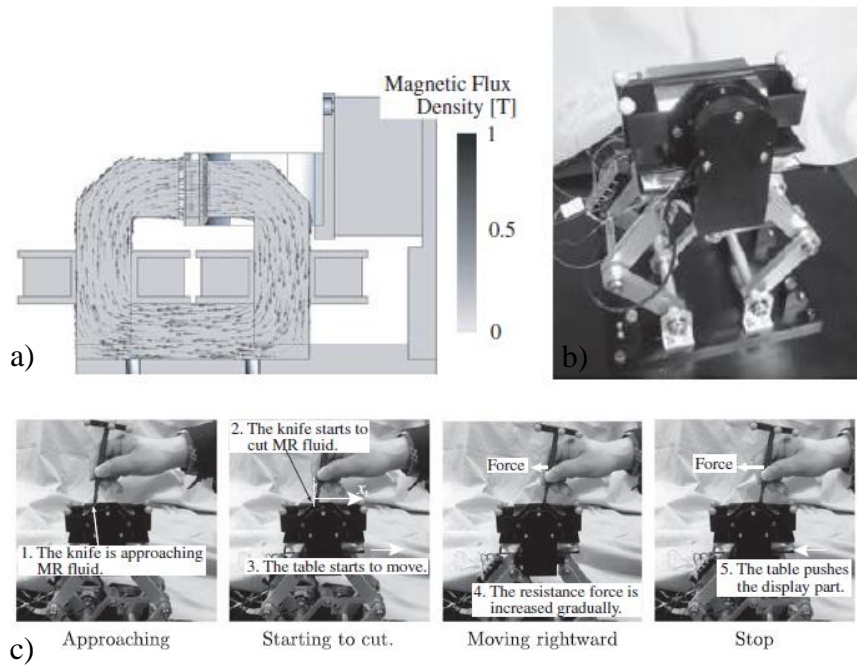


Figura 2.24 – a) simulação EF do B; b) protótipo final; c) demonstração experimental [40]

O dispositivo (Figura 2.24) foi capaz de atingir uma força de 2,7 N, o que é suficiente para o utilizador obter uma sensação de corte. Quando o utensílio está parado, os servomotores movimentam a mesa, continuando assim o dispositivo a transmitir uma sensação de força ao utilizador.

3 Projeto do dispositivo

Neste capítulo pretende-se descrever o processo de desenvolvimento de um dispositivo de *feedback* de força com um grau de liberdade usando FMR, desde a especificação do problema, escolha de materiais e simulações. O sistema desenvolvido e implementado baseia-se no artigo “*Linear magnetorheological brake with serpentine flux path as a high force and low off-state friction actuator for haptics*”[39]. A possibilidade de expansão do curso de funcionamento apresentando uma força de atuação elevada e ter um grau de liberdade linear, foram fatores determinantes para a adaptação deste sistema.

3.1 Especificações do sistema

Como já mencionado nos objetivos para esta dissertação, foi proposta a realização de um dispositivo de *feedback* de força usando FMR, para esse fim, foram definidos os requisitos e especificações que devem ser cumpridas no desenvolvimento do protótipo.

Requisitos funcionais:

- *Interface* de controlo do sistema;
- Um grau de liberdade;
- Usar FMR;
- Aquisição de força e posição durante o uso do dispositivo;
- Controlo do dispositivo em malha fechada;

Especificações:

- Capacidade máxima de força superior a 60 N;
- Curso do atuador, 100 mm;
- Velocidade de máxima de funcionamento 50 mm/s.

3.2 Arquitetura do sistema

Atendendo às especificações, várias soluções distintas foram consideradas. Como se pode observar na pesquisa bibliográfica, há uma elevada variedade de dispositivos rotativos, mas esta tipologia acabou por ser excluída devido à exigência da capacidade de força que se pretendia. Assim optou-se por realizar um dispositivo com um grau de liberdade linear.

Ao pretender realizar um dispositivo linear a primeira intenção foi usar um arranjo do tipo cilindro – êmbolo (Figura 3.1). Tal tornou-se inconveniente após as primeiras análises a dispositivos similares, nomeadamente amortecedores lineares, nos quais seria complicado controlar efetivamente as grandes diferenças de pressão criadas por uma baixa tensão de cedência do fluido entre as câmaras do atuador.

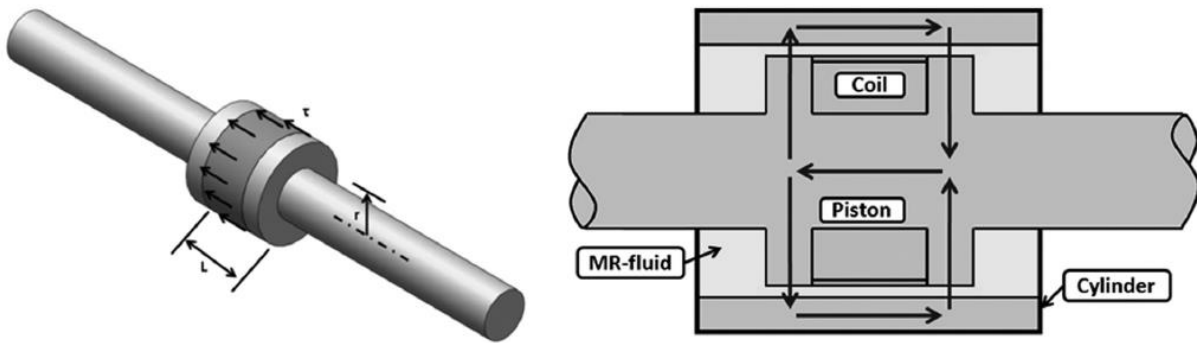


Figura 3.1 – Possível solução para um dispositivo háptico baseado num arranjo cilindro – êmbolo [39]

Esta pressão pode ser calculada através da expressão (3.1).

$$\Delta P_{tot} \approx 2,1 \frac{\tau_{yd}}{g} + \Delta P_{off} \quad (3.1)$$

Em que:

τ_{yd} – Tensão de cedência do fluido [Pa]

g – Espaço ocupado pelo FMR entre o êmbolo e a parede [m]

ΔP_{off} – Diferença de pressões ao longo do pistão devido ao atrito estático não controlado [Pa]

$$\Delta P_{off} = \frac{12Q\eta(2L_p)}{\pi(D_p + g)g^3} \quad (3.2)$$

Sendo:

Q – Fluxo de caudal volumétrico [m³/s]

η – Viscosidade do fluido à velocidade correspondente [Pa·s]

L_p – Comprimento do pistão em contacto com o fluido [m]

D_p – Diâmetro do pistão [m]

A força total é dada por:

$$F = \Delta P_{tot} \cdot \left(\pi \frac{D_p^2 - D_r^2}{4} \right) \quad (3.3)$$

Sendo D_r o diâmetro da haste.

Há ainda que ter em conta que a esta força se deverá somar a contribuição do atrito por parte do sistema de vedação. Para o teste feito por Alkan et al [39] a um dispositivo deste tipo, a força de ativação necessária seria de 71N para uma velocidade de 30 mm/s e não considerando o fluido ativo.

Desta forma, o fenómeno é altamente desejado nos amortecedores, mas para o caso de um dispositivo háptico apresentar uma força inicial de 71N, é algo que não é desejável.

Optou-se então por remover o êmbolo de forma a evitar o diferencial de pressões por ele causado e por utilizar o FMR em modo de corte puro, ou seja, apenas é aplicada uma tensão de corte ao fluído. Assim, o grau de complexidade do sistema diminui sendo mais fácil o controlo do fluído.

Um esquema inicial da arquitetura utilizando uma haste de secção constante e sem êmbolo encontra-se na Figura 3.2.

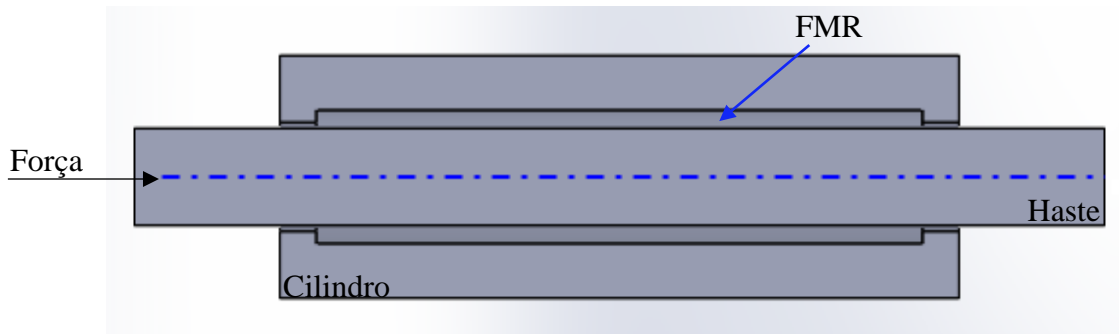


Figura 3.2 – Haste sem êmbolo e de seção constante

Considerando esta arquitetura a tensão total quando o dispositivo se encontrar em *on-state* é dada pela equação 2.1.

E a força total será calculada por:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau_{yd}(B) + F_{Coulomb} \quad (3.4)$$

Sendo:

r – Raio da haste [m]

L – Comprimento da haste em contacto com FMR [m]

$F_{Coulomb}$ – Todas as forças não controláveis presentes no dispositivo [N]

Finalmente pode-se evidenciar o modo de funcionamento do dispositivo, que é descrito pelo diagrama de blocos da Figura 3.3.



Figura 3.3 – Diagrama funcional do atuador

O sistema será controlado por uma corrente DC entre 0 e 1 A. Esta ao percorrer as bobinas induz um campo magnético (H) no núcleo do atuador, que por sua vez induz um campo magnético no FMR, que responde com uma alteração da sua tensão de corte (τ_{yd}); atuando o utilizador sobre a haste, o movimento só se inicia e mantém-se quando esta tensão de corte é ultrapassada, impondo uma força opostora ao utilizador. Sendo uma haste de seção constante é possível calcular a área de contacto do fluido e quantificar a força que o utilizador terá de usar para vencer τ_{yd} e iniciar ou manter o movimento.

3.3 Propriedades magnéticas dos materiais

Um campo magnético é produzido quando há uma carga elétrica em movimento ou na presença de íman permanente, sendo que neste último caso não existe uma corrente elétrica mas existe um movimento orbital e rotação dos eletrões no interior do material [43].

A Lei de Biot-Savart [44] permite o cálculo da intensidade do campo magnético, H , gerado por uma corrente elétrica e é uma das leis fundamentais do magnetismo (equação 3.6)

$$dH = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot I \cdot dl \times \hat{R} \quad (3.5)$$

Onde:

I – Corrente no condutor [A]

dl – Comprimento diferencial percorrido por I [m]

\hat{R} – Vetor distância entre dl e o ponto de observação [m]

A intensidade de campo magnético é dada em A/m tendo em conta a ligação entre o campo magnético e a corrente elétrica que o gerou.

De acordo com a lei de Ampère o campo magnético gerado por um circuito elétrico depende da forma do circuito e da corrente que o alimenta:

$$NI = \oint H \cdot dl \quad (3.6)$$

Onde:

N – Número de espiras

H – Intensidade de campo magnético [A/m]

Pode-se considerar a equivalência das leis de Biot-Savart e Ampère para correntes constantes a atravessar um condutor comprido.

Aquando da geração de um campo magnético, H , por uma corrente, de acordo com a lei de Ampère o meio responde com uma indução magnética, B , (ou densidade de fluxo magnético), toda a matéria responde com uma certa indução e a relação entre a densidade de fluxo e a intensidade é chamada de permeabilidade do meio (μ).

$$B = \mu \cdot H \quad (3.7)$$

Permeabilidade, é o grau de magnetização que responde linearmente a uma aplicação de um campo magnético externo.

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu H \quad (3.8)$$

Onde:

B – Densidade de fluxo magnético [T].

H – Intensidade de campo magnético [A/m].

M – Vetor de magnetização [A/m].

μ_0 – Permeabilidade do espaço vazio [H/m].

χ_m – Suscetibilidade magnética.

μ – Permeabilidade magnética do material [H/m].

Na maioria dos materiais, os domínios magnéticos geralmente cancelam-se, deixando assim o material desmagnetizado aquando da presença de um campo magnético externo. Estes domínios por natureza desorganizados alinham-se segundo as linhas do campo magnético externo (Figura 3.4). A magnetização produz um dipolo magnético na partícula, visto que no caso da magnetização não se observa o aparecimento de apenas um polo norte. Aquando da magnetização surge sempre um par de polos, norte e sul, estes são indissociáveis. Deste modo o polo oposto da partícula ao polo mais próximo desse íman é atraído para esse polo do íman.

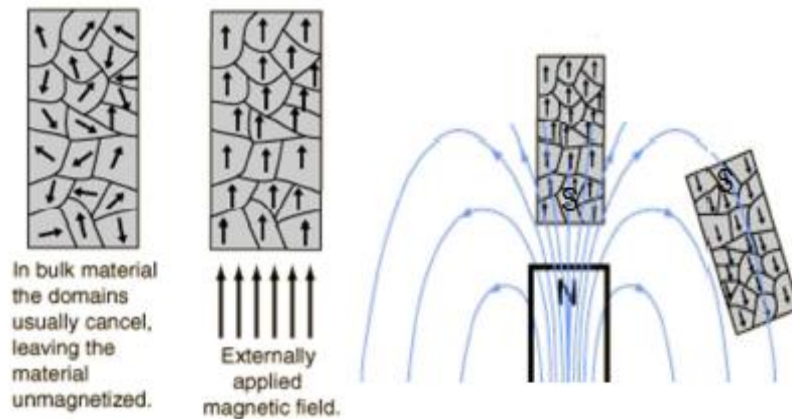


Figura 3.4 – Domínios magnéticos antes e depois da magnetização

Tal propriedade de permeabilidade relativa varia conforme os materiais (Tabela 3.1):

Tabela 3.1 – Permeabilidade relativa de alguns materiais

	Permeabilidade relativa	Saturação B (T)
Ferro	2000	2,15
Níquel	100	0,6
Permalloy (78,5% níquel, 21,5% ferro)	8000-25000	1,07
Mu metal (75% níquel, 18% ferro, 5% cobre, 2% crómio)	20000-100000	0,65

Como se pode observar, vários materiais respondem de diferentes maneiras à influência de um campo magnético. Desta forma é possível classificar os materiais quanto à sua suscetibilidade magnética:

- Diamagnéticos – a sua resposta é contrária ao campo magnético aplicado, apresentam uma suscetibilidade magnética menor ou igual a zero. O cobre, prata, ouro, berílio e bismuto são alguns materiais que fazem parte deste grupo. Também os supercondutores são um grupo especial de diamagnetos.
- Paramagnéticos – a sua magnetização é muito pequena e alinhada com o campo magnético externo, não retendo magnetização caso este seja retirado. A suscetibilidade é aproximadamente $0 (10^{-3})$. O alumínio, platina e manganês são exemplos de materiais paramagnéticos.
- Ferromagnéticos – Apresentam uma grande permeabilidade o que proporciona grandes indutâncias com uma intensidade de campo magnético moderado, e uma suscetibilidade maior que 1, que implica uma elevada magnetização. São também capazes de fornecer o seu próprio campo magnético. São exemplos destes materiais o ferro, cobalto, níquel.

Nos materiais ferromagnéticos B não é uma função linear de H , implicando que a permeabilidade varie rapidamente com a intensidade de campo magnético. Isto leva a outra propriedade importante das partículas ferromagnéticas e da sua magnetização que é a coercividade. Esta deve-se à curva de magnetização apresentar uma histerese: quanto maior a histerese maior a coercividade. Esta é obtida pela diferença entre os valores em que a curva de magnetização passa por zero. É possível observar uma típica curva de magnetização genérica e alguns valores de coercividade para diferentes materiais na Figura 3.5.

Coercivities of soft and hard magnets	
Material	Coercivity
Permalloy , $Ni_{81}Fe_{19}$	0.5-1
Co	20
Ni	150
Alnico , a common refrigerator magnet	1500-2000
NdFeB	10,000
$SmCo_5$	40,000

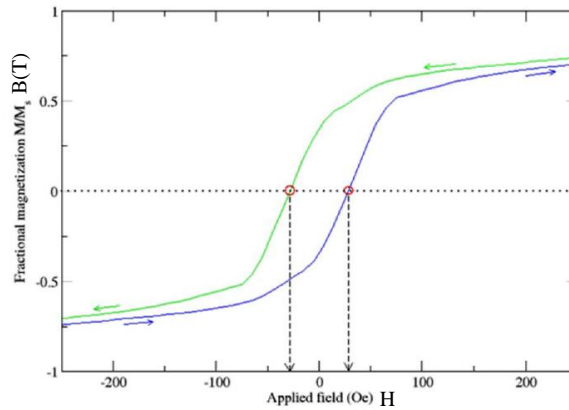


Figura 3.5 – Coercividade de alguns materiais magnéticos[17]

A curva de magnetização também revela os limites de saturação magnética do material, que é o limite máximo em que todos os domínios do material (ou partícula) estão alinhados com o campo exterior e a curva tende para um valor constante. Quando maior coercividade magnética, mais difícil será a desmagnetização do material. Isto leva à distinção entre materiais ferromagnéticos fortes, usados para fabricar ímanes permanentes, e materiais ferromagnéticos fracos, usados para fabricar eletroímãs.

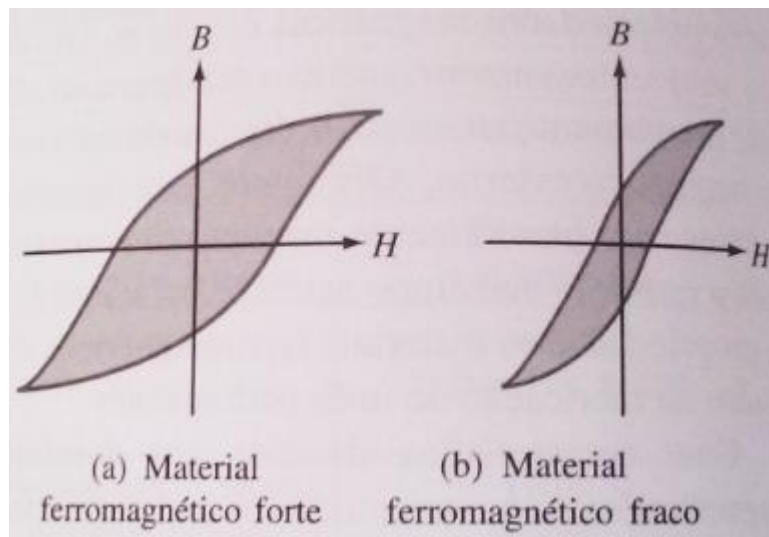


Figura 3.6 – Curvas B-H típicas para materiais ferromagnéticos [44]

3.4 FMR em detrimento de FER

Os FMR apresentam várias vantagens em relação aos FER, começando pela elevada variabilidade da sua propriedade reológica, podendo a tensão de cedência chegar a ser entre 20 a 50 vezes mais elevada. Os FMR são muito menos sensíveis a contaminantes e humidades, podendo ser usados em ambientes não controlados. Também não são afetados pelos elementos químicos das superfícies de contacto (ao contrário dos FER) e, finalmente, a potência (50 W) e

tensão requerida (12-24 V) para os ativar é bastante menor que a necessária para ativar os FER (450 V).

Apresenta-se, a seguir, a Tabela 3.2 com as diferenças substanciais entre FMR e FER:

Tabela 3.2 – FMR vs. FER

Propriedade	FMR	FER
Tensão de cedência máxima	50 – 100 kPa	2 – 5 kPa
Campo magnético máximo	≈ 250 kA/m	≈4 kV/mm
Viscosidade plástica aparente	0,1 – 10 Pa·s	0,1 – 10 Pa·s
Temperatura de funcionamento	-40 – 150 °C	+10 – 90 °C
Estabilidade	Raramente afetado	Intolerante a impurezas
Densidade	3 – 4 g/cm ³	1 – 2 g/cm ³
Fonte de alimentação típica	2 – 50 V; 1 – 2 A	400 5000 V; 1 – 10 mA

Os FMR diferem entre si devido à percentagem de diferentes materiais na sua composição. Deste modo, é possível obter diferentes fluídos que se adequam a diferentes condições de funcionamento. Na Tabela 3.3 é possível observar algumas diferenças entre a composição de 3 FMR:

Tabela 3.3 – Diferenças entre 3 FMR [17]

FMR	MRF – 132LD	MRF – 240BS	MRF – 336AG
Fluido transporte	Óleo sintético	Água	Óleo silicone
Temperatura de funcionamento (°C)	- 40 – 150	0 – 70	-40 – 150
Densidade (g/cm³)	3,055	3,818	3,446
% conteúdo sólido	80,74	83,54	82,02
Coefficiente de expansão	0,55 – 0,67*10 ⁻³	0,55 – 0,67*10 ⁻³	0,55 – 0,67*10 ⁻³
Condutividade térmica (w/w °C)	0,25 – 1,06	0,83 – 3.68	0,20 – 1,88
Viscosidade @ 10s⁻¹/50s⁻¹ (Pa·sec)	0,94/0,33	13,6/5,5	8,5
Ponto de ebulição	>150	>93	>200

Os FMR apresentam propriedades muito semelhantes nos casos em que o fluido de transporte é um óleo, sendo que a água como fluido de transporte se deve evitar devido à baixa temperatura de funcionamento e elevada viscosidade.

Estabelecida a arquitetura do dispositivo, realizou-se um estudo de mercado para a obtenção do FMR. Neste estudo e após contacto com várias empresas, apenas 3 responderam ao pedido de orçamento, sendo que a BASF® informou que tinha desativado a sua linha de produção de FMR devido a custos de produção e falta de procura.

Na Tabela 3.4 apresentam-se as propostas das empresas que responderam com um orçamento:

Tabela 3.4 – Orçamento recebidos para a compra do MRF

Empresa	Designação	Tensão De cedência Max	Quant (mL)	Viscosidade (Pa.s)	Densidade (g/cm ³)	% de conteúdo sólido por peso	Temperatura de Operação (°C)	Preço
LORD (MR) [28]	MR Demonstration Device							40 \$
	MRF-122EG	35 kPa	250	0,042 ± 0,020	2,28	72	-40 a +130	275\$
	MRF-132DG	49 kPa	250	0,112 ± 0,02	2,95-3.15	80,98	-40 a +130	275\$
	MRF-140CG	59 kPa	250	0,280 ± 0,070	3,54-3,74	85,44	-40 a +130	275\$
Metal – Dust [45]	MRF with carbonyl iron powder	n.d.	500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	\$518 já com portes
Fraunhofer ISC Cesma	MRF ISSB 101	78 kPa	1000	n.d.	n.d.	50	n.d.	500€ sem portes

A decisão quanto à aquisição final não se ficou apenas pela apreciação da quantidade/preço, assim teve-se em consideração:

- A experiência no fabrico, em que a LORD® é líder de mercado, a informação disponível sobre as propriedades do fluído
- Aditivos opcionais que aumentam a vida do fluído
- Informação técnica: muito fácil de obter no site da LORD®; não sendo apresentada pela Metal-Dust e a apresentada pela Fraunhofer ISC não era tão completa

A escolha final recaiu sobre a LORD® visto que cumpria da melhor forma os requisitos impostos. Outro fator que além dos anteriores pesou na decisão, foi a aquisição de uma fonte de corrente DC controlável que também é fornecida pela LORD®. Aproveitando-se assim para realizar a encomenda conjunta.

A empresa disponibiliza 3 FMR com propriedades distintas (Tabela 3.5):

Tabela 3.5 – Propriedades dos FMR da LORD®

FMR	MRF-122EG	MRF-132DG	MRF-140CG
Tensão cedência máxima	34 kPa a 300 kA/m	49 kPa a 300 kA/m	59 kPa a 200 kA/m
Densidade (g/cm³)	2,28-2,48	2,95 – 3,15	3,54-3.74
% conteúdo sólido	72	80,98	85,44
Viscosidade @ 40 °C, 500-800s⁻¹ (Pa-sec)	0,042 ± 0,020	0,112 ± 0,02	0,280 ± 0,070
Temperatura de funcionamento (°C)	- 40 – +130	- 40 – +130	- 40 – +130
Ponto de ebulição	>150	>150	>150

Optou-se pelo MRF-132DG devido aos primeiros cálculos sobre o atuador terem indicado uma força máxima por volta dos 80N, uma viscosidade favorável a terem pouco atrito de Coulomb na ausência de com um campo magnético a atuar no fluido e uma maior gama de controlo do fluido com o campo magnético, apresentando uma tensão máxima de 49 kPa para

um campo magnético de 300 kA/m. Em contrapartida o MRF-140CG apresenta uma tensão de 59 kPa para um campo magnético de 200 kA/m.

As propriedades magnéticas do FMR são apresentadas na Figura 3.7:

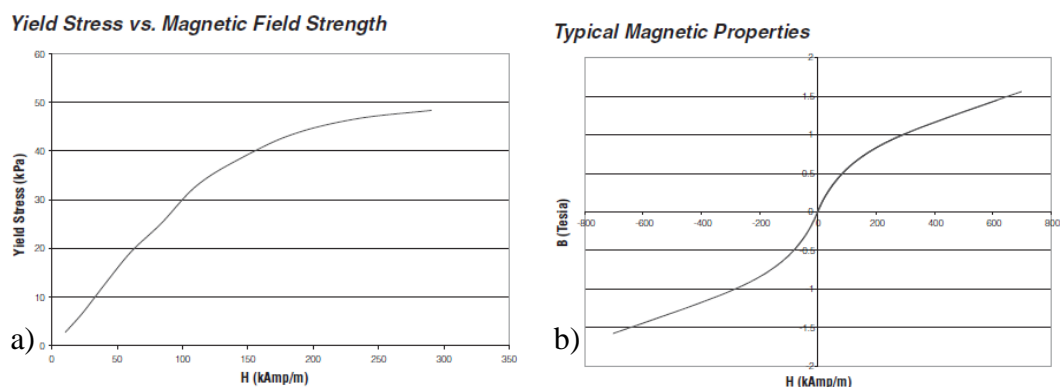


Figura 3.7 – Propriedades magnéticas do MRF-132DG; a) tensão de cedência vs intensidade de campo magnético; b) Fluxo magnético vs intensidade de campo

Como se pode observar do gráfico “b)” da Figura 3.7 o FMR não apresenta qualquer tipo de coercividade o que é ideal para a controlabilidade do fluído.

Através de uma regressão linear obtiveram-se as equações das propriedades típicas do fluido apresentadas na Figura 3.7, resultando:

$$\tau_{yd} = -0,0008 \cdot H^2 + 0,393 \cdot H - 1,8915 \tag{3.9}$$

$$H = 119,77 \cdot B^3 + 166,68 \cdot B \tag{3.10}$$

Estas equações serão usadas para estimar os parâmetros do fluido aquando da implementação do protótipo.

Na Figura 3.8 pode observar-se o FMR adquirido à LORD®.



Figura 3.8 – a) Recipiente FMR; b) FMR no estado não ativo; c) FMR sob um campo magnético de íman de neodímio (NdFeB)

Como já referido anteriormente o modelo plástico de Bingham será usado para descrever o comportamento do fluido quando este se encontra sob um campo magnético externo.

3.5 Modelação mecânica e eletromagnética

Definida a arquitetura do sistema e o fluído, foi necessário modelar os componentes do dispositivo, dando os primeiros passos para realização da solução final.

Uma das razões desta modelação prende-se com um processo iterativo, no qual alguns parâmetros são alterados e testados virtualmente. Posteriormente este modelo servirá de base a desenhos de definição para a execução final das peças. Outra vertente importante destas modelações é a visualização de uma possível solução final num ambiente virtual 3D, permitindo demonstrar facilmente a mecânica do sistema e seus constituintes, enquanto não existe um protótipo.

Para a modelação mecânica do dispositivo foi utilizado o *software CAD SolidWorks* nas suas versões 2D e 3D. O processo de modelação inicia-se com o núcleo, pois este é uma peça fundamental para o sistema mecânico e eletromagnético.

Como se está perante um dispositivo em que o seu modo de funcionamento depende diretamente da sua capacidade de criação de um campo magnético, foi necessário estudar os fenómenos magnéticos presentes. Para essa finalidade foi usado o pacote de *software ANSYS Maxwell*, que é um poderoso programa de simulação de elementos finitos para circuitos eletromagnéticos. A análise focou-se principalmente na densidade de fluxo magnético, B , gerada pelas bobinas instaladas no dispositivo.

3.5.1 Modelos CAD 3D

A importância do núcleo deve-se ao facto de:

- Acoplar a parte magnética do dispositivo, nomeadamente as bobinas;
- Acoplar as tampas do dispositivo;
- Ser a superfície estática de contacto com o FMR;

Na Figura 3.9 mostra-se a evolução do *design* do núcleo.

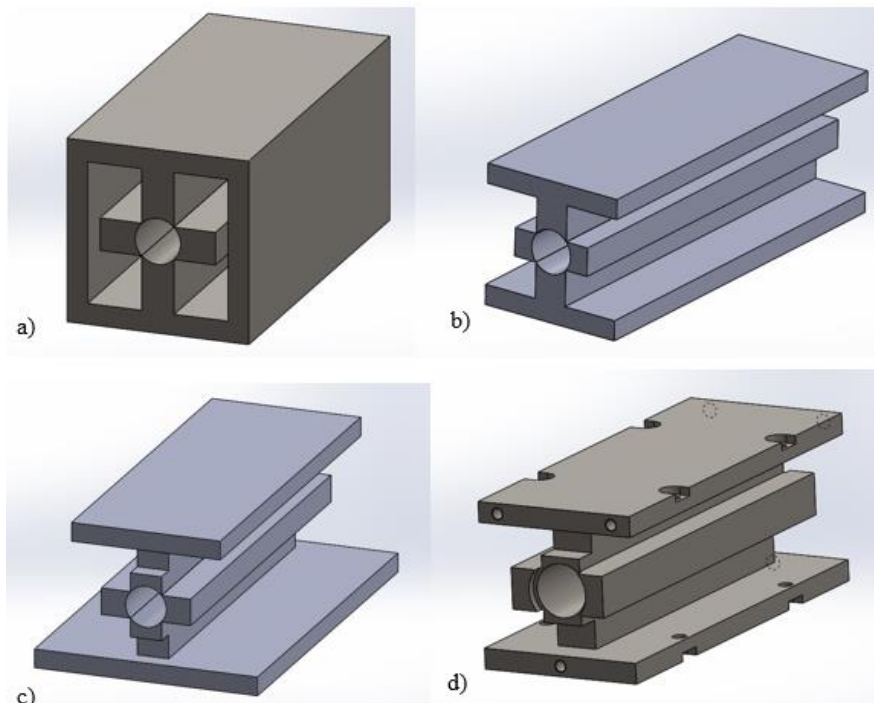


Figura 3.9 – Modelos *Solidworks* do núcleo do dispositivo

A versão a) da Figura 3.9 seria uma boa alternativa, caso fosse possível bobinar o núcleo, por não existirem interrupções na peça, o que permitiria um fluxo de campo magnético contínuo sem a existência de interfaces. Contudo do ponto de vista construtivo não seria uma boa opção para maquinagem, devido à existência de espaços confinados que não permitiriam a operação das ferramentas.

Em b) retirou -se o material lateral para permitir a bobinagem, mas notou-se outro problema: o acoplamento das tampas sobrepunha-se às bobinas, dando assim origem à abertura de rasgos para a sua colocação. Outra alteração feita, c), foi o alargamento da aba inferior para efeitos de fixação, o que acabou por desaparecer na solução final.

Na imagem d) mostra-se o modelo final que foi aceite para execução. Além de ter desaparecido a aba, introduziu-se um rebaixo à entrada da câmara da haste para centragem e vedação das tampas, que se pode ver na Figura 3.10.

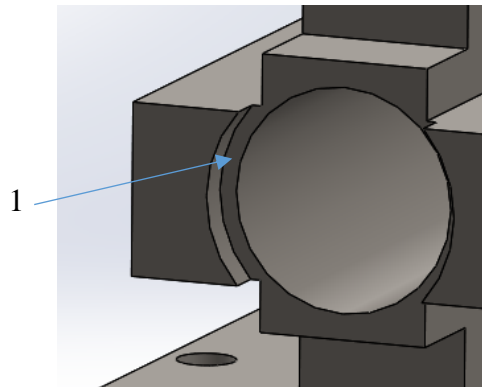


Figura 3.10 – Pormenor do núcleo final; 1) rebaixo

O desenho de definição do núcleo que foi enviado para execução e pode ser consultado no anexo A.3. Serão descritas algumas das suas particularidades nas simulações eletromagnéticas e no desenvolvimento do protótipo.

Seguidamente dimensionaram-se as tampas, que também vão desempenhar várias funções:

- Retentoras do fluido (serão portadoras dos vedantes);
- Sistema de guiamento, cintas de guiamento serão aplicadas;
- Orifícios de enchimento e drenagem do FMR do sistema;
- Sistema de fixação do dispositivo ao exterior;
- Sistema de fixação do transdutor ao dispositivo;
- Saída de cabos de alimentação das bobinas;

A primeira abordagem à estrutura da tampa pode observar-se na Figura 3.11.

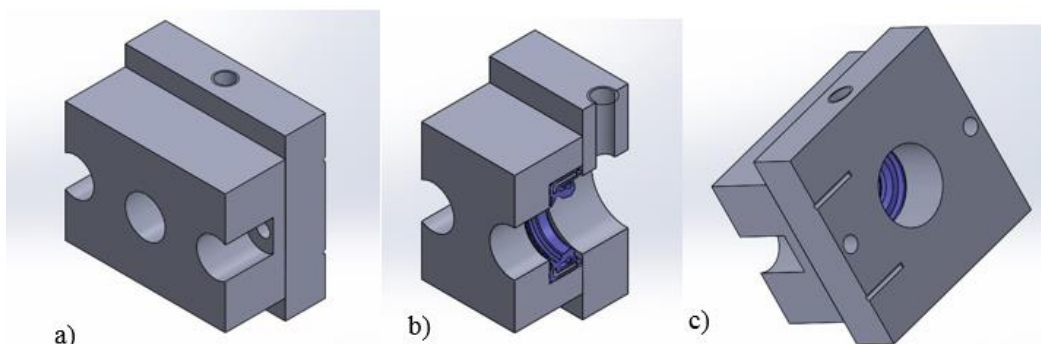


Figura 3.11 – Modelo da primeira iteração da tampa, modelo *SolidWorks*
a) tampa modular; b) tampa em corte; c) pormenor dos rasgos para saída de fios

Esta solução seria a ideal, mas apresenta problemas de vedação e guiamento, não contemplando as fixações ao exterior, nem a ligação para o transdutor. Deste modo, deu origem à peça final que se pode observar a seguir:

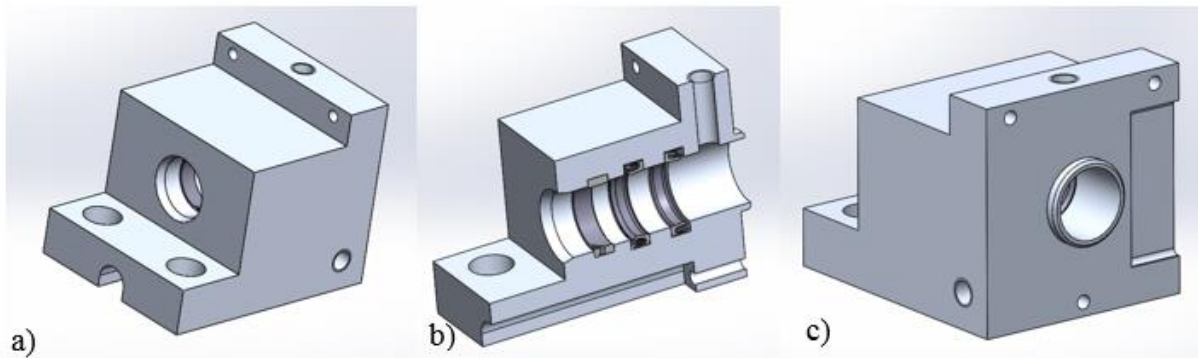


Figura 3.12 – Tampa final, modelo SolidWorks

Este *design* de peça única permite evitar problemas de vedação, só requerendo vedação na interface com o núcleo por um simples *o-ring*. A ligação ao núcleo é feita por 3 parafusos M3 e a ligação ao exterior é feita por 2 M4 (Figura 3.12 - a).

Os vedantes e guiamento, em detalhe na Figura 3.12 - b), ficam alocados no interior da peça. Como a peça é única, deixam de existir problemas de alinhamento ao longo da mesma. A colocação de 2 vedantes é possível e pode ser feita de forma à vedação destes ser no mesmo sentido. Assim sendo, o vedante exterior atua como uma possível segurança à existência de fugas ou, em sentido contrário, atua como um raspador para evitar a entrada de contaminantes.

A flange, apresentada na Figura 3.12 - c), serve como elemento de guiamento com o núcleo e ponto de vedação. Nesta figura também se pode observar o rasgo para alimentação das bobinas e o furo M5 para fixação do transdutor.

Os componentes seguintes foram as placas de isolamento de campo magnético em alumínio (Figura 3.13 a) e as tampas laterais do núcleo (Figura 3.13 b). As placas de isolamento são um componente muito simples que se acopla ao núcleo e não permite a passagem de fluxo magnético. A função da tampa lateral será fechar o circuito magnético. Estas funções serão discutidas em pormenor na secção de simulações eletromagnéticas.

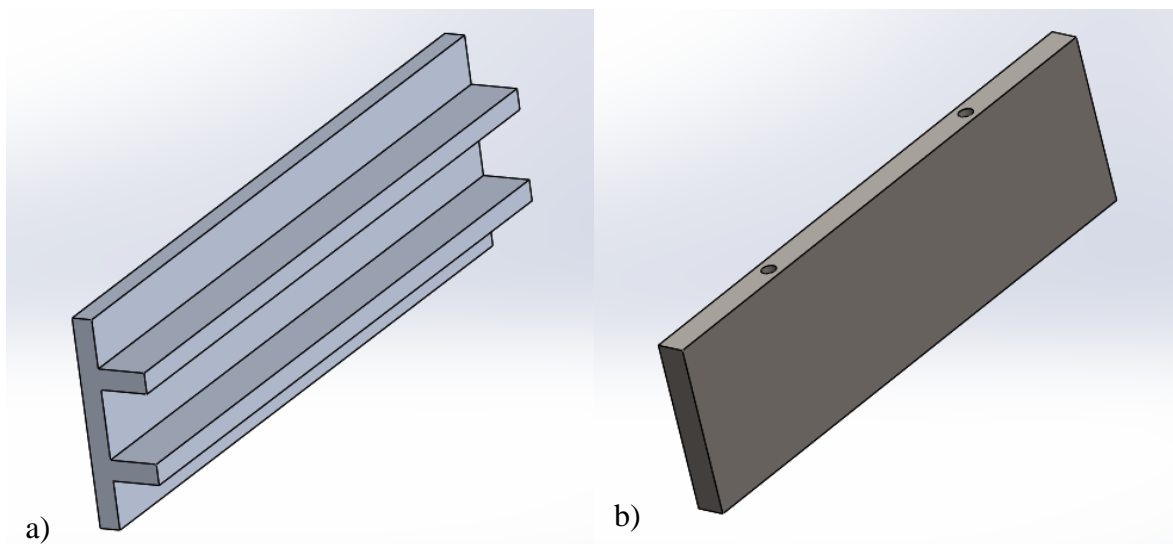


Figura 3.13 – a) Placa de isolamento em alumínio; b) tampa lateral

Seguidamente foi modelada a haste (Figura 3.14). Esta tem um formato em *sandwich* e é constituída por um corpo em aço e, no centro, tem uma pequena folha de alumínio. Em conjunto com as placas de isolamento é possível criar um campo magnético serpenteante. Os topos da haste foram furados para permitir uma ligação com uma célula de carga e foram feitas ranhuras para a introdução de um freio mecânico.

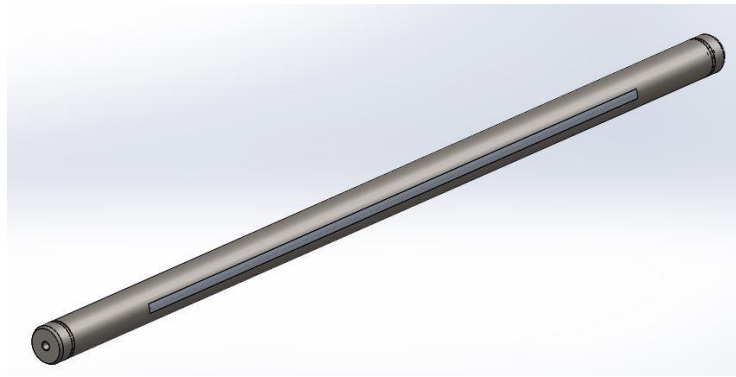


Figura 3.14 – Haste

Para finalizar, foi feita uma modelação esquemática das bobinas (Figura 3.15), que será necessária para as simulações eletromagnéticas

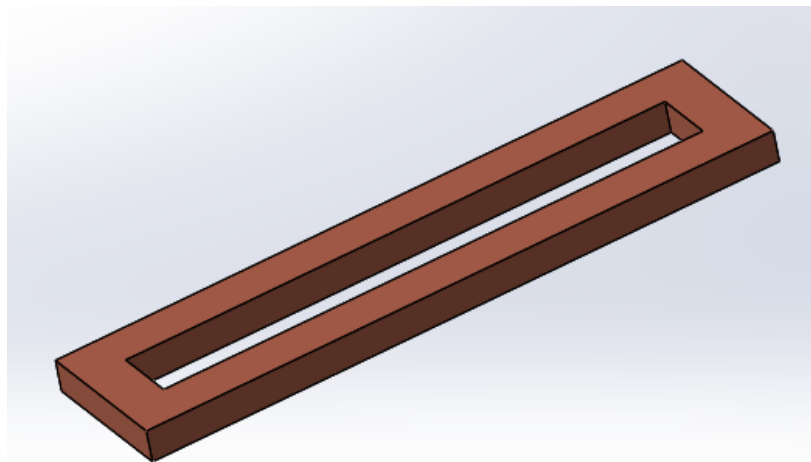


Figura 3.15 – Modelo de uma bobina

Na Figura 3.16 apresenta-se o modelo do dispositivo final montado.

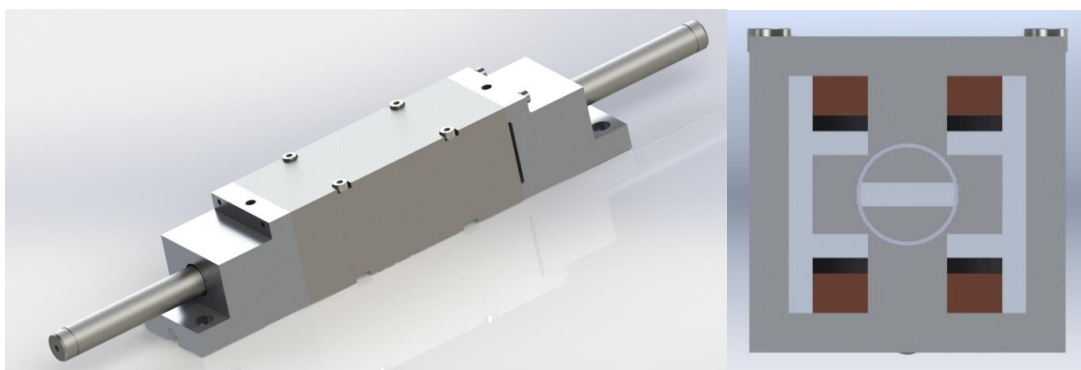


Figura 3.16 – *Render* do dispositivo final; vista em corte do dispositivo

3.5.2 Simulações eletromagnéticas

Até ao momento descreveu-se apenas a modelação mecânica, deixando-se a modelação eletromagnética um pouco de parte. Esta escolha deveu-se à necessidade de se ter uma arquitetura e modelo funcional definidos. A abordagem inicial ao problema do dimensionamento magnético realizou-se pelo meio analítico. Como já foi mencionado, a

escolha do aço é fundamental devido a ser este que vai conduzir o fluxo magnético até ao FMR. Desta forma é necessário ter em atenção a relutância magnética do material. Esta propriedade é análoga à resistência nos circuitos elétricos. Esta analogia entre os dois circuitos pode ser estendida à forma como o campo magnético segue o caminho de menor relutância magnética à semelhança de uma corrente elétrica, que segue o caminho de menor resistência.

A relutância magnética (\mathcal{R}) em magnetostática é expressa pelo quociente entre a força magneto motriz (FMM) em Ampère-volta (A·t) (referente ao número de espiras do enrolamento) e o fluxo magnético (Φ_B) em Webber.

$$R = \frac{F}{\Phi_B} \quad (3.11)$$

Tendo em conta que um fluxo magnético forma sempre um percurso fechado e que este segue o caminho de menor relutância, pode obter-se o perímetro desse circuito conhecendo quais os materiais que apresentam uma relutância menor. A relutância de um circuito magnético uniforme é dada pela equação 3.13:

$$R = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (3.12)$$

Onde:

l – Comprimento do circuito magnético [m]

μ_0 – Permeabilidade do vácuo [H/m]

μ_r – Permeabilidade magnética relativa do material

A – Área da secção reta do circuito magnético [m²]

Assim, é necessário a escolha de um aço com uma elevada saturação e permeabilidade magnética, para a obtenção destas propriedades em aços é desejado que a percentagem de carbono presente nestes não ultrapasse os 0,15%.

Escolheu-se assim o aço de norma AISI 1010 [46] que não contém mais de 0,13% de carbono.

Considerando que o fluxo do campo magnético é encaminhado de modo a passar uma vez pelo fluido e que o circuito tem uma secção constante, pode calcular-se o fluxo magnético total que é necessário, para se obter a tensão de corte desejada.

Tendo em consideração a lei de Gauss para o magnetismo $\oint_S B \cdot ds = 0$ [44] e sendo o fluxo magnético (Φ_B) definido pela densidade de fluxo magnético B que passa através da superfície S , obtém-se a equação para o fluxo que atravessa o fluído:

$$\Phi_B = \int_S B \cdot ds \quad (Wb) \quad (3.13)$$

$$\Phi_B = B_f \cdot A_{secção} = B_f \cdot \theta_{contacto} \cdot r \cdot h \quad (3.14)$$

Como a haste tem de raio= 6 mm, profundidade $h= 84$ mm e uma largura de influência de 10 mm o $\theta_{contacto}$ será de 112,89° (0,62 π rad) (Figura 3.17).

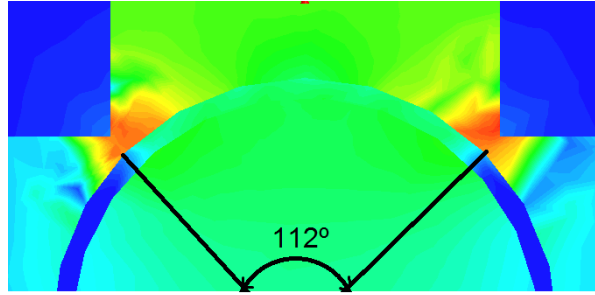


Figura 3.17 – Área de influência do campo magnético sobre a haste

Tendo em consideração que para saturar o fluido e obter uma tensão de corte máxima é necessário obter uma densidade de fluxo magnético de 1 T no fluido, logo o fluxo magnético total no fluido será:

$$\Phi_{B_{FMR}} = 1 \cdot 0,62 \cdot \pi \cdot 0,006 \cdot 0,084 = 9,82 \times 10^{-4} \text{ Wb} \quad (3.15)$$

$$\Phi_{B_{aço}} = 1 * 0,084 * 0,010 = 8,4 \times 10^{-4} \text{ Wb} \quad (3.16)$$

Considerando a continuidade do fluxo magnético dada pela lei de Gauss, tem-se que $\Phi_{B_{FMR}} = \Phi_{B_{aço}}$. Então:

$$B_{aço} = \frac{\Phi_{B_{FMR}}}{A_{aço}} = \frac{9,82}{8,4} = 1,16 \text{ T}$$

Tomando a lei de Ampère $\oint_c H \cdot dl = I$ e aplicando a lei de Kirchoff ao circuito magnético resulta:

$$N \cdot I = \sum H_i \cdot l_i = H_{FMR} \cdot e + H_{aço} \cdot l \quad (3.17)$$

Sendo:

N – Número de espiras da bobina

I – Corrente que percorre a bobina [A]

H – Campo magnético [H/m]

e – Espessura do fluido [m]

l – Perímetro do campo magnético [m]

Considerado que se tem disponível uma corrente na bobina de 1 A, um campo magnético (H) de 1114 A/m (valor retirado da simulação com o *ANSYS Maxwell*) devido à densidade de fluxo, B , uma espessura de fluido de 0,5 mm e um perímetro médio do contorno magnético de 120 mm obtém-se:

$$N \cdot 1 = 280 \times 10^3 \cdot 0,0005 + 1114 \cdot 0,120 \quad (3.18)$$

$$N = 273$$

Este resultado é considerando o circuito magnético apenas com uma bobina e uma espessura de fluido de 0,5 mm. Como apresentado no esquema da Figura 3.18.

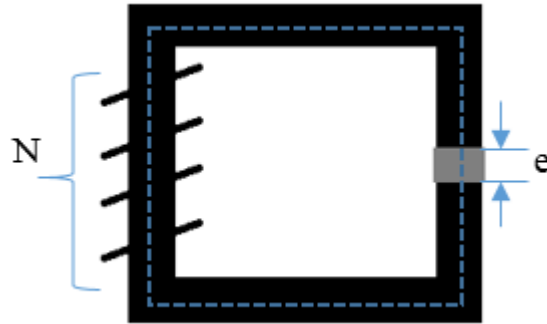


Figura 3.18 - Esquema da simplificação do circuito magnético.

Com o intuito de obter confirmação do resultado obtido e um melhor estudo dos fenômenos magnéticos a que o sistema estava sujeito devido ao aumento de complexidade em relação ao modelo analítico, recorreu-se ao *software ANSYS Maxwell*, possibilitando simular várias configurações do dispositivo e observar os efeitos destas em termos de campo magnético H e a densidade B , gerados para uma corrente de alimentação DC nas bobinas.

Para este efeito, o modelo realizado em *Solidworks* foi importado para o *software de simulação* Figura 3.19. De notar que este modelo importado não é o modelo 3D final devido ao facto destas simulações acompanharam o desenvolvimento do próprio modelo.

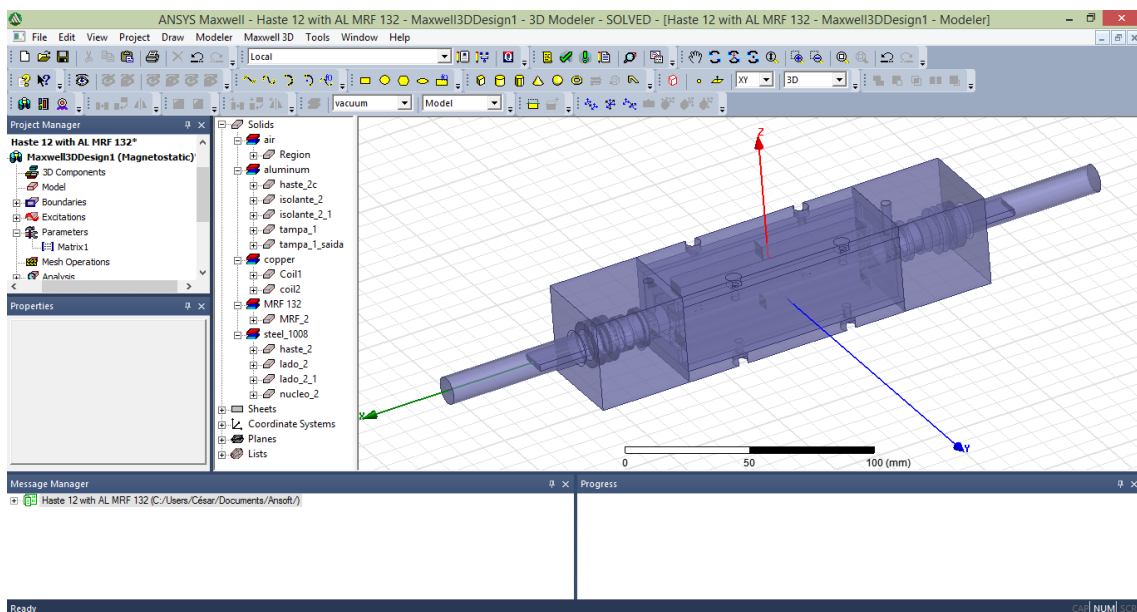


Figura 3.19 – Interface do *software Ansys Maxwell*

O *software* incorpora uma biblioteca com vários tipos de materiais e respetivas propriedades magnéticas. No entanto os FMR não fazem parte desta, tendo-se adicionado manualmente, Figura 3.20 com os valores da *datasheet* do material (Figura 3.7 b).

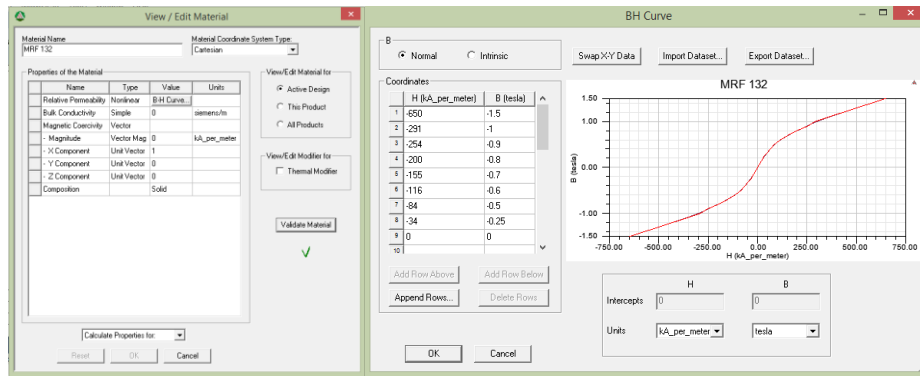


Figura 3.20 – Interface de edição de materiais

Tendo em consideração as propriedades magnéticas dos materiais descritas anteriormente, seguiu-se a aplicação de materiais ao modelo (Tabela 3.6):

Tabela 3.6 – Materiais aplicados ao modelo

Tipo de material	Aplicado a:
Aço AISI 1010	Haste, núcleo e tampas laterais
Alumínio	Isolante direito e esquerdo, tampas e núcleo da haste
Cobre	Bobinas
MRF 132	FMR

Como se pretende simular a presença de corrente no sistema, é necessária a sua definição. O *software* permite definir planos nos quais essa corrente é introduzida e a sua direção, que irá influenciar o sentido do campo magnético e a sua magnitude, Figura 3.21.

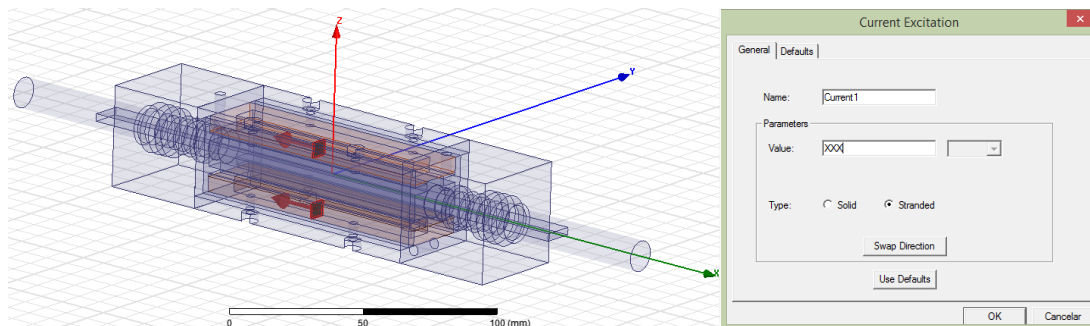


Figura 3.21 – Definição da corrente no modelo

Uma propriedade importante a definir no modelo é se a superfície onde se aplica a corrente é um só condutor (*Solid*) ou vários (*Stranded*). Esta opção terá influência num pós-processamento por parte do programa em que é possível definir o número de condutores (espiras) da bobina.

Quando se utiliza alimentação elétrica e esta pode entrar em contacto com materiais condutores é necessário ter o cuidado de isolar os condutores para não existirem fugas de corrente ou tensão para o dispositivo, que podem ser prejudiciais a quem o utiliza, Figura 3.22.

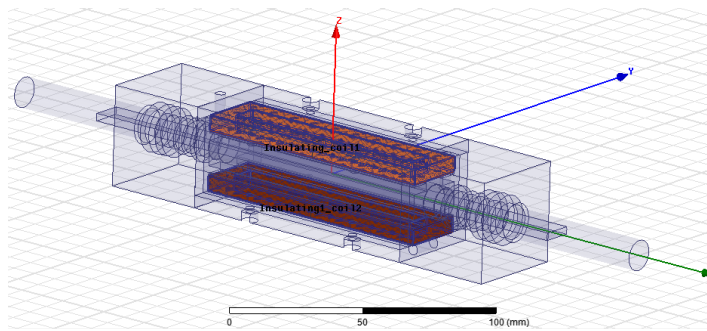


Figura 3.22 – Condições fronteira das bobinas

Definiu-se o número de espiras no pós-processador para 250. Em cada uma das bobinas, a corrente de alimentação definida anteriormente (0 a 1A) foi aplicada ao modelo, multiplicada pelo número de espiras de cada bobina como se apresenta na Tabela 3.7. A introdução da corrente neste formato permite ao *software* realizar todas as simulações automaticamente sem qualquer *input* do utilizador.

Tabela 3.7 – Corrente alimentação real e em simulação

Corrente real (A)	Corrente simulação (A·t)
0	0
0,2	50
0,4	100
0,6	150
0,8	200
1	250

Após a definição automática da malha por parte do programa são feitas as simulações. Além da variação de corrente, foram testadas variações do diâmetro da haste e espessura do FMR, que permitissem gerar um campo magnético de maior intensidade e fluxo no FMR, até se definir a solução final.

Todos resultados são acompanhados por uma escala colorida, compreendida entre 0 e 2,4 (Tesla) para o caso do fluxo magnético B .

As simulações iniciais foram realizadas para um diâmetro de haste de 10 mm e uma espessura de fluido de 1 mm. A densidade de fluxo na área transversal pode ser observada na Figura 3.23 e Figura 3.24.

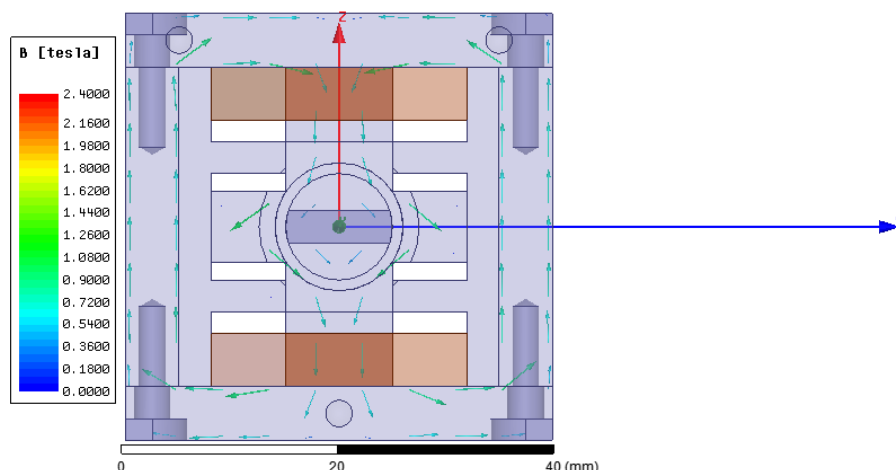


Figura 3.23 – Vetor densidade de fluxo magnético para uma excitação nas bobinas de 250 A·t

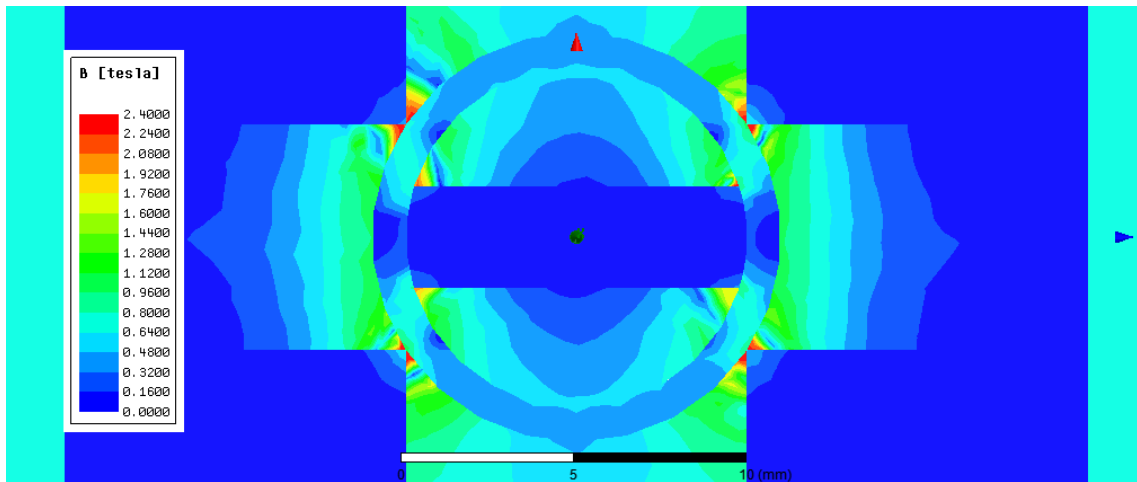


Figura 3.24 – Pormenor no FMR da magnitude de B

Como se pode observar a densidade de fluxo magnético não chega a saturar o FMR. Este fenómeno acontece devido à elevada espessura do fluido que aumenta a sua relutância (\mathcal{R}). Desta forma foi necessário diminuir esta espessura do fluido.

Considerando desde já uma possível construção de um atuador, decidiu-se que a haste deveria apresentar um diâmetro normalizado, por forma a minimizar gastos com vedação especialmente feita para a aplicação. Considerou-se então uma haste com um diâmetro de 12 mm e uma espessura de fluido de 0,5 mm, para a qual se apresentam de seguida os resultados obtidos nas simulações.

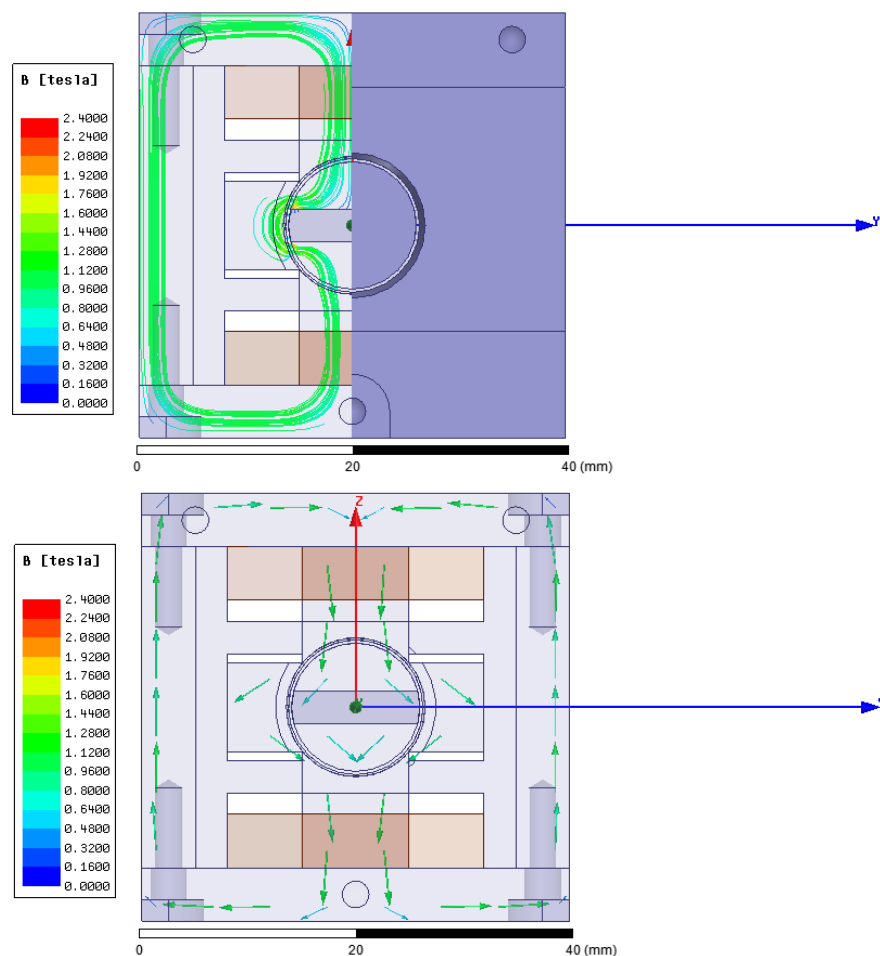


Figura 3.25 – Linhas de densidade e vetor de fluxo magnético (B) para 250 A·t

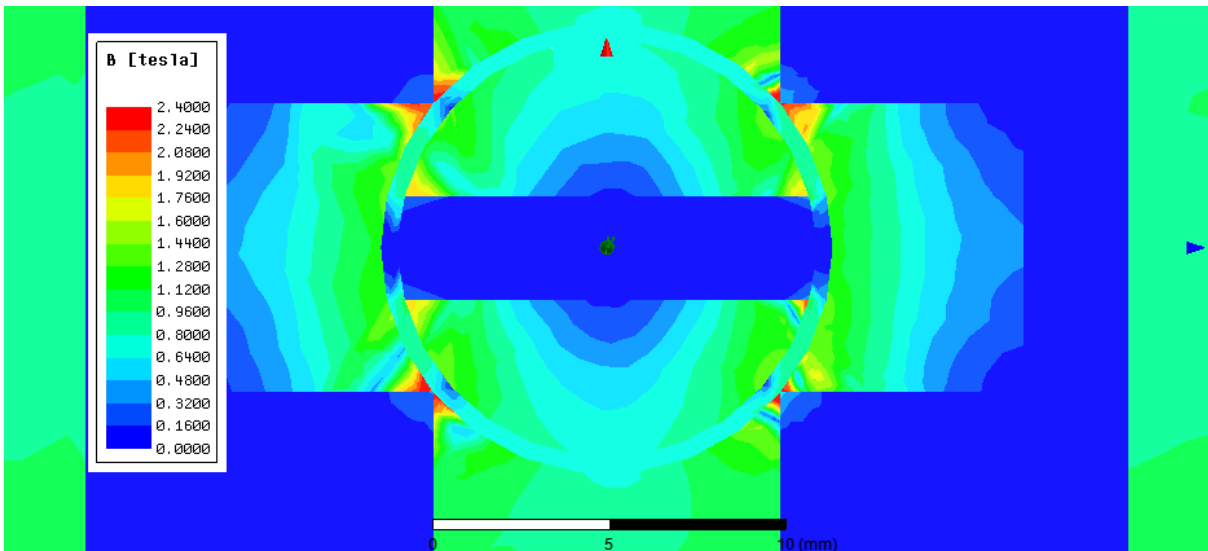


Figura 3.26 – Magnitude de B para a secção transversal para 250 A-t

Na Figura 3.25 foi apenas simulada metade da peça visto que esta é simétrica ao longo do eixo vertical, sendo a outra metade o sistema mecânico desenhado.

Como se pode observar na Figura 3.26 e na Figura 3.27 a maior parte do fluido encontra-se ativo, excluindo as partes em contacto com o alumínio e com uma densidade de fluxo entre 0,8 e 1 T.

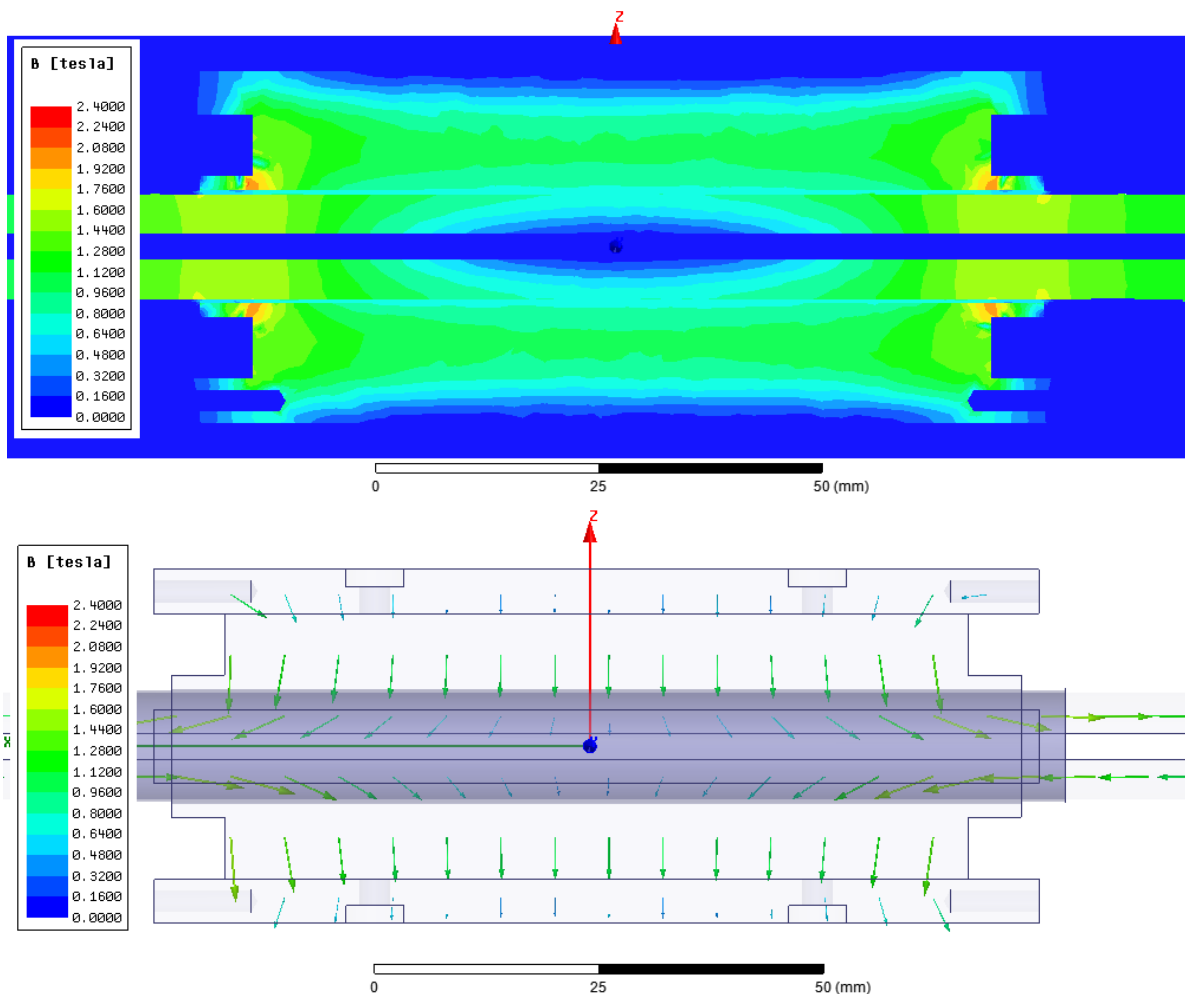


Figura 3.27 – Magnitude e vetor de B para a secção longitudinal e 250 A-t

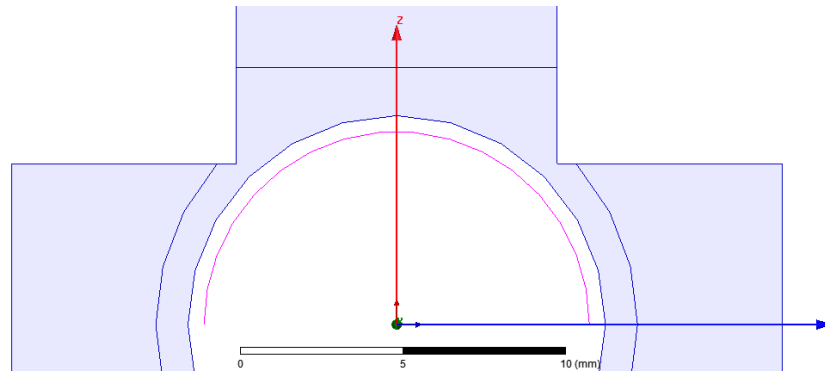


Figura 3.28 – Polyline de contorno da haste

É possível obter a área de fluido ativa através do *software*. Para esta finalidade traçou-se uma *polyline* (Figura 3.28) sobre metade do contorno externo da haste e pediu-se ao *software* para reportar o valor de B sobre essa *polyline*, obtendo-se o gráfico da Figura 3.29.

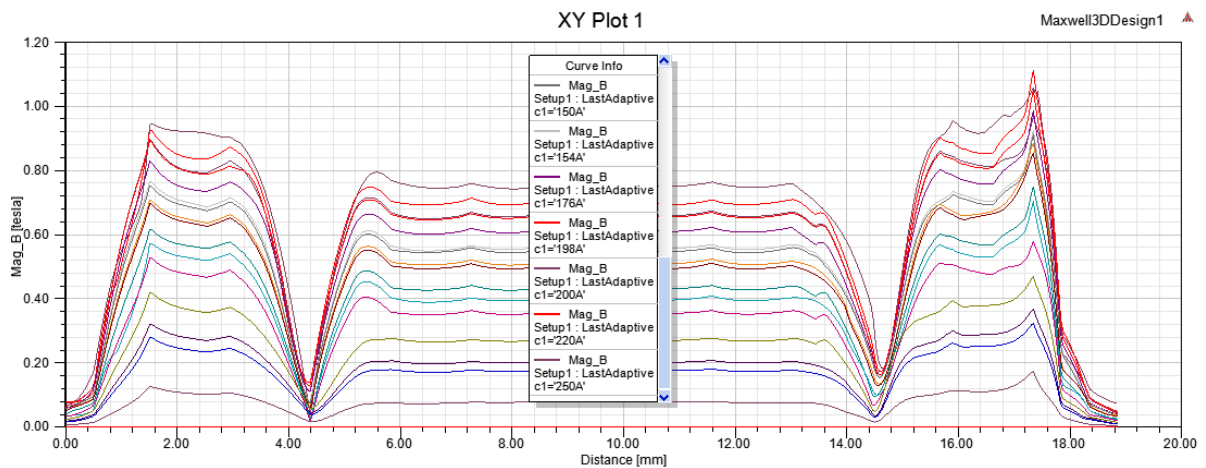


Figura 3.29 – Valores de B ao longo do comprimento da *polyline*, para as várias correntes de alimentação

Transformou-se o comprimento da *polyline* em radianos, obtendo-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 3.30.

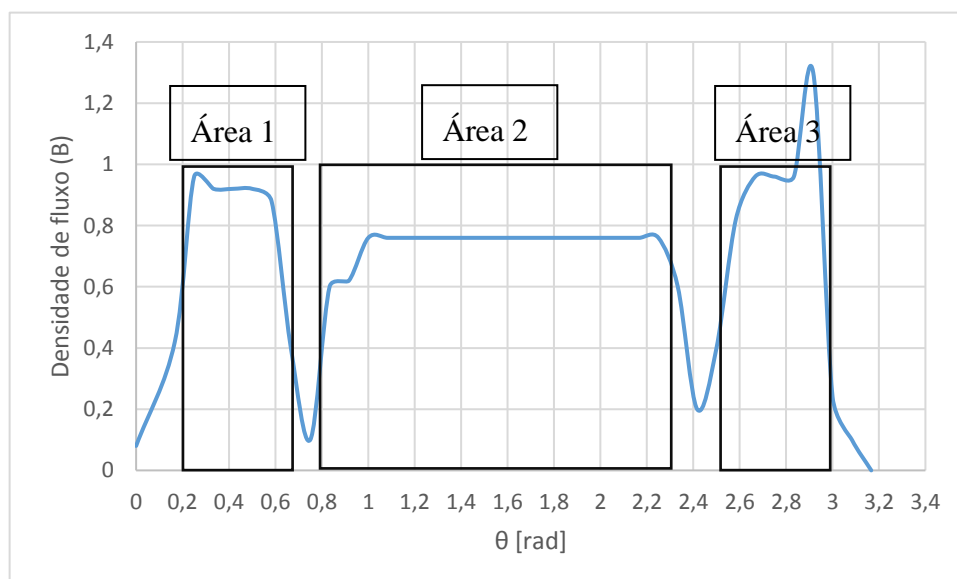


Figura 3.30 – Distribuição do fluxo magnético em meia haste

Obtida a área transversal de fluido é necessário obter a área de fluido ativo longitudinalmente, através de um processo idêntico ao realizado anteriormente (Figura 3.31). Apresenta-se na Figura 3.32 o fluxo de campo magnético ao longo da *polyline* longitudinal.

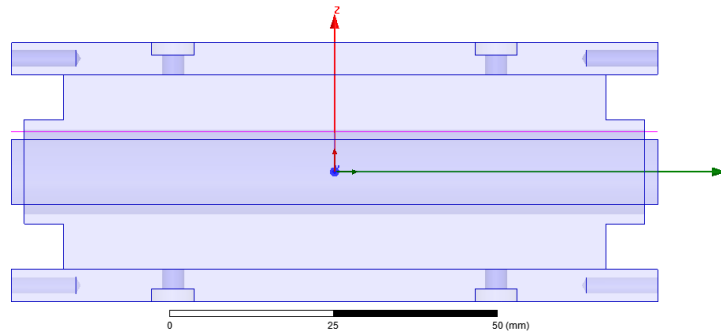


Figura 3.31 – Polyline longitudinal

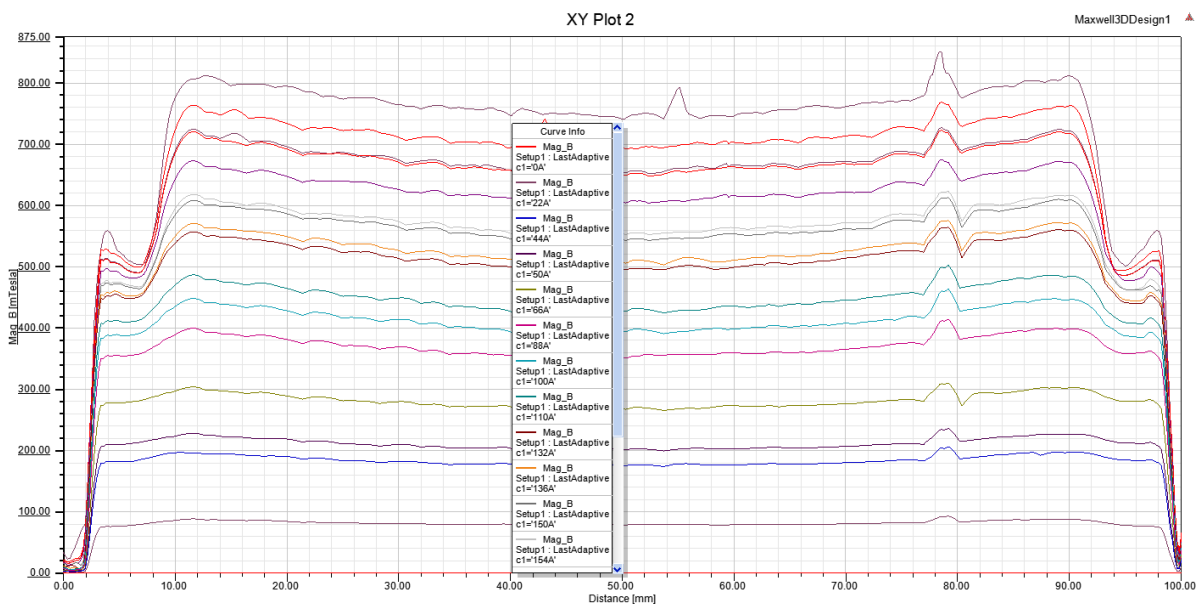


Figura 3.32 – Valores de B ao longo do comprimento da *polyline* longitudinal em mT

Utilizando as equações das propriedades do fluido obtêm-se as seguintes tensões de corte para os diferentes valores de B:

- B = 0,92 apresenta uma tensão de corte de 46,37 kPa
- B = 0,76 apresenta uma tensão de corte de 42,85 kPa
- B = 0,5 apresenta uma tensão de corte de 29 kPa

Tendo em atenção a representação gráfica da Figura 3.30, obteve-se um ângulo de fluido ativo de aproximadamente:

$$\theta = 2 \cdot (0,5 + 1,5 + 0,5) = 5 \text{ rad} \quad (3.19)$$

Considerando a área 1 e 3 equivalentes estas apresentam um $\Theta = 2 \text{ rad}$, visto ser 1 rad de cada meia haste e a área 3 apresenta um $\Theta = 3 \text{ rad}$. A força total será dada pela influência destas zonas com as duas zonas da secção longitudinal:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau_{yd}(B) \quad (3.20)$$

$$F = 2 \times 0,006 \times (0,020 \times 29000 + 0,080 \times 49,37) + 3 \times 0,006 (0,020 \times 29000 + 0,080 \times 42,85) = 126,5 \text{ N}$$

A espessura de parede do núcleo foi alterada (Figura 3.33) de forma a conter o FMR no seu interior sem a existência de fugas, tendo-se simulado o modelo para perceber os efeitos desta mudança. Os resultados são apresentados de seguida.

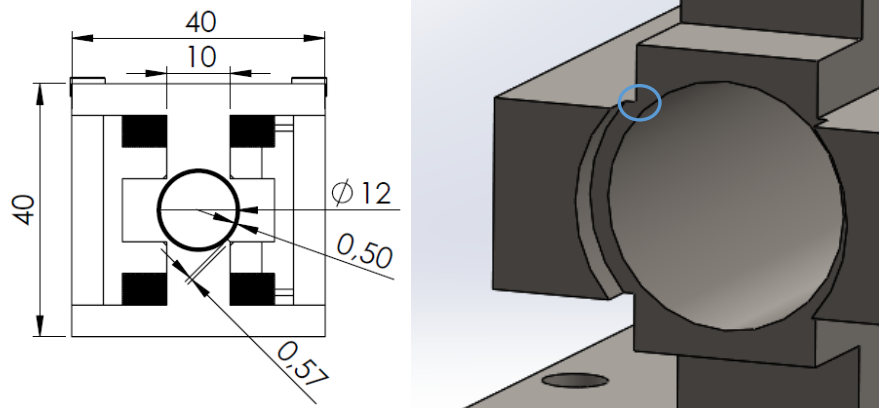


Figura 3.33 – Dimensões da peça a simular e pormenor da espessura de parede do núcleo

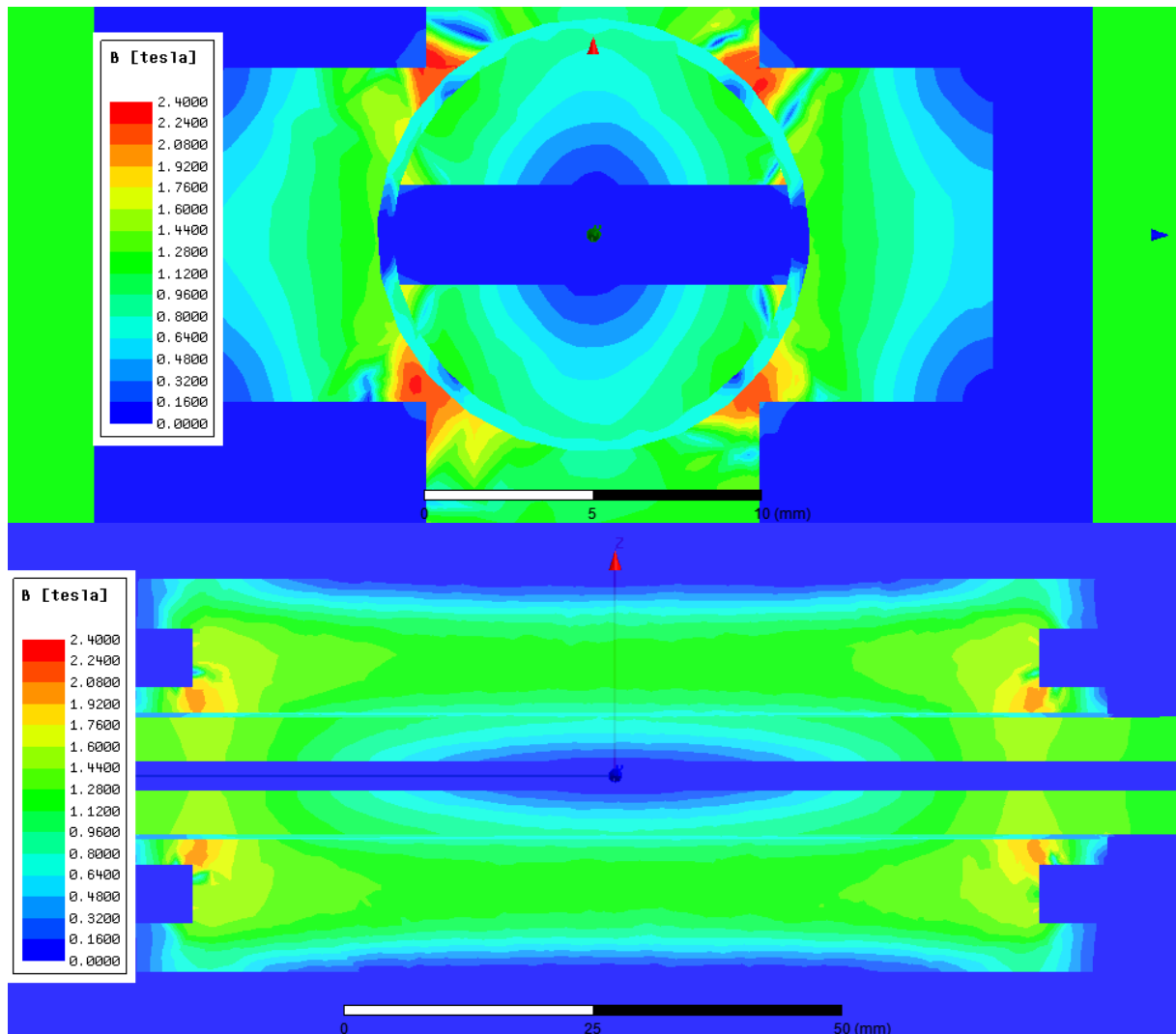


Figura 3.34 – Densidade de fluxo magnético para núcleo com espessura de parede de 0,57mm; $I = 250 \text{ A}\cdot\text{t}$.

Na Figura 3.34 pode observar-se a saturação do material ferromagnético do núcleo, no entanto a ativação e B do fluido mantem-se praticamente inalterada.

Devido a questões de complexidade de fabrico da haste em *sandwich* e da maquinagem do núcleo para utilização de tolerâncias dimensionais mais apertadas, estas principalmente na espessura de parede do furo que contém o FMR (Figura 3.34), obrigaram a retirar a aplicação de um campo magnético serpenteante. Deste modo, não foi necessário o fabrico das placas isolantes e a haste será fabricada totalmente em aço.

Devido a tais alterações foi necessário realizar novas simulações, para confirmar se o campo magnético gerado seria suficiente para especificação de força requerida.

Seguindo os mesmos passos, agora para o modelo sem alumínio na haste e sem placas isolantes, obteve-se o seguinte fluxo magnético no FMR para 1A a circular nas 220 espiras da bobina (Figura 3.35).

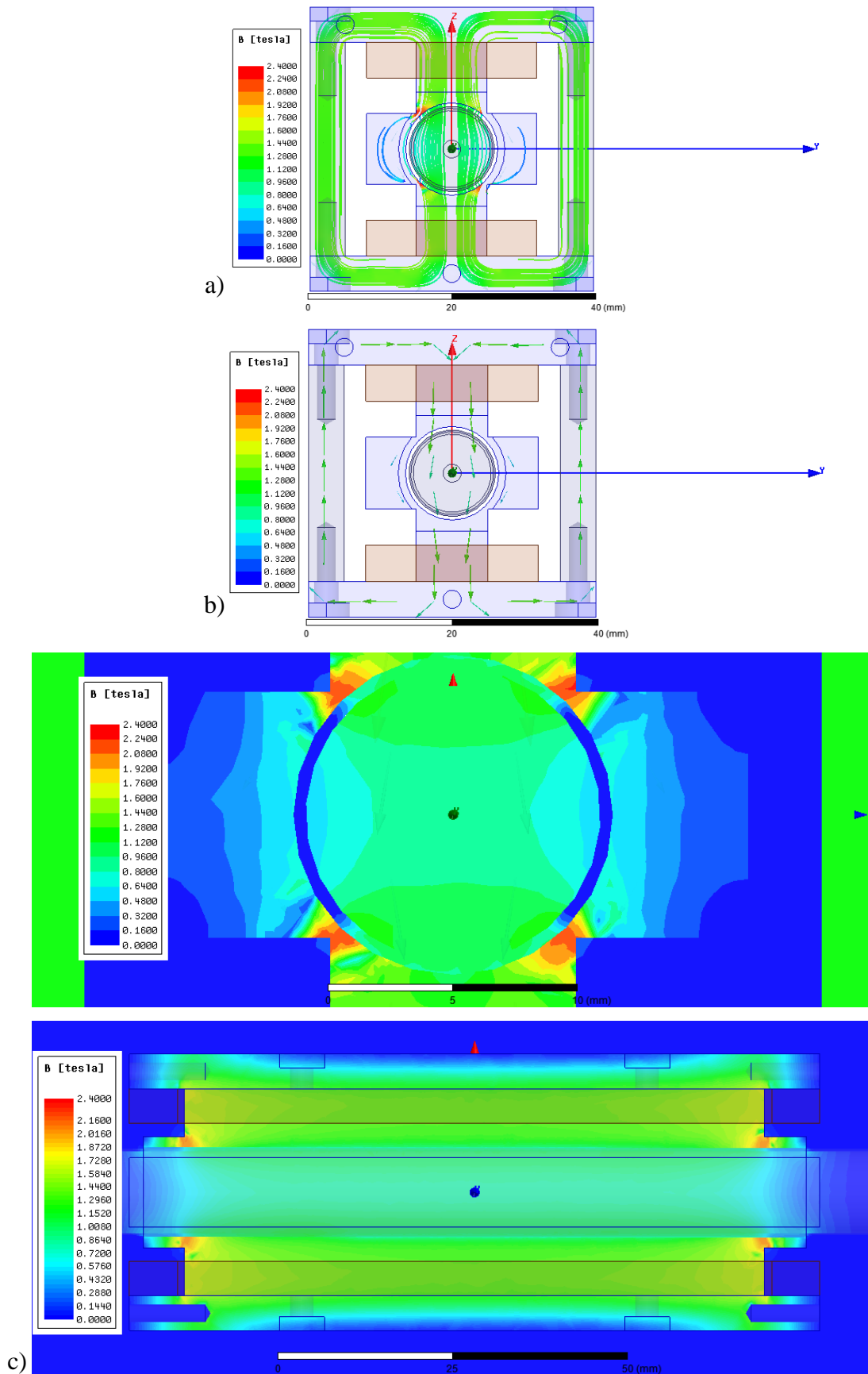


Figura 3.35 – Simulação secção transversal do dispositivo; a) linhas de B ; b) vetor de B ; c) pormenor no FMR magnitude B

É possível a obter a área de fluido ativa através do *software*, para esta finalidade traçou-se uma *polyline* sobre metade do contorno externo da haste e pediu-se ao *software* para reportar o valor de B sobre essa *polyline*, obtendo-se o seguinte gráfico (Figura 3.36).

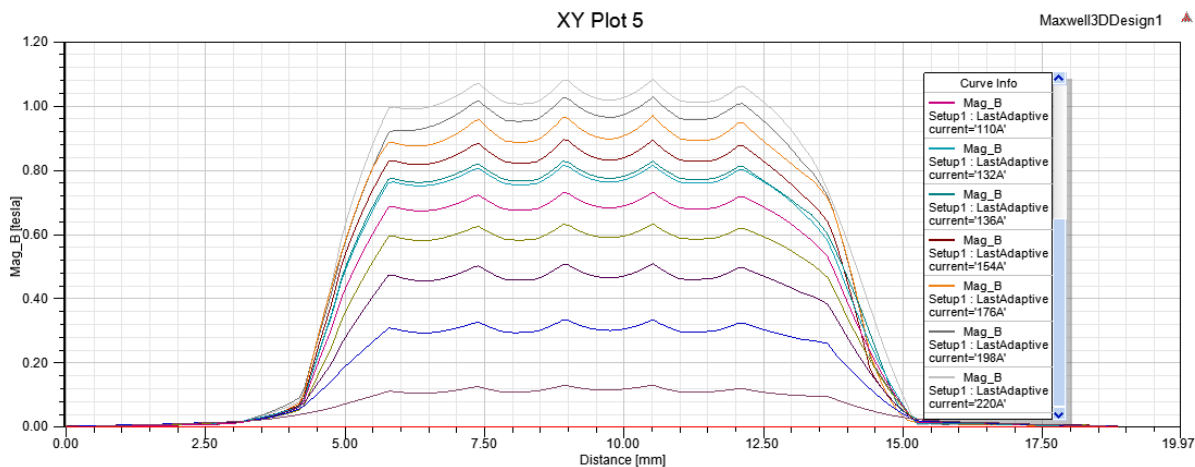


Figura 3.36 – Valores de B ao longo do comprimento da *polyline*, para as várias correntes de alimentação

Transformou-se o comprimento da *polyline* em radianos, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 3.37.

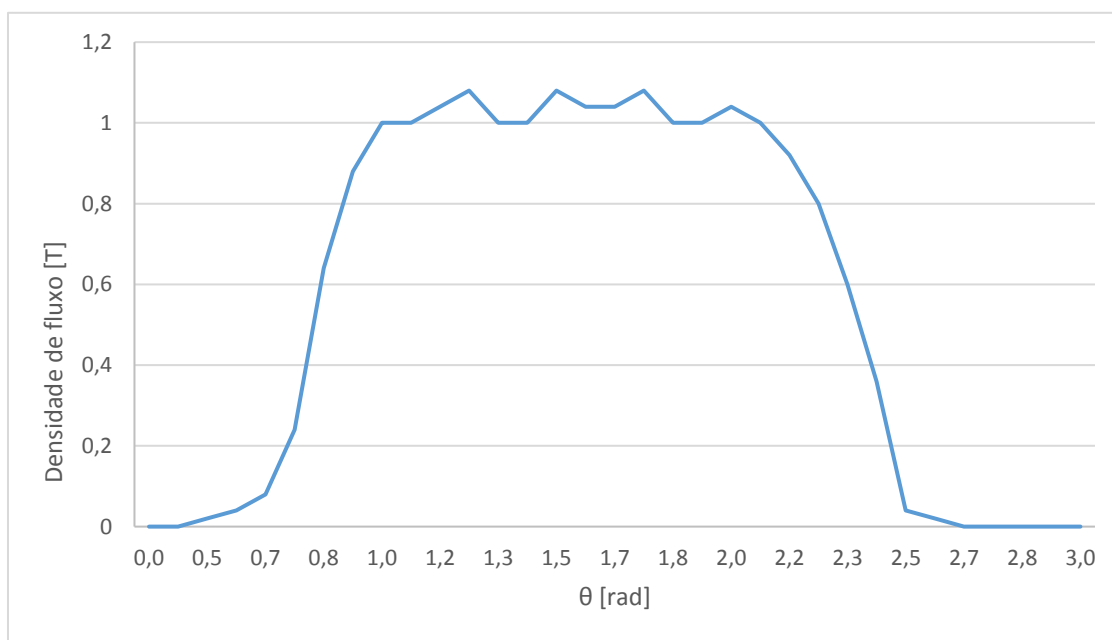


Figura 3.37 – Distribuição do fluxo magnético em meia haste

O ângulo de fluido ativo é 2 vezes o calculado, devido ao facto de ter sido determinado para apenas meia haste, ou seja:

$$\theta = 2 \cdot (2,33 - 0,83) = 2,994 \text{ rad} \quad (3.21)$$

De forma idêntica à Figura 3.31 a densidade de campo magnética ao longo da *polyline* longitudinal, será apresentada na Figura 3.38.

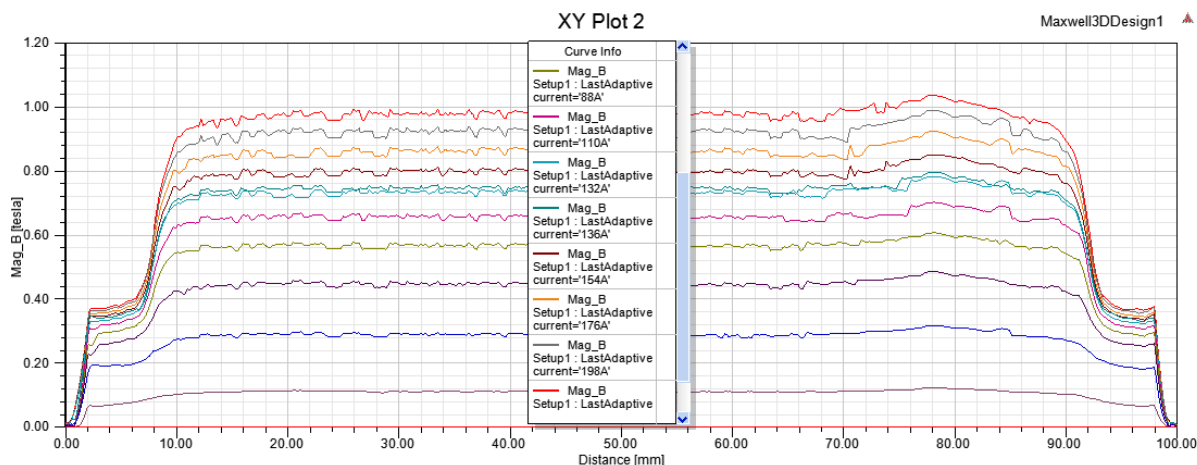


Figura 3.38 - Valores de B ao longo do comprimento da *polyline* longitudinal

Neste gráfico (Figura 3.38) podem observar-se claramente 2 zonas em que o fluxo magnético é constante. É admitido o salto imediato de patamar, de forma a facilitar os cálculos.

Considerando o fluido saturado a 1 T, a sua tensão de corte tem o valor de 49 kPa e para um B de 0,36 T obtém-se uma tensão de corte aproximada de 15 kPa.

A força total virá:

$$F = 2,994 * 0,006 * (0,020 * 20440 + 0,080 * 49000) = 77.8 \text{ N} \quad (3.22)$$

Admitindo a proximidade com a especificação de força, esta configuração será usada para implementação no protótipo. A capacidade de força podia melhorar com a utilização de um fluido com uma tensão de corte mais elevada, uma maior corrente de alimentação (causa problemas térmicos) ou uma futura aplicação dos componentes necessários à criação de um campo magnético serpenteante.

Para a Figura 3.38, recorrendo-se a uma regressão linear obteve-se a relação B vs. I que será usada posteriormente para estimar o valor de B no protótipo:

$$B = -0,7075 \cdot I^2 + 1,6807 \cdot I - 0,0125 \quad (3.23)$$

3.6 Sistema elétrico

O sistema elétrico a desenvolver para o dispositivo tem a finalidade de adquirir e processar sinais dos sensores e permitir a comunicação com o PC através de uma porta USB. Assim terminada a modelação mecânica e eletromagnética é necessário projetar o sistema elétrico de instrumentação, comando e potência do dispositivo.

Devido ao requisito de conhecer a posição da haste do dispositivo no seu intervalo de funcionamento é necessário um sensor de posição. Outro aspeto funcional associado a um dispositivo de *feedback* de força é a capacidade de medir esta grandeza. Para o efeito é necessária uma célula de carga. Esta irá ser implementada de forma a permitir a realimentação desse valor de força no sistema, o que permitirá ajustar automaticamente propriedades que dependam da força medida.

Para o sistema de comando será usado um computador com o *software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)*, este *software* será também usado para criar a interface gráfica, na qual o utilizador terá acesso aos dados dos sensores do sistema e poderá definir os parâmetros necessários ao funcionamento do dispositivo. Estes detalhes de programação serão discutidos na secção 4.6. Ainda no sistema de comando, a aquisição de dados dos sensores e comunicação entre o PC e o dispositivo, ficará ao encargo de uma placa de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments*.

O subsistema de potência integrará as fontes de alimentação requeridas para o normal funcionamento do sistema, ou seja, alimentação do controlador de corrente e alimentação do subsistema de condicionamento de sinal da célula de carga.

3.6.1 Sensor de deslocamento

Como referido anteriormente, foi necessário a aquisição de um sensor de posicionamento, devido à necessidade de saber a posição da haste em cada instante.

Tendo em vista a gama de deslocamentos pretendida ($\approx 100\text{mm}$) optou-se por transdutores com contacto. Os mais comuns são os transdutores potenciométricos e os LVDT (*Linear Variable Diferencial Transformer*). O LVDT tem boa linearidade e excelente resolução, mas apresenta duas grandes desvantagens, sendo a primeira o seu custo e a segunda o condicionamento de sinal complexo necessário ao seu funcionamento. A escolha recaiu assim sobre o transdutor potenciométrico linear, devido à sua simplicidade de construção, condicionamento de sinal simples e custo bastante baixo, comparado com os LVDT.

O transdutor selecionado foi o GEFRAN PZ34 – S – 125 (Figura 3.39), adquirido à F. Louro. As suas especificações podem ser observadas na Tabela 3.8.



Figura 3.39 – GEFRAN PZ34 – S – 125

Tabela 3.8 – Especificações do transdutor

PZ34 – S – 125	
Deslocamento (elétrico/mecânico)	(125 / 130) [mm]
Resistência	5 [k Ω]
Tensão máxima de funcionamento	60 [V]
Comprimento do corpo	183.5 [mm]

Como se pode reparar, o transdutor pode ser alimentado até 60 V, mas para simplificar a aquisição de sinal e não introduzir elementos extra de potência, optou-se por usar a saída de 5V proveniente do dispositivo de aquisição de sinal.

Na secção 4.6 será discutida a integração do transdutor no sistema.

3.6.2 Célula de carga

Como mencionado anteriormente, pretende-se medir a força com que o utilizador interage com o dispositivo, daí o uso de uma célula de carga ser indispensável nesta aplicação. Indo de encontro a uma postura de utilização de componentes *off-the-shelf* a célula de carga em S, *Tedea-Huntleigh Model 615* (Figura 3.40) com uma capacidade de 200 kg estava disponível para utilização, evitando assim gastos na aquisição de uma nova.



Figura 3.40 – Tedea-Huntleigh Model 615

Esta célula de carga funciona à tração/compressão segundo o seu eixo longitudinal, sendo acoplada ao objeto onde se quer realizar as medições por meio de ligações roscadas M12 nos seus topos.

Para o condicionamento de sinal foi usado o módulo *mV TRANSMITTER 2261* (Figura 3.41) da *PR electronics*. Este módulo é feito exclusivamente para aplicação de células de carga e permite, a ligação direta da célula ao módulo. Possui compensação de resistência dos cabos e saída em tensão ou corrente.

Na Tabela 3.9 referem-se algumas características deste.



Figura 3.41 – *mV transmitter 2261*

Tabela 3.9 – Algumas características do *mV transmitter 2261* [47]

<i>mV transmitter 2261</i>	
Alimentação	24 VDC
Potência máxima	7,2 W
Tempo de resposta programável	0,06 a 999 s
Gama de medição	-40 a 100 mV
Alimentação da célula de carga (programável)	5 a 13 VDC
Corrente de saída	0 a 20 mA
Tensão de saída	0 a 10 VDC

Este módulo foi programado para a integração da célula de carga através do *LED display* presente na sua frente.

3.6.3 Controlador de Corrente *LORD Wonder Box®*

Tendo em conta a necessidade de controlar a corrente nas bobinas, foi necessária a aquisição de um controlador, como referido anteriormente. Aquando da escolha do fluído verificou-se que a LORD fornecia também o *kit* de controlo *LORD Wonder Box®* (Figura 3.42) para os seus amortecedores lineares, pelo que se seguiu esta opção.

Este dispositivo é capaz de fornecer corrente e compensar efeitos de carga. Pode ser operado como uma interface entre um PLC ou PC e o dispositivo com FMR. Também permite um modo de controlo manual da corrente, através do potenciómetro (Figura 3.42C) e interrupção da corrente de saída através do botão lateral (Figura 3.42E).



Figura 3.42 – *LORD Wonder Box®*: A) entrada de alimentação; B) saída de corrente; C) potenciómetro para controlo manual; D) entrada BNC para controlo em tensão; E) *Switch* para controlo on-off da corrente de saída

Em modo de controlo externo em tensão o dispositivo apresenta uma característica linear entre a entrada em tensão e a saída de corrente, que pode ser observada na Figura 3.43, para uma carga aos terminais do controlador de 4 Ω .

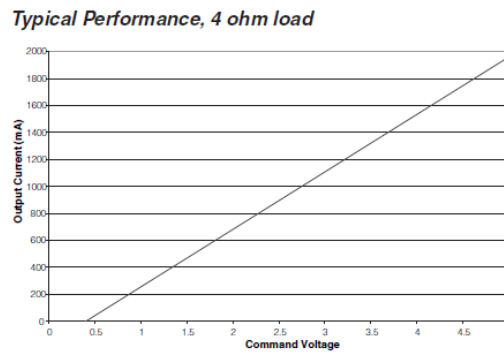
Figura 3.43 – Característica do controlador de corrente, para uma carga de 4 Ω .

Tabela 3.10 – Especificações do controlador de corrente

<i>LORD Wonder Box</i>	
Alimentação	12 V DC
Corrente de saída máxima	2 A
Frequência PWM	30 kHz
Entrada para controlo em tensão	0 a 5 V DC

3.6.4 Placa de aquisição de dados

Para se proceder ao controlo do dispositivo e obtenção dos dados dos sensores é necessária uma placa de aquisição de dados. Como os sensores e dispositivo de controlo de corrente já foram selecionados, torna-se mais fácil a seleção deste tipo de placa. Esta deverá cumprir os seguintes requisitos:

- 2 entradas analógicas gama 0 – 10 V;
- 2 saídas analógicas, gama 0 – 5 V;
- ligação USB ao PC;
- fácil integração em ambiente *LabVIEW*;

Relativamente à placa de aquisição consideraram-se duas possibilidades: uma placa *Arduino UNO v3* ou uma placa da *National Instruments NI USB-6008* (Figura 3.44). O *Arduino* permitia uma solução de controlo em tempo real, mas a sua programação seria mais complexa e não disponha de saídas analógicas. Assim, optou-se pela placa da *National Instruments*, esta tem disponíveis as entradas e saídas necessárias à aplicação e ligação USB ao PC.



Figura 3.44 – Placa NI USB-6008

As principais propriedades da placa são apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Propriedades da placa NI USB-6008 [48]

<i>NI USB-6008</i>	
Alimentação	5 V pelo cabo USB de ligação ao PC
Isolamento	Não apresenta isolamento de canais
Resolução conversão analógica digital	12 <i>bits</i> em modo diferencial 11 <i>bits</i> em modo singular
Taxa de amostragem máxima	10 kHz em modo canal simples ou combinado
Entradas analógicas	4 canais diferenciais ou 8 canais singulares
Tensão de entrada	-10 a 10 V com uma exatidão de 7,73 mV
Saídas analógicas	2
Resolução conversão digital analógica	12 <i>bits</i>
Tensão de saída	0 a 5 V com uma exatidão 7 mV
Taxa de atualização	150 Hz
Entradas/saídas digitais	12 bidirecionais
Tensão das entradas/saídas digitais	0 a 5 V

Infelizmente esta placa não inclui isolamento entre canais analógicos como se observará no decorrer deste texto, mas será apresentada uma solução alternativa a este problema. As portas digitais não serão usadas nesta aplicação.

3.7 Conclusão

Este capítulo apresenta o projeto e o processo de seleção dos componentes a integrar no protótipo final.

Neste processo foi dada especial atenção às simulações FEM, para se perceber a integração do sistema magnético e sistema mecânico.

Face a estas simulações foi também possível compreender melhor o funcionamento do dispositivo e observar os fenómenos magnéticos presentes para a realização da tarefa pretendida. Como foi evidenciado a solução de um campo magnético serpenteante seria a preferida para o protótipo, mas as limitações de fabricação impostas não o permitiram. Mesmo assim a capacidade de força encontra-se em limites aceitáveis para a execução do projeto.

Finalmente, a escolha dos componentes a integrar com o dispositivo veio fechar o projeto do dispositivo. A utilização de uma célula de carga de 200 kg não é a mais recomendada, devido à gama de forças para que esta será usada, mas poderá ser substituída posteriormente.

4 Desenvolvimento do protótipo

Neste capítulo pretende-se mostrar o processo de aquisição de materiais, montagem, instrumentação e programação. Passos necessários à obtenção de um protótipo funcional, capaz de realizar os objetivos propostos.

4.1 Obtenção de materiais

Como já foi mencionado, tentou-se usar uma atitude na obtenção de material *off-the-shelf*, mas devido à falta de *stock* ou natureza de alguns materiais necessários, isso não foi possível. Os orçamentos obtidos das empresas que forneceram os materiais encontram-se no anexo A.

4.1.1 Aço de baixo teor em carbono

A obtenção do aço para a realização do núcleo, foi um compromisso. Todas as simulações foram feitas a pensar no aço de norma AISI 1010, típico para aplicações em eletroímãs. Com a impossibilidade de aquisição de um aço com esta norma e com especificidades magnéticas, adquiriu-se à RAMADA AÇOS um aço com propriedades semelhantes em termos de teor de carbono. A escolha recaiu no Super Pb, de norma AISI 12L14.

Devido à impossibilidade da fabricação da haste a partir do varão de aço comprado à Ramada, foi necessário adquirir um varão para a sua fabricação. A escolha recaiu sobre a Universal Afir e o aço adquirido foi o Super EPC Pb.

As diferenças de composição química destes aços, podem observar-se na Tabela 4.1, tendo em atenção que as propriedades do Super EPC Pb provêm do relatório de ensaio do material:

Tabela 4.1 – Composição química de AISI 1010 e AISI 12L14

Composição química (%)	AISI 1010[46]	SUPER PB - AISI 12L14 [49]	SUPER EPC PB 12L14
C	0,08 – 0,13	0,14	0,068
Si		0,05	0,009
Mn	0,3 – 0,6	1 – 1,5	1,410
P	<0,040	0,110	0,050
S	<0,05	0,34 – 0,400	0,341
Pb		0,20 – 0,35	0,288

Quanto às propriedades magnéticas do material, estas não puderam ser testadas, mas admitiu-se que eventuais discrepâncias não afetariam significativamente o desempenho do dispositivo.

4.1.2 Vedantes e cintas de guiamento

A aquisição dos vedantes foi feita à Sove e à Vedantes do Porto. Inicialmente a escolha recaiu sobre *Turcon Variseal* (Figura 4.1) mas a sua colocação não foi bem-sucedida, tendo-se optado pela fabricação de dois vedantes labiais (Figura 4.3).

Quanto ao guiamento foi selecionada a cinta *Turcite® Slydring®*, uma para cada tampa. Estes materiais podem ser observados na Figura 4.2.



Figura 4.1 – Vedante Turcon® Variseal® M2 [50]



Figura 4.2 – Cinta de guiamento Turcite® Slydring® [51]



Figura 4.3 – Vedantes labiais

4.2 Desenhos de definição para maquinagem

A fabricação das peças em metal, levou à necessidade da execução de desenhos técnicos. Estes foram provenientes da versão final do modelo executado em *SolidWorks* e podem ser consultados no Anexo A.

A maquinagem do núcleo, das tampas e da haste, ficou a cargo das Oficinas do DEMec, enquanto a maquinagem das tampas foi realizada pela empresa Tecnogial.

Na Figura 4.4 é possível observar as peças finais.

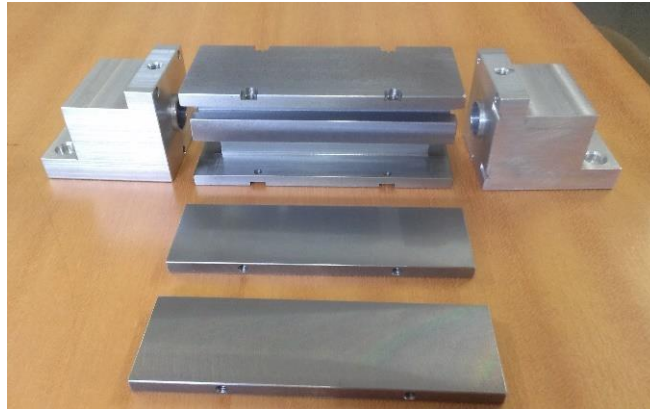


Figura 4.4 – Peças finais, excluindo haste.

4.3 Bobinagem do núcleo

Tendo em conta a natureza de ativação do fluido, a criação das bobines é um ponto fundamental, a tensão de corte aumenta proporcionalmente com o fluxo magnético. Este fluxo será tanto maior, quanto maior o número de espiras da bobine e a corrente que as percorre.

O fio de cobre foi disponibilizado pela Campos e Cardoso L^{DA}, com as seguintes propriedades (Tabela 4.2):

Tabela 4.2 – Propriedades do fio de cobre AWG28

Fio de cobre AWG28	
Diâmetro esmaltado	0,35 mm
Resistência	0,214 Ω/m
Área da secção	0,0962 mm ²

Tendo em conta a área disponível para a bobinagem no núcleo de 56 mm², procedeu-se ao cálculo aproximado da área de secção da bobina com 220 espiras (em vez das 250 previstas inicialmente). Admitindo um empenhamento topo a topo esta área é calculada multiplicando a área de uma espira pelas 220 da bobina, obtendo-se uma área de 21,16 mm². Desta forma tem-se área suficiente para aumentar o número de espiras caso necessário.

Considerando as dimensões do núcleo, estimou-se o comprimento de fio necessário para o enrolamento de cada bobina através da expressão:

$$L = N \cdot (2 \cdot C + 2 \cdot l) = 220 \cdot (2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,24) = 54,56 \text{ m} \quad (4.1)$$

Onde:

L – Comprimento de fio necessário;

N – N° de espiras;

C – Comprimento do núcleo em metros;

l – Largura média da bobina em metros;

Com o valor estimado do comprimento de cada bobina é possível calcular a sua resistência que, será dada por:

$$R = R' \cdot L = 0,214 \cdot 54,56 = 11,67 \text{ } \Omega \quad (4.2)$$

Onde:

R – Resistência total da bobina

R' – Resistência por metro do fio de cobre

L – Comprimento estimado do fio de cobre

Para evitar permanentemente algum problema de curto-circuito devido ao contacto da bobina com o núcleo, utilizou-se *Nomex*® como material isolante. Este material é extensamente usado em equipamento elétrico como isolante, apresenta uma elevada rigidez dielétrica, dureza mecânica, estabilidade térmica, flexibilidade e resiliência. Pode suportar tensões até 18 kV/mm durante pequenos períodos de tempo e temperaturas de 220 °C até 10 anos. [52]

Planificou-se cada face do núcleo e recortou-se o *Nomex*® como apresentado na Figura 4.5.

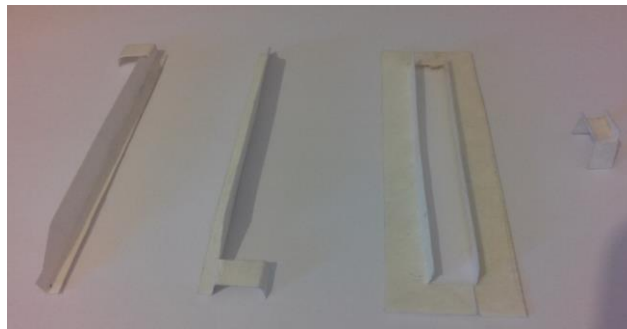


Figura 4.5 – Recortes de *Nomex*® para uma bobina

Seguidamente revestiu-se o núcleo com *Nomex*® e realizou-se a bobinagem à mão. O processo pode ser observado na Figura 4.6 e Figura 4.7.

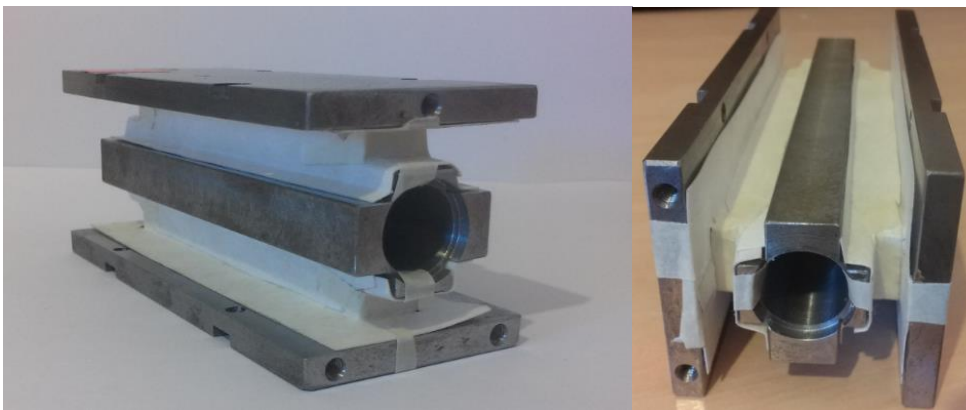


Figura 4.6 – Núcleo revestido com *Nomex*®

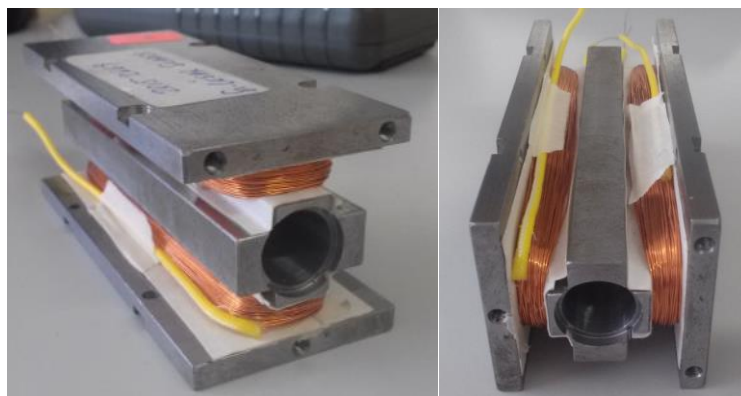


Figura 4.7 – Núcleo bobinado com 220 espiras por bobina

Testada a resistência das bobinas, obteve-se na medição de resistência estática com o multímetro e o método dos 4 condutores:

- para a bobina 1 – 9.055 Ω
- para a bobina 2 – 8.971 Ω
- Para o conjunto em série – 17.971 Ω

Muito próximo do esperado e com valores muito semelhantes entre as duas bobinas. Desta forma a indutância mútua será equivalente entre bobinas.

Os testes realizados às bobinas para a sua validação serão apresentados na secção 5.1.1 Bobinas.

4.4 Montagem do dispositivo

Com o núcleo bobinado e todo o material disponível, procedeu-se à montagem do sistema, mais uma vez adotou-se a filosofia *off-the-shelf* para algum material necessário à montagem, como por exemplo, parafusos, base de apoio ao sistema e fontes de alimentação.

Num primeiro passo, montaram-se os vedantes e as cintas de guiamento nas tampas, introduziu-se a haste numa das tampas e de seguida acoplou-se o núcleo. Colocou-se a tampa restante e aparafusaram-se as tampas ao núcleo: o resultado após a acoplação do transdutor pode observar-se na Figura 4.8.

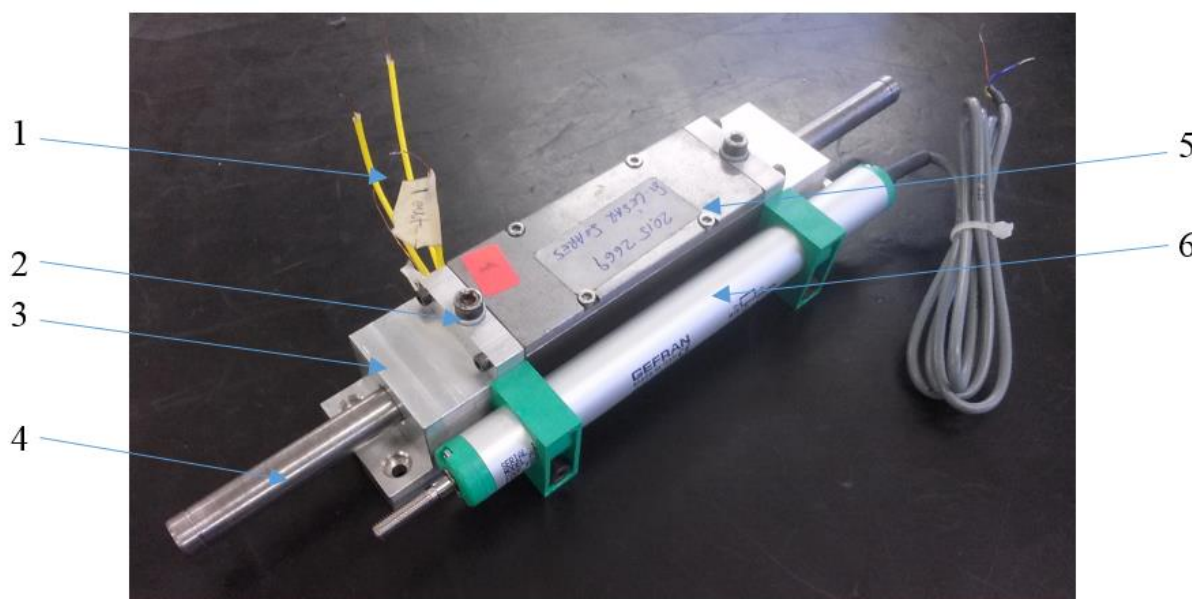


Figura 4.8 – Dispositivo montado; 1- cabos de alimentação das bobinas; 2 – orifício para FMR + vedação; 3 – tampa; 4 – Haste; 5 – Núcleo; 6 – Transdutor potenciométrico

Para a colocação do FMR usou-se uma seringa de 10 mL, sendo os orifícios de entrada, vedados com a ajuda de anilhas poliméricas aliadas a parafusos M5.

No passo seguinte integraram-se os restantes componentes do sistema, o controlador de corrente, célula de carga e condicionamento de sinal, fontes de alimentação e ligação do transdutor à haste. Para facilitar o transporte fixou-se o sistema numa base de madeira. A Figura 4.9 apresenta o sistema final.

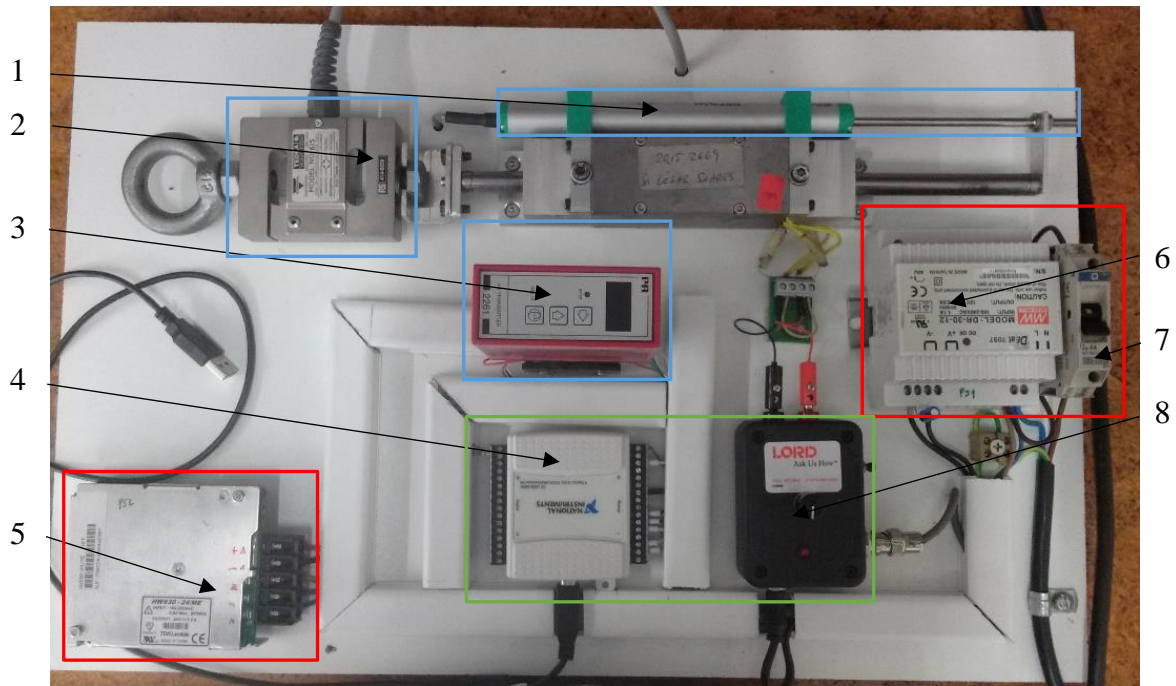


Figura 4.9 – Sistema final

Na Figura 4.9 pode ver-se:

- O subsistema de medição, constituído pelo transdutor (1), célula de carga (2) e o seu condicionamento de sinal (3);
- O subsistema de controlo, constituído pela placa de aquisição de dados (4) e controlador de corrente (8);
- O subsistema de potência, constituído pela fonte de alimentação de 24V, HWS 30-24/ME para o condicionamento de sinal da célula de carga (5), fonte de alimentação, DR 30-12 para o controlador de corrente (6) e disjuntor de corte da alimentação do sistema (7);

No ANEXO C é possível a consulta dos esquemas elétricos do sistema.

4.5 Caracterização dos sensores e controlador de corrente

A integração dos sensores em qualquer sistema pressupõe a sua caracterização destes ou o conhecimento prévio a sua função característica. Esta permite conhecer a relação entre a propriedade a medir e a propriedade de saída do sensor, que poderá ser uma tensão ou corrente.

4.5.1 Transdutor potenciométrico

Para obter a característica do transdutor de posição, este foi alimentado com uma tensão de 5 V proveniente do pino 31 da placa de aquisição, e a saída do transdutor foi lida com um multímetro, para diferentes posições da sua haste tendo-se chegado à equação(4.3).

$$x = 26,334 \cdot V + 1,317 \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

Visto o transdutor apresentar uma resolução infinita, está é apenas limitada pelo conversor A/D da placa de aquisição de dados, assim sendo o curso do transdutor 125 mm para um conversor A/D de 12 bits, a resolução de aquisição da posição será:

$$\text{Resolução} = \frac{125}{2^{12}} = 0,031 \text{ mm} \quad (4.4)$$

4.5.2 Célula de carga

A célula de carga tem a característica dada pela equação (4.5):

$$F = 45,982 \cdot \Delta V - 264,94 \text{ N} \quad (4.5)$$

O módulo de condicionamento de sinal foi ajustado para apresentar uma tensão de saída de 0 V para -90 N e 10V quando a força aplicada for 110N. Considerando a resolução do conversor A/D de 12bit e uma gama de tensão dos 0-10V, tem-se uma resolução na medição de tensão de 2,4 mV e a resolução na medição da força será:

$$\text{Resolução} = 2,4 \cdot 10^{-3} * \frac{200}{10} \approx 0,048 \text{ N} \quad (4.6)$$

4.5.3 Controlador de corrente

Na secção 3.6.3 foi mencionada a curva característica para uma carga de 4 Ω à sua saída. No entanto, a resistência real da bobina é de 17,97 Ω . Assim, foi avaliada experimentalmente a curva característica (Corrente de saída vs. Tensão de controlo), Figura 4.10, estando representada na Figura 4.11 e pela equação (4.7).

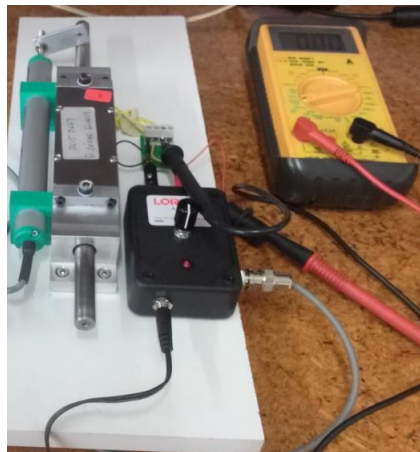


Figura 4.10 – Medição da corrente de alimentação das bobinas

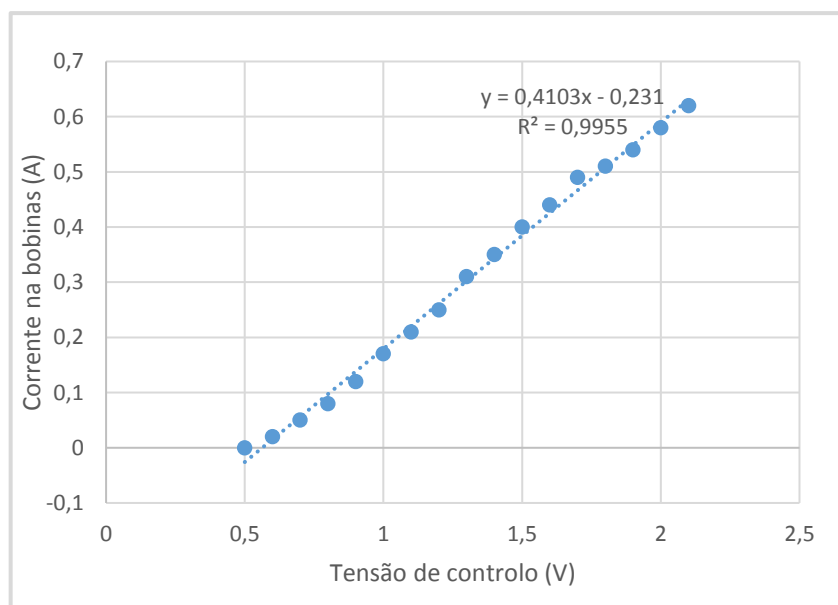


Figura 4.11 – Corrente vs. Tensão de controlo

$$I = 0,4103 \cdot V - 0,231 \text{ [A]} \quad (4.7)$$

Tendo a placa de aquisição de dados um conversor D/A de 12 bits a resolução do sinal de controlo em tensão será 1,22 mV ($5/2^{12}$) e a resolução da corrente de saída será

$$Resolução_{corrente} = 1,22 \cdot 10^{-3} * \frac{0,62}{1,5} = 5.04 \cdot 10^{-4} \text{ [A]} \quad (4.8)$$

4.6 Software e interface gráfico

Nesta secção pretende-se mostrar a programação necessária à criação do *software* de controlo e integração dos vários dispositivos. Como já mencionado, para esta tarefa será usado o *software LabVIEW*, mostrando-se também a interface gráfica criada e que permite ao utilizador a interação e visualização em tempo real dos dados obtidos no sistema.

4.6.1 Interface gráfica e controlo

A necessidade de visualizar e controlar parâmetros do sistema, requer a existência de uma interface acessível ao utilizador, entre o sistema de controlo e o dispositivo. Esta permitirá ao utilizador atuar sobre o estado das variáveis do sistema e observar os dados recolhidos dos diversos sensores. Na Figura 4.12 apresenta-se a página inicial da interface desenvolvida para o presente sistema. O *LabVIEW*. É primeiramente um *software* pensado para aquisição de dados e, desta forma, dispõe de variadas ferramentas para apresentar de forma atrativa e variada a informação recolhida.



Figura 4.12 – Página inicial da interface desenvolvida

Para esta tarefa o *software* usa uma linguagem de programação gráfica, que assenta num modelo de fluxo de dados entre blocos funcionais. Estes disponibilizam várias funções que permitem realizar as mais variadas tarefas.

A criação de uma interface em LabVIEW implica duas partes. O painel frontal (*frontend*) que é a janela na qual serão apresentados os resultados das medições e na qual o utilizador poderá interagir durante o funcionamento do programa. Pode incluir botões, gráficos, indicadores, entre outros. A segunda parte é o diagrama de blocos (*backend*) encarregue do controlo do sistema e contém todos os blocos funcionais ordenadamente ligados entre si.

De notar que esta interface será usada para desenvolvimento e testes ao sistema, estando todas as opções e funcionalidades de programação do *software* disponíveis ao utilizador. Deste modo todos os testes realizados e dados recolhidos do sistema terão por base esta interface.

A página inicial da interface, já referida em cima, conta com a apresentação e informações técnicas do projeto. No lado esquerdo está disponível o menu para navegação entre as diferentes funcionalidades do sistema.

No menu transdutor (Figura 4.13), tem-se acesso à janela de visualização de dados do transdutor, podendo observar-se a posição, velocidade e amplitude de sinal do transdutor.

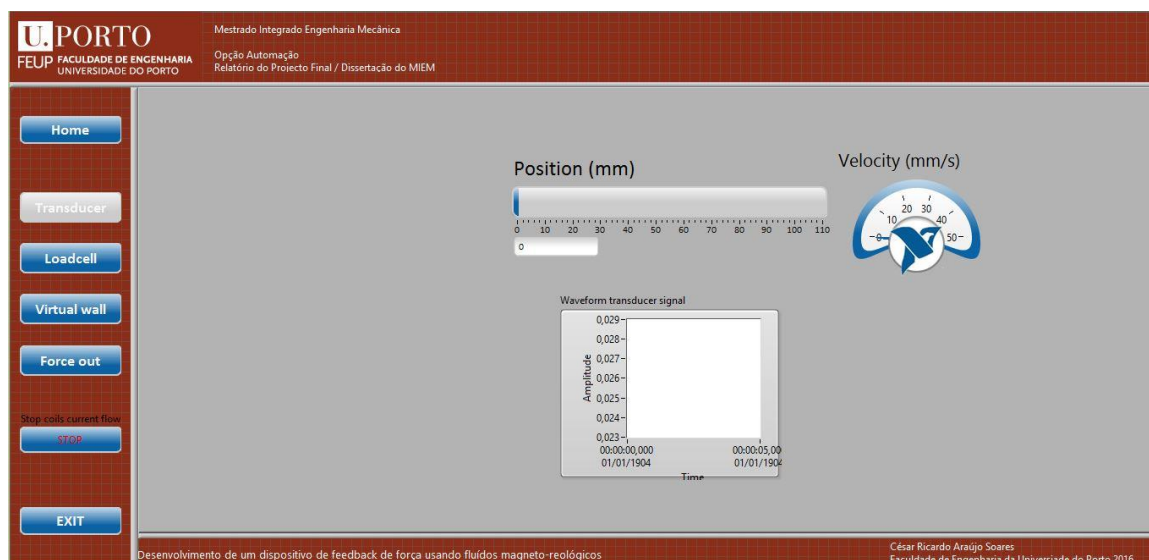


Figura 4.13 – Janela do transdutor

Para o menu *Loadcell* (Figura 4.14) a janela é semelhante permitindo observar a variação da tensão da célula de carga adquirida ao longo do tempo e a força a que está submetida em N e em kgf.

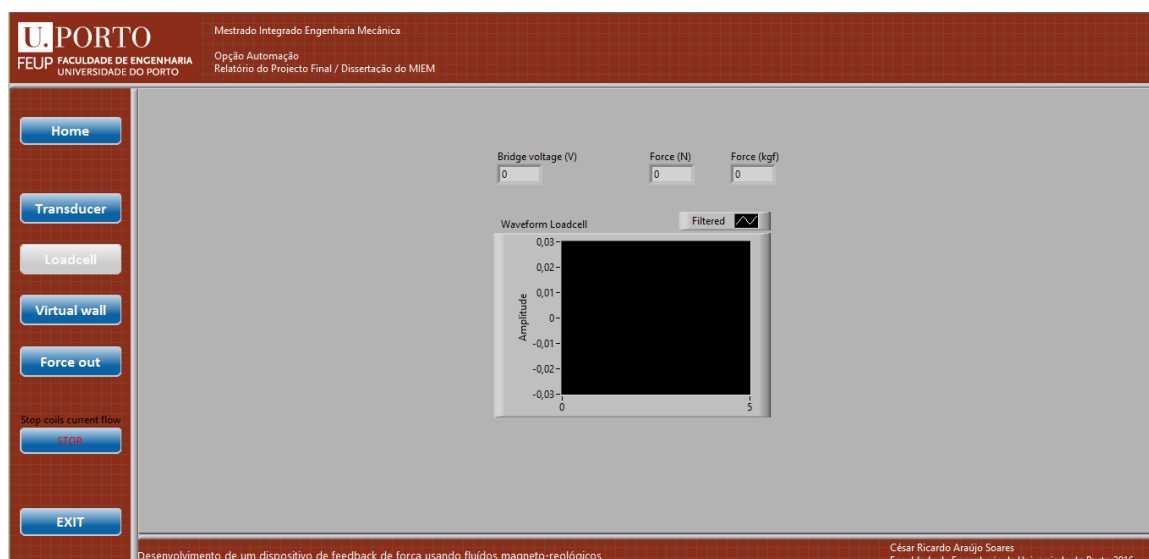


Figura 4.14 – Janela da célula de carga

No menu *Virtual Wall* (Figura 4.15), encontra-se a interface necessária à realização de um teste que tem por objetivo a colisão com uma parede virtual. Esta consiste em deslocar a haste do dispositivo até uma posição definida, com o sistema em *off-state* e a partir desse ponto o sistema passará a *on-state*. Para este teste está disponível a introdução de alguns parâmetros pelo utilizador, nomeadamente a posição (*On state position*) e a corrente que se pretende injetar

nas bobinas (*on state current*) limitada à corrente fornecida pelo controlador de corrente (0 a 0,62 A).

É possível verificar se o dispositivo atingiu a posição pretendida pelo estado do LED *Status*. Estão disponíveis informações sobre a corrente e tensão geradas pelo DAQ e a posição da haste nos indicadores numéricos (*Current state*) e no gráfico do lado direito. Aquando da atuação do *switch*, *Recoil from Wall*, é possível recuar a haste sem esforço, caso esta esteja numa posição maior que a definida, ou seja, “dentro da parede virtual”. Os testes realizados serão apresentados na secção 5.1 Testes.

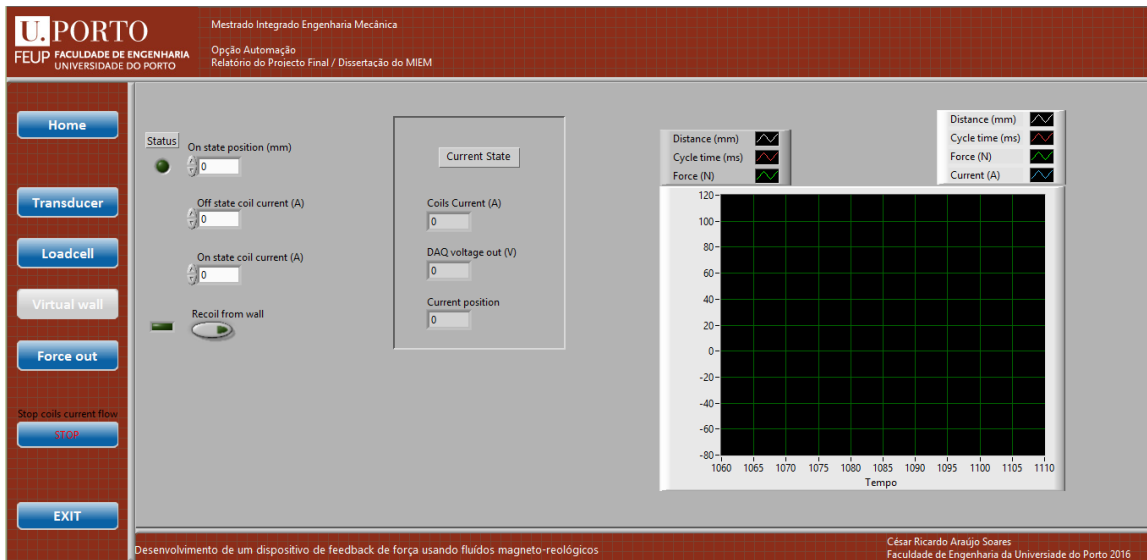


Figura 4.15 – Janela do menu *Virtual Wall*

O último menu, *Force Out* (Figura 4.16), redireciona para outra janela de teste, em que se pretende criar automaticamente uma força resistiva ao movimento da haste. Para este efeito é usado um controlador PI. Como o *LabVIEW* não apresenta um bloco funcional PI nativo usou-se o bloco PID com um T_D elevado, de modo a simular um controlador PI. É possível ao utilizador modificar os vários parâmetros do PID de forma a testar as várias respostas do sistema às alterações feitas.

É também possível ligar/desligar o controlador através do *switch* com o nome PID, deixando o sistema de funcionar com a referência de força e passando a exibir uma força proporcional à corrente introduzida nas bobinas.

Nos indicadores numéricos à esquerda é possível observar uma estimativa dos valores de fluxo magnético B , intensidade de campo H , tensão de corte do FMR (*Yield stress*), força necessária ao movimento da haste (*Force*) e a força obtida através da célula de carga (t). Estas estimativas, foram obtidas depois da implementação de funções obtidas através das simulações de elementos finitos.

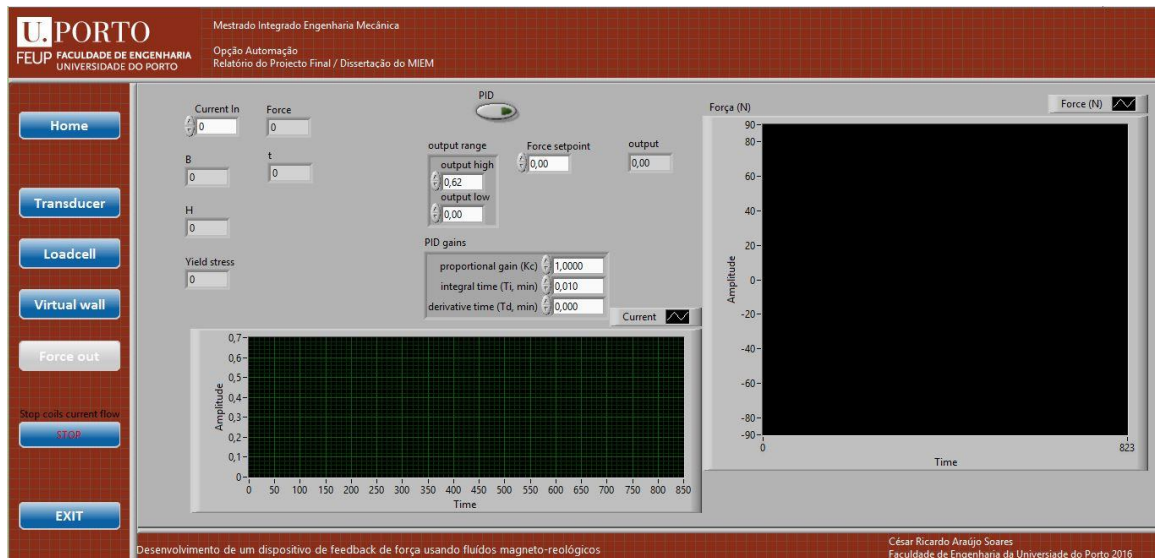


Figura 4.16 – Janela do menu *Force Out*

O funcionamento em modo contínuo desta interface é assegurado por um ciclo *while* onde se encontram os blocos funcionais necessários à aquisição, processamento e criação de sinais. Este pode ser observado no anexo B, sendo demonstradas algumas características deste no decorrer desta secção. O Menu de navegação é assegurado por outro ciclo *while* em paralelo com o primeiro e uma *event structure* que assegura a mudança entre as diferentes janelas quando atuados os botões da barra lateral (Figura 4.17).

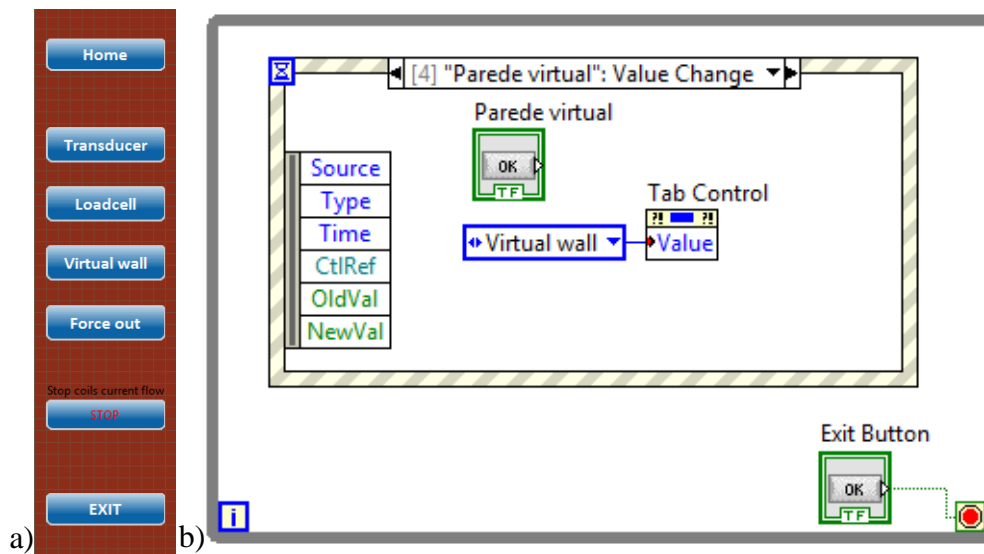


Figura 4.17 – Configuração do menu lateral; a) *frontend*; b) *backend*;

A aquisição de sinais é feita para os dois sinais (célula de carga e transdutor) em simultâneo, sendo usado o bloco *DAQ Assistant3* (Figura 4.18) para a realização desta tarefa. Posteriormente os sinais são separados, e o sinal da célula de carga passa por um filtro de *Smoothing* de forma a diminuir a amplitude de oscilação do sinal, sendo posteriormente introduzidas as funções características dos sensores.

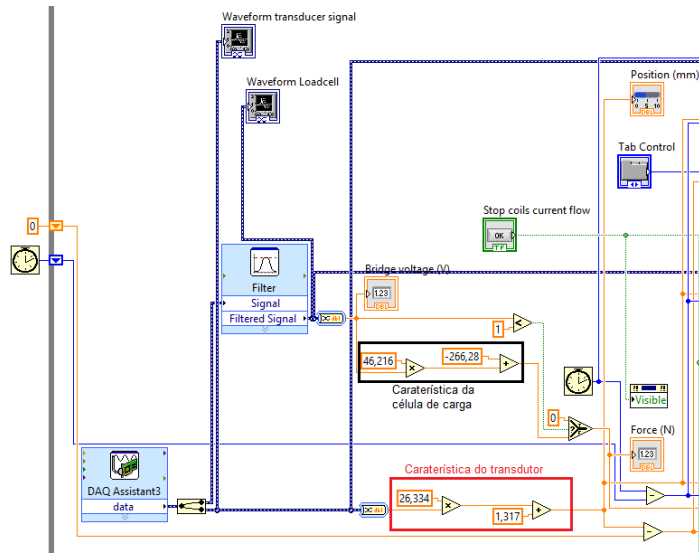


Figura 4.18 – Parte da *Backend* do ciclo *while* principal, de aquisição de sinal e características dos sensores

As janelas dos menus apresentam uma *backend* baseada numa *case structure* (Figura 4.19), que é controlada pela *event structure* apresentada anteriormente. Nesta *case structure* é possível observar o bloco funcional do controlador PID, os blocos dos seus parâmetros, as funções de estimativa dos valores de campo magnético (B, H), tensão e força.

O bloco *DAQ Assistance* está encarregue de gerar o sinal digital que será enviado para o conversor D/A, presente no *DAQ*, gerando este o sinal analógico necessário ao controlo do sistema.

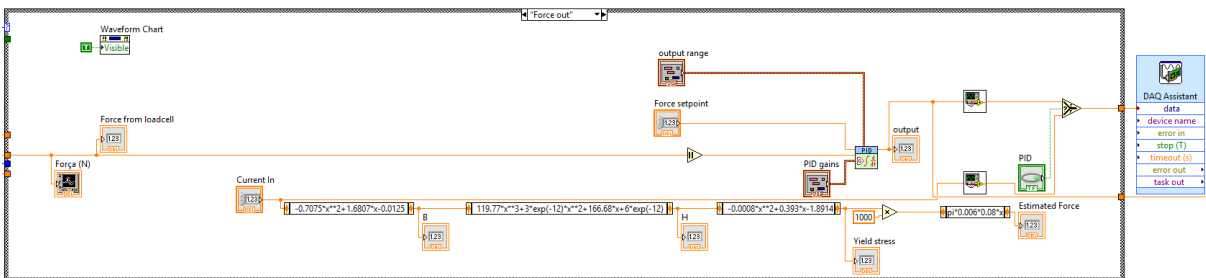


Figura 4.19 – *Case Structure*, backend da janela *Force out*

Finalmente, os dados adquiridos são exportados para um ficheiro do *Microsoft Excel* com a ajuda do bloco funcional *Write to Measurement File* (Figura 4.20).

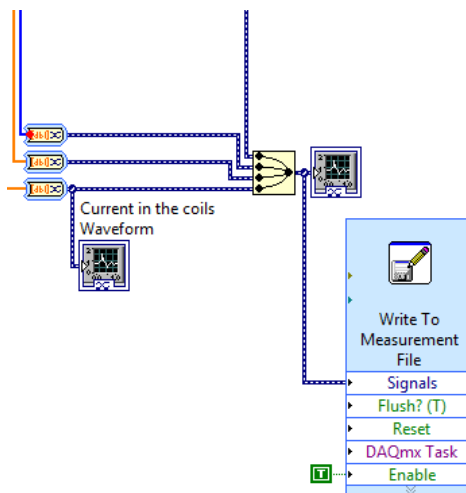


Figura 4.20 – Bloco funcional de exportação de dados

5 Verificação Experimental

Neste capítulo pretende-se mostrar os testes realizados ao sistema e a alguns dos seus constituintes, com o intuito de obter as suas propriedades e validar o funcionamento do sistema concebido. Posteriormente tecer-se-ão alguns comentários relativamente aos dados obtidos durante a realização dos testes.

5.1 Testes

Serão expostos inicialmente os testes realizados para a validação das bobinas, seguidamente o teste de aquisição de sinal do transdutor quando o sistema se encontra em *on-state* e finalmente os testes ao sistema completo.

5.1.1 Bobinas

Como mencionado na secção 4.3, para validar as bobinas foi necessária a verificação da indutância (L) e capacidade (C) e não apenas a verificação da resistência.

Para a realização das medições foi usada uma ponte LCR ELC-131D (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Ponte LCR;

Esta ponte é capaz de medições dinâmicas a 120 Hz e a 1 kHz para a indutância, capacidade e resistência. Para L e para C é possível obter os fatores Q e D respetivamente.

O fator Q está associado à energia armazenada em relação à perda de energia no oscilador, ou seja, quanto maior Q menos energia o oscilador perde, logo oscila durante um tempo mais elevado. O fator D é a medida da perda de fluxo de energia de um modo de oscilação, logo será melhor se este fator for baixo.

Para a realização dos testes usou-se uma *breadboard* de modo a evitar problemas de ligação. Para a medição da resistência foi usado o multímetro *KEITHLEY* com 4 cabos de ligação de forma a minimizar a resistência dos cabos de medição.

O *setup* para a realização dos testes pode ser observado na Figura 5.2.

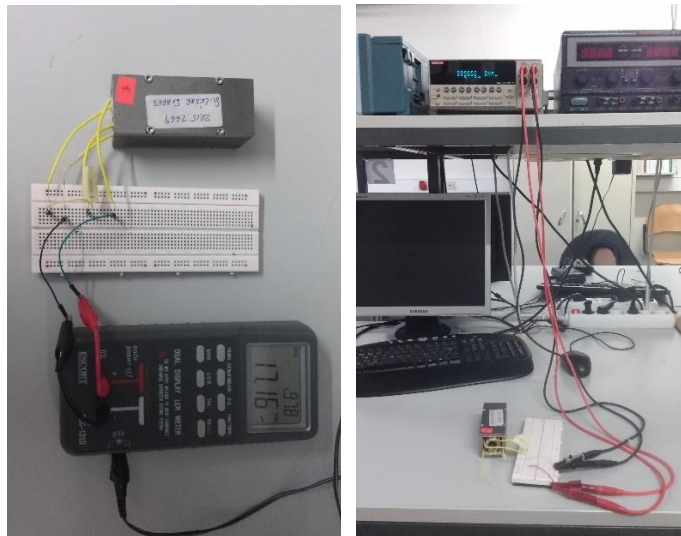


Figura 5.2 – Setup para realização dos testes com ponte LCR e multímetro

Obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 5.1, tendo em conta que as medições a 0 Hz foram efetuadas com o multímetro *KEITHLEY*.

Tabela 5.1 – Valores obtidos para a medições efetuadas às bobinas

	Bobina (1)			Bobina (2)			Bobina (1)+(2) serie		
f (Hz)	1000	120	0	1000	120	0	1000	120	0
L (mH)	8,354	18,94		8,308	18,83		17,16	45,39	
Q	1,17	0,799		1,16	0,794		1,01	0,739	
C (µF)	1,73	34,96		1,742	35,05		0,7726	13,22	
D	0,85	1,25		0,848	1,25		0,959	1,35	
R (Ω)	107,3	29,77	9,055	106,7	29,62	8,971	217,6	72,81	17,971

Como se pode observar e já tinha sido mencionado anteriormente as bobinas 1 e 2 encontram-se bem balanceadas, apresentando propriedades semelhantes. Quanto ao fator Q e D apresentam melhores valores a alta frequência.

Por último, mediu-se a densidade de fluxo magnético gerado pelas bobinas, sem a presença da haste a atravessar o núcleo. Para este teste usou-se um Teslâmetro T100 (Figura 5.3) com uma sonda bi-axial e 2 escalas de medição 0 a 10 mT e 0 a 100 mT. Obtendo-se os valores presentes na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

Os valores obtidos não são equiparáveis às simulações magnéticas, visto ter-se o circuito magnético “aberto”. A zona da haste está completamente exposta ao ar que apresenta uma permeabilidade magnética relativa próxima de 1, contrariamente aquando da presença da haste e do FMR que apresentam permeabilidades relativas de 1000 e 3 (para uma densidade de fluxo de 1T e um campo magnético de 280 kA/m). Como o FMR tem uma pequena espessura nunca irá influenciar de forma significativa a permeabilidade magnética.

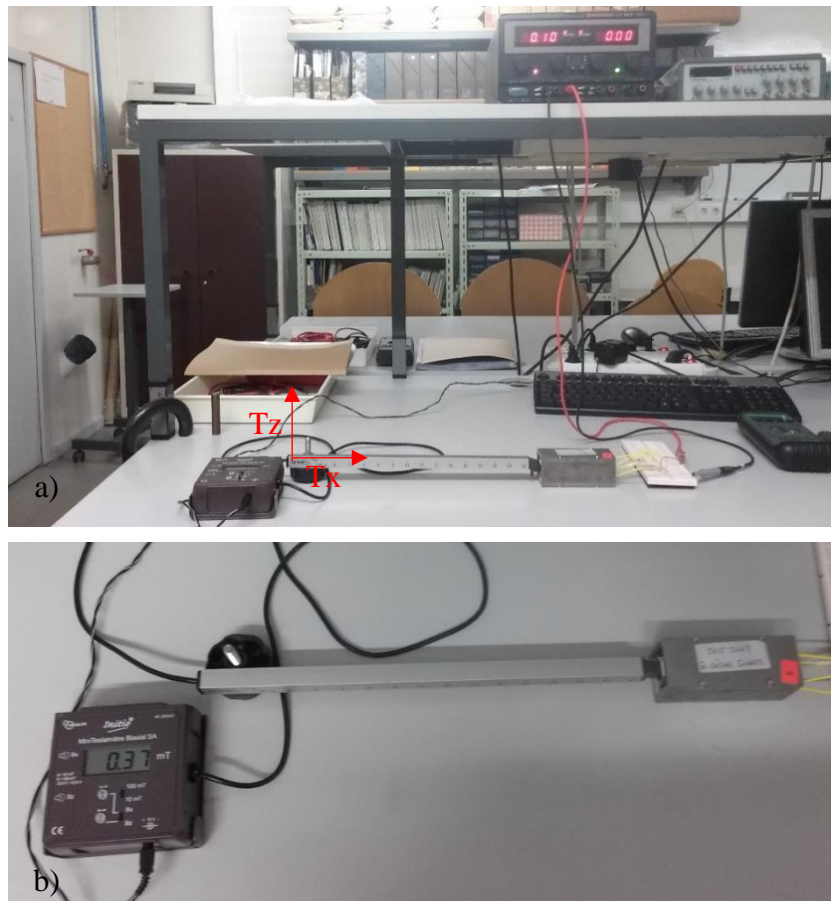


Figura 5.3 – Setup de medição de densidade de campo magnético (B)

Tabela 5.2 – Valores de B para cada alimentado independentemente

I (A)	Bobina (1)		Bobina (2)	
	Tbx (mT)	Tbz(mT)	Tbx (mT)	Tbz(mT)
0	-0,09	0,5	-0,08	0,48
0,25	0,09	0,87	-0,25	0,67
0,5	0,3	1,42	-0,42	0,88
1	0,71	3,39	-0,73	1,55
1,5	1,25	5,86	-1	2,65

Tabela 5.3 – Valores obtidos alimentando as duas bobinas em série

I (A)	Bobina (1)+(2) série		Núcleo magnetizado	
	Tbx (mT)	Tbz(mT)	Tbz(mT)↓	Tbz(mT)↑
0			0,48	0,6
0,1	0,03	0,77	1,7	2,61
0,2	-0,16	2,76	3,87	5,17
0,3	-0,49	5,5	6,06	7,62
0,4	-0,75	8,31	8,56	10,34
0,5	-1	10,83	11,23	13,01
0,6	-1,25	13,3	13,64	15,5
0,7	-1,55	16,5	16,15	18,2
0,8	-1,86	18,29	18,9	20,2
0,9	-2,15	22,7	21,6	22,4
1	-2,3	25,2	24,3	

Foi também aumentada a corrente no sentido crescente e seguidamente decrescente sem realizar a desmagnetização remanescente do núcleo (Tabela 5.3 núcleo magnetizado). Pode observar-se uma maior densidade de fluxo para esta situação e nota-se uma histerese nos valores da densidade do fluxo, característica dos materiais ferromagnéticos (Figura 5.4).

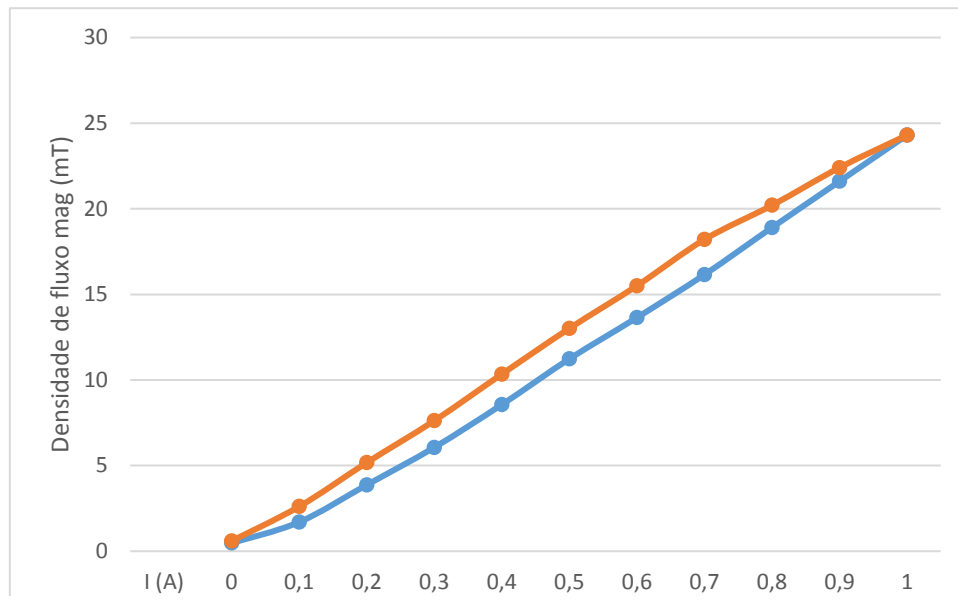


Figura 5.4 – Representação gráfica da Corrente vs. Densidade de fluxo

5.1.2 Transdutor potenciométrico

Após a programação da interface notou-se um elevado ruído na saída do transdutor potenciométrico quando o *DAQ* enviava uma tensão de controlo para a *Wonderbox*. Usou-se um osciloscópio para determinar a frequência do sinal ($f=39,74$ kHz) e a tensão pico a pico ($V_{p-p} = 331$ mV) (Figura 5.5).

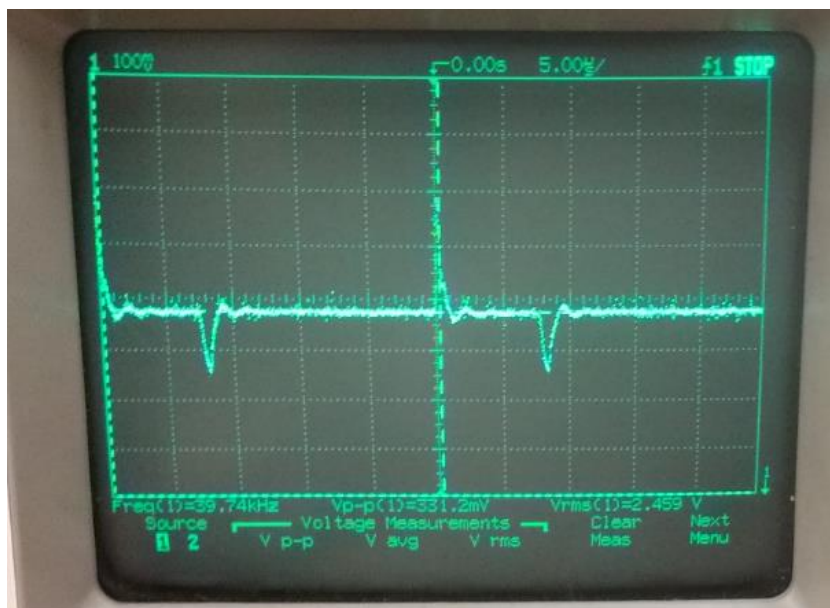


Figura 5.5 – Amplitude do sinal do transdutor

Foi então necessário dimensionar e aplicar um filtro ao sinal de forma a limpar o sinal antes da sua aquisição. Como o sinal não devia apresentar qualquer tipo de ruído e como este tem uma frequência muito elevada, decidiu-se utilizar um filtro passa baixo (Figura 5.6) de forma a eliminar este ruído de alta frequência.

Sendo o objetivo utilizar componentes passivos, optou-se pela montagem representada na Figura 5.6.

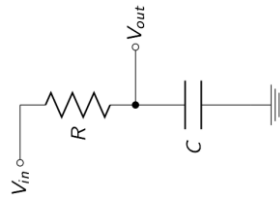


Figura 5.6 – Esquema de um filtro passa-baixo.

A combinação de resistência (R) e condensador (C) dá a constante de tempo ($\tau = RC$) do filtro, a frequência de corte é determinada através da constante de tempo da seguinte forma:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} \text{ (Hz)} \quad (5.1)$$

Para o caso em estudo a frequência de corte escolhida foi de 100Hz, obtendo-se um valor para R de 1,6 k Ω e para C de 1 μ F e com a ajuda de uma *web tool* [53] foi possível obter o diagrama de Bode (Figura 5.7).

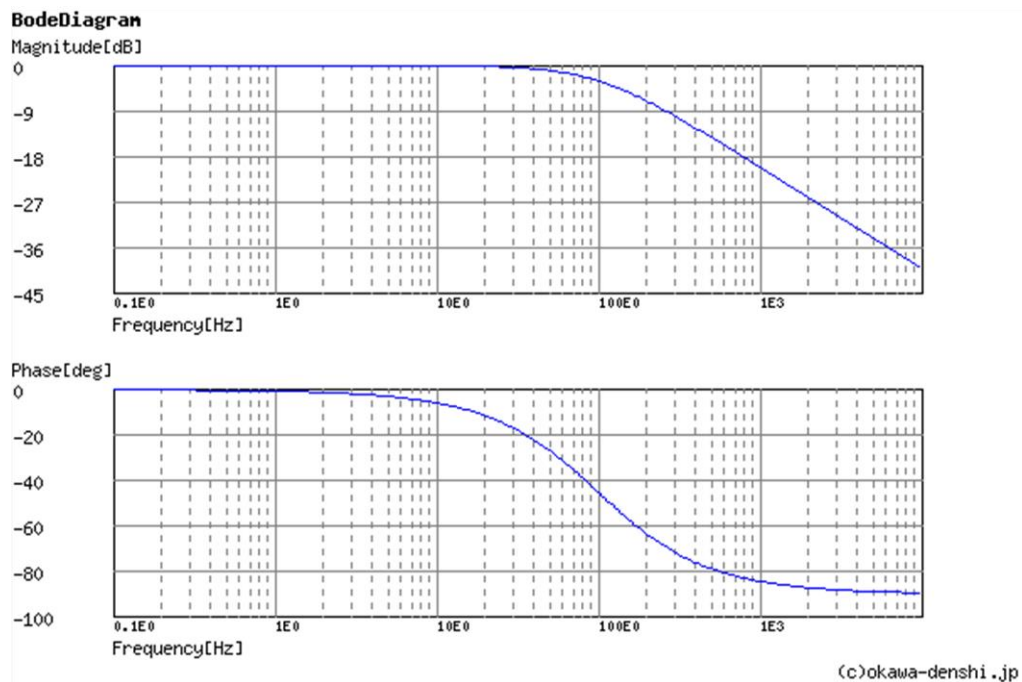


Figura 5.7 – Diagrama de Bode do filtro

Como se pode observar a fase para baixas frequências é próxima de 0° . À volta da frequência de corte esta passa para 45° e para as altas frequências tende para 90° .

Após a aplicação do filtro a tensão pico a pico do sinal do transdutor baixou de 331mV para 50mV.

5.2 Testes ao sistema

Para a realização dos testes foi usado o robô ABB IRB2400/16 de estrutura em série e com uma capacidade de carga de 16 kg, disponível no Laboratório de Robótica do DEMec. Optou-se por utilizar o robô para testar o sistema devido à sua capacidade de imprimir velocidades constantes, aquando do movimento ao longo do curso do seu grau de liberdade. Algo que manualmente se tornaria difícil de concretizar e quantificar.

Realizaram-se 3 tipos de experiências, com a mesma metodologia, de forma a testar os diferentes aspetos do sistema. Na primeira experiência pretendeu-se testar a capacidade de força do sistema, variando a corrente em 3 níveis, numa gama de 0 a 0,6A e usando em cada nível de corrente 2 velocidades distintas. Seguidamente procurou-se testar a resposta do sistema à implementação de uma parede virtual, a uma distância de 60mm do início do deslocamento - esta parede virtual poderá ser considerada uma perturbação em degrau quando o sistema atinge a posição de 60mm. O objetivo da terceira experiência foi testar o controlo automático de força. Para tal, foi necessário proceder ao ajuste do controlador PI através do método de Ziegler – Nichols. Posteriormente realizaram-se os ensaios com 2 referências de força e 3 velocidades para cada referência.

O *setup* usado para a execução dos testes pode ser observado Figura 5.8.

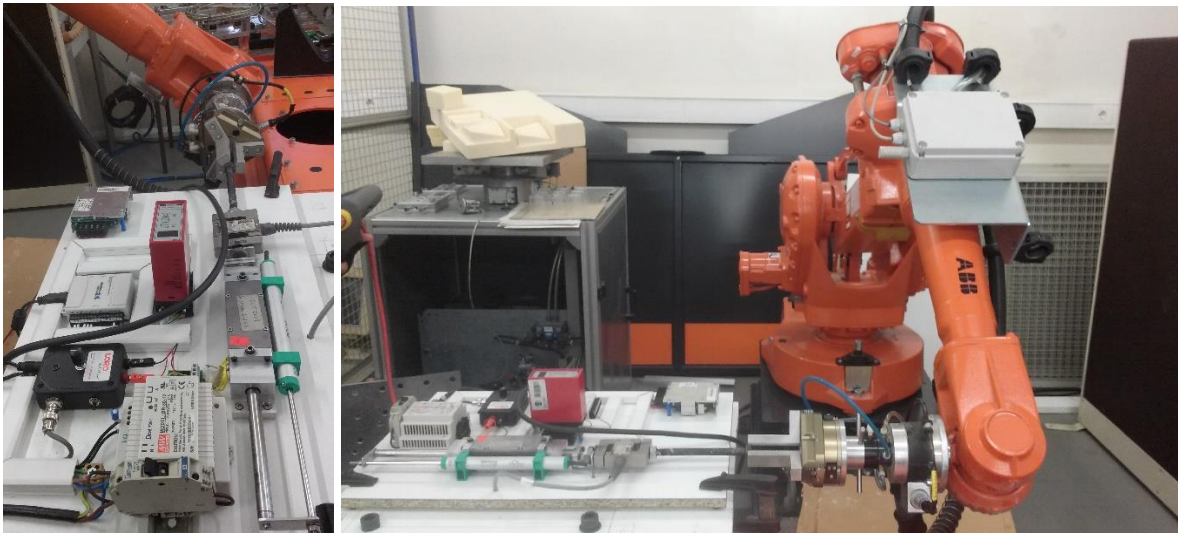


Figura 5.8 – *Setup* de testes com o robô ABB

Para cada experiência serão apresentados os dados obtidos para o nível de corrente mínimo e máximo.

5.2.1 Experiência 1 - Força do sistema

Para o sistema em *off-state* e uma velocidade de atuação de 15 mm/s obtém-se a representação da Figura 5.9. Pode-se observar uma força de 30N no início do movimento estabilizando para os 20 N. Este valor pode dever-se à presença do cabo da célula de carga ou algum desalinhamento do robô com a haste do atuador. No movimento inverso repara-se o contrário no fim do movimento a força volta a aumentar. Pode observar-se também que apesar do movimento ter terminado a célula de carga encontra-se à tração, este fenómeno acontece devido a efeitos de *stick-slip* provocados pelos vedantes e cintas de guiamento. Este problema será recorrente ao longo dos testes.

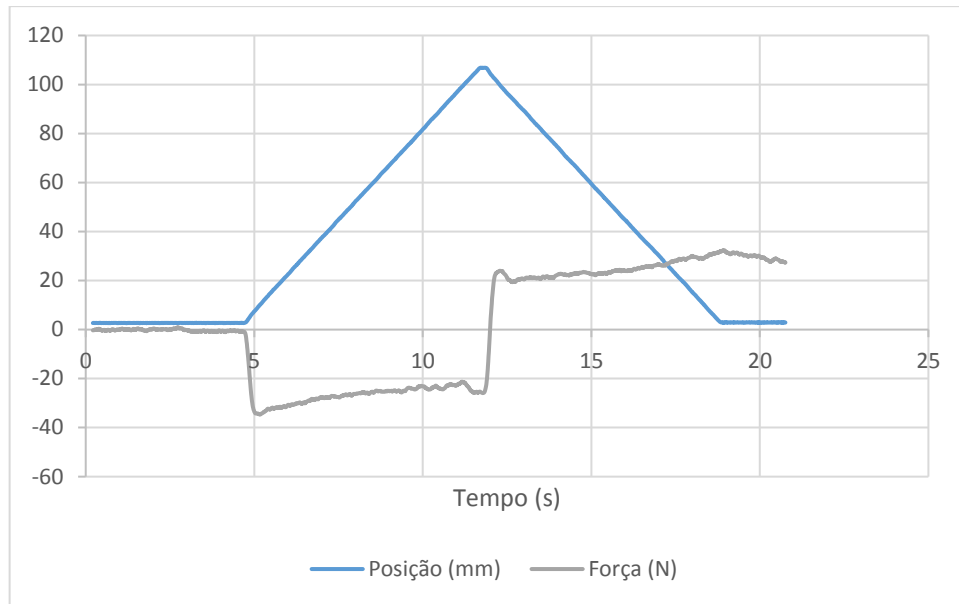


Figura 5.9 – Representação gráfica experiência 1; $I_{\min}= 0A$; $V= 15 \text{ mm/s}$

Seguidamente apresenta-se o sistema com a corrente máxima de 0,60 A e uma velocidade de 50 mm/s (Figura 5.10).

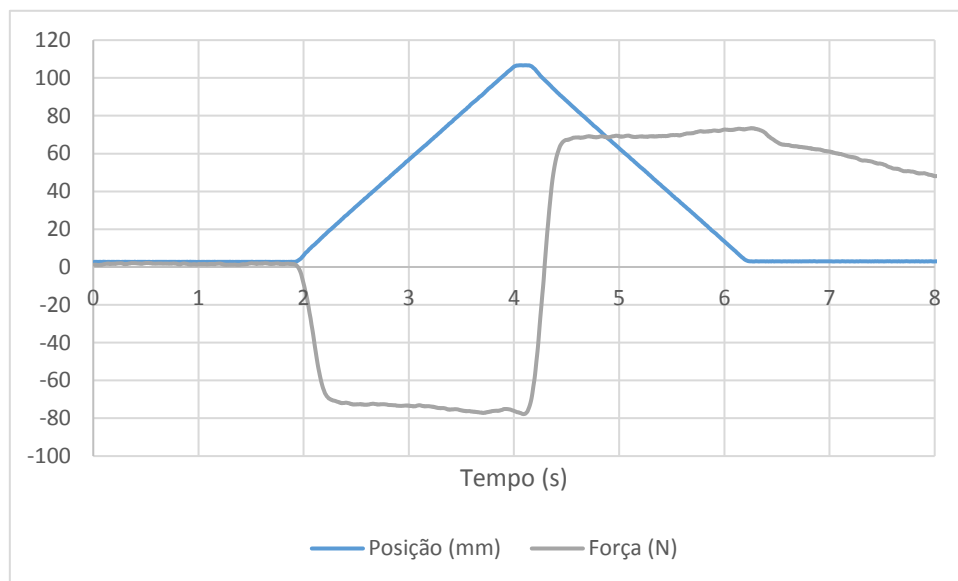


Figura 5.10 – Representação gráfica experiência 1; $I= 0,60A$; $V= 50 \text{ mm/s}$

Como mencionado anteriormente o efeito de *stick-slip* mantém-se, a força máxima obtida ronda os 75N apresentando-se estável ao longo do deslocamento.

5.2.2 Experiência 2 - Parede virtual

Para a introdução de uma parede virtual, manteve-se o mesmo método de ensaio (Figura 5.11). Neste caso não será necessário usar uma corrente nula, visto que esta não iria diferir do caso anterior. Serão apresentados os resultados para a corrente máxima, mas a diferentes velocidades de atuação. Na Figura 5.12 e Figura 5.13 testa-se além da introdução da parede virtual a opção de desligar o atuador quando este inverte o sentido.

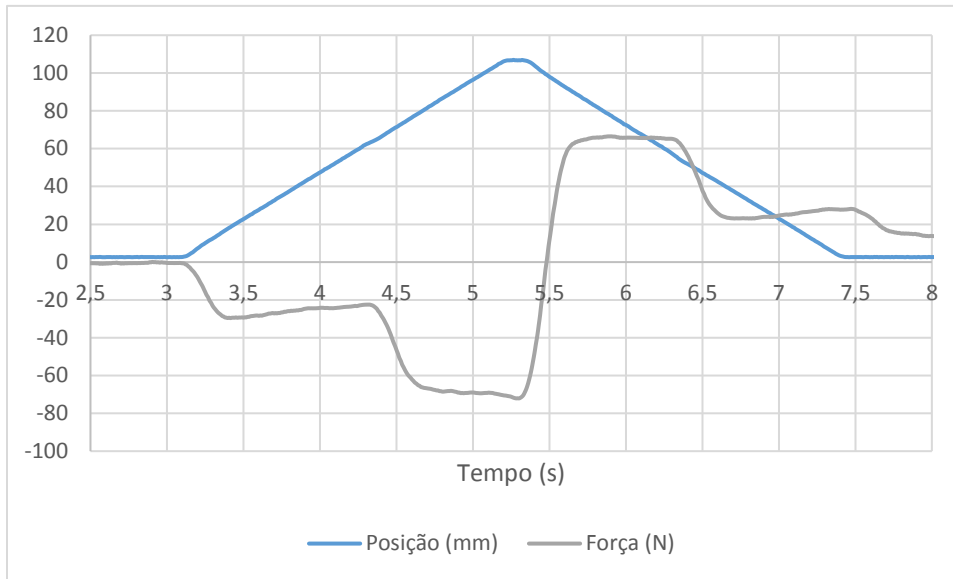


Figura 5.11 – Representação gráfica experiência 2; $x=60\text{mm}$; $I=0,60\text{A}$; $V=50\text{ mm/s}$

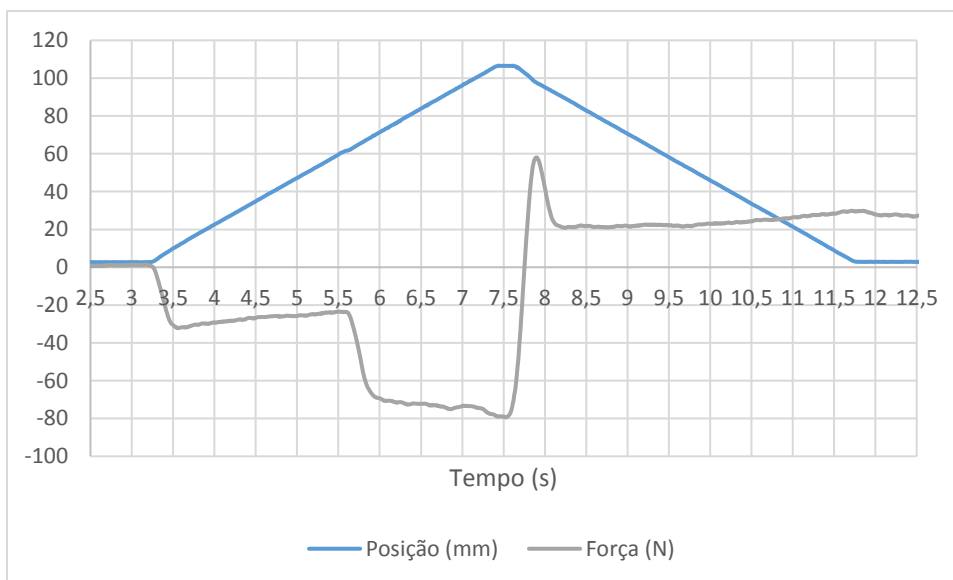


Figura 5.12 – Representação gráfica experiência 2; $x=60\text{mm}$; $I=0,60\text{A}$; $v=25\text{ mm/s}$; botão de *recoil* on

Na Figura 5.12 e Figura 5.13, além da introdução da parede virtual a 60 mm, testa-se a opção de desligar o atuador quando a célula de carga apresenta um esforço de tração, mesmo que a posição do atuador se encontre “dentro” da parede virtual. O sistema apresentou aproximadamente o mesmo tempo de resposta para o degrau de *on-state* como *off-state*.

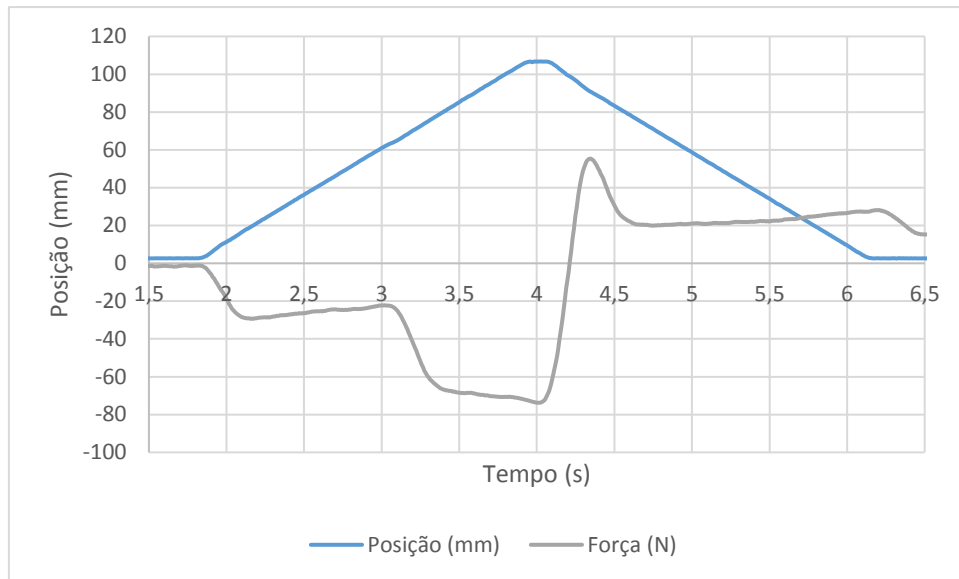


Figura 5.13 – Representação gráfica experiência 2; $x = 60\text{mm}$; $I = 0,60\text{A}$; $v = 50\text{ mm/s}$; botão de *recoil* on

5.2.3 Experiência 3 - Controlo automático de força

O ajuste do controlador PI foi efetuado usando o segundo método de Ziegler–Nichols para sistemas em malha fechada. Para executar esta tarefa, colocaram-se os parâmetros, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, aumentando-se K_p desde 0 até atingir K_{cr} , ganho último do sistema, no qual este responde com uma oscilação constante. Nesse momento é medido o período de oscilação T_{cr} e na Tabela 5.4 são apresentados os ganhos a aplicar ao controlador PID final.

Tabela 5.4 – Valores de ajuste do segundo método de Ziegler Nichols[54]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$1/1,2 T_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 T_{cr}$	$0,125 T_{cr}$

Tendo-se obtido um $K_{cr} = 0,019$ e $T_{cr} = 0,05$, para um controlador PI obtém-se $K_p = 0,00855$ e $T_i = 0,041$ e $T_d = 0$. Usando estes valores, realizaram-se os ensaios com 2 referências de força e 3 velocidades para cada valor de força. Apresentando-se apenas o ensaio para a referência de $F = 40\text{ N}$ e uma velocidade $v = 15\text{ mm/s}$ (Figura 5.14). O objetivo é controlar automaticamente a corrente injetada nas bobinas. Com a habitual representação gráfica da força e deslocamento será também incluída a representação da corrente ao longo do tempo do ensaio. Na Figura 5.15 apresenta-se a relação Força vs. Posição ao longo do ensaio.

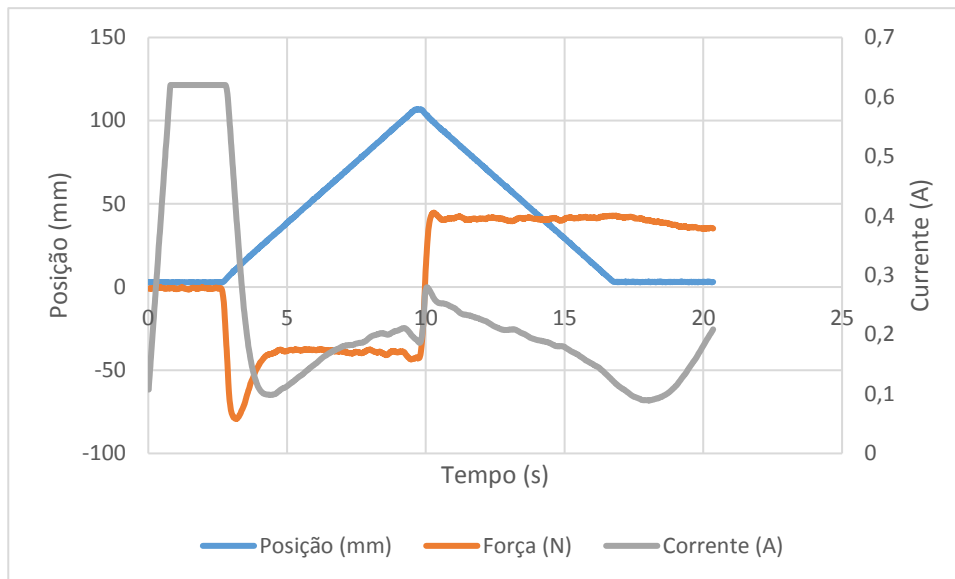


Figura 5.14 – Representação gráfica experiência 3; $F= 40N$; $v= 15 \text{ mm/s}$

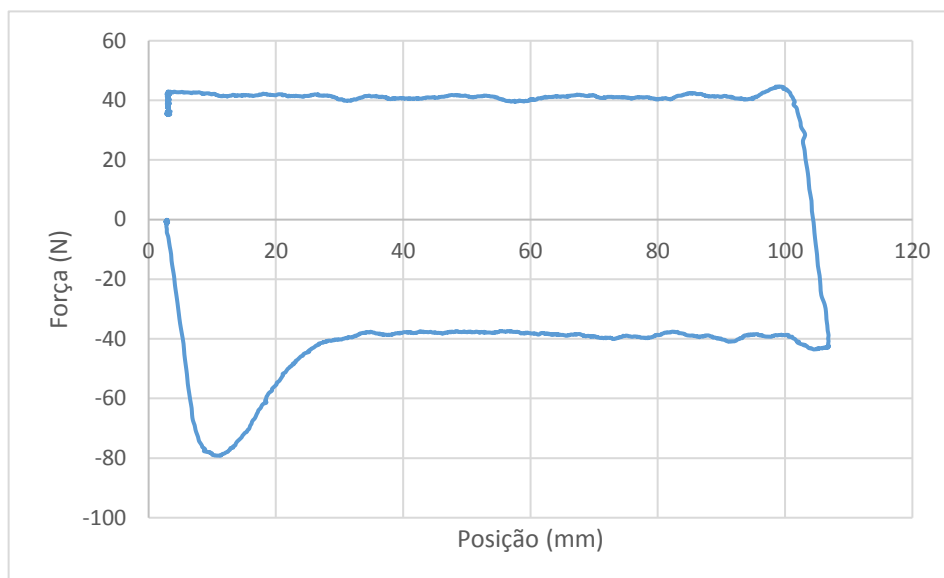


Figura 5.15 – Representação gráfica experiência 3; $F= 40N$; $v= 15 \text{ mm/s}$

Os valores de *overshoot* apresentados ao longo da experiência mantêm-se aproximadamente constantes para todos os ensaios.

5.3 Discussão de resultados

Um dos fenômenos recorrente em todos os gráficos é a força remanescente no final de cada ensaio devida ao efeito de *stick-slip* como já tinha sido evidenciado. A sua resolução poderia passar por melhorar a ligação ao robô ou diminuir as forças de atrito de Coulomb. Este efeito não se aplica no caso de ser o utilizador a atuar o dispositivo, visto este largar o sistema quando o movimento termina, ao contrário do robô que apresenta uma ligação fixa com a haste do dispositivo e coloca a célula de carga sob um esforço de tração.

O sistema apresenta uma força mínima 25 N correspondente às forças de atrito de Coulomb, permitindo controlar uma força adicional de 50N.

Para a experiência 2 e a introdução de uma referência em degrau, o sistema apresentou um tempo de resposta abaixo dos 400ms. Este valor considerou-se aceitável para os testes iniciais ao dispositivo (comparado com ser humano, que tem um tempo de reação de 100 a 400ms [30]), com o sistema a funcionar a 100Hz (frequência de aquisição a 1kHz e tempo de ciclo de 10 ms).

Na experiência 3, o controlo de força apresenta um *overshoot* inicial elevado. Outros valores dos parâmetros do controlador foram introduzidos, mas aumentavam o *settling time* optando-se pelo *overshoot* inicial em relação a uma oscilação amortecida em torno da referência. Este *overshoot* inicial dá-se devido ao sistema ter uma referência nula de força, o que por sua vez coloca o valor da corrente à saída do controlador no valor máximo, como se pode observar nas representações gráficas da experiência 3. Pode observar-se que o controlador aplicado, após decorrido o *settling time* cumpre a referência com um erro quase nulo.

Com a realização destes ensaios, foi possível perceber que será necessário mais desenvolvimento a nível do dispositivo, para minimizar as forças de atrito de Coulomb, nomeadamente ao nível da haste, sistema de vedação e guiamento.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões

Neste trabalho procedeu-se ao projeto e desenvolvimento de um dispositivo de *feedback* de força usando fluidos magneto-reológicos, tendo sido uma experiência extremamente rica pois permitiu a realização de uma pesquisa científica extensa, integrar conhecimentos ministrados ao longo do curso (eletrónica, mecânica, controlo, materiais, etc), experimentar materiais inteligentes e obter experiência a projetar, construir e testar um dispositivo.

Atualmente ainda não estão disponíveis no mercado dispositivos deste tipo para aplicações hápticas, embora existam já diversos sistemas semelhantes que serviram de base a este trabalho. No processo de desenvolvimento foi necessário utilizar métodos analíticos e computacionais, nomeadamente programas CAD (*Solidworks*) e análise em elementos finitos para sistemas magnéticos (*ANSYS Maxwell*). Estes vieram possibilitar a iteração de soluções e a análise dos fenómenos que de outra forma seria difícil, permitindo otimizar o projeto final.

Após a fase de investigação e projeto, foi necessária a aquisição de componentes para a realização do protótipo, tendo o fabrico mecânico sido efetuado pelas oficinas do DEMec. Seguidamente foi montado o protótipo e integrados um transdutor de força e outro de deslocamento associados à haste do atuador. Foi ainda necessário adicionar fontes de alimentação, o módulo de condicionamento de sinal e proteções elétricas. Desenvolveu-se ainda uma interface em *LabVIEW* por forma a permitir o controlo das propriedades reológicas e a seleção do modo de operação do dispositivo.

Por fim, com o sistema montado e implementado, foram realizados alguns testes por forma a validar o funcionamento do dispositivo, tendo servido a interface em *LabVIEW* de meio de interação e de obtenção de resultados. Obteve-se uma força máxima controlável na gama 25 a 80 N, com um curso útil de 105 mm.

Desta forma, pode dizer-se que os objetivos propostos para esta dissertação foram ultrapassados, tendo o protótipo um custo de aproximadamente €3000.

6.2 Trabalho Futuro

Tendo em conta o desempenho do dispositivo, o principal objetivo em relação a trabalhos futuros deveria ser minimizar os atritos de Coulomb, dado que atualmente originam uma força mínima de 25N.

Para este fim sugere-se a nível mecânico:

- redesenhar as tampas e sistema de vedação e guiamento, minimizando o atrito aplicado por estes componentes;
- fabricar uma nova haste com superfície retificada, por forma a minimizar atritos com o sistema de vedação e guiamento.

Seria também importante:

- substituir a atual célula de carga (com uma gama de medição de 2000N) por outra com valor mais próximo das necessidades do protótipo (100N);
- fabricar os novos componentes necessários à criação de um campo magnético serpenteante, aumentando assim a capacidade de força disponibilizada;
- estender o atual protótipo a vários graus de liberdade;
- melhorar a interface gráfica, de modo a torná-la mais intuitiva;
- otimizar o código de controlo do sistema, de modo a minimizar o tempo de ciclo ou implementar um controlo em tempo real;
- preparar a aplicação para possibilitar o controlo remoto de um sistema.

Referências

- [1] J. Blake and H. B. Gurocak, “Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 14, no. 5, pp. 606–615, Oct. 2009.
- [2] M. a. Srinivasan, “What is Haptics ?,” *Lab. Hum. Mach. Haptics Touch Lab*, pp. 1–11, 1995.
- [3] “Geomagic Sculpt - Antonius Köster GmbH & Co. KG.” [Online]. Available: <http://www.innovative-cad-cam-solutions.de/en/portfolio-item/geomagic-sculpt/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [4] “Rehabilitation Robots | Autonomous Systems and Robotics Research Centre | School of Computing, Science & Engineering | University of Salford, Manchester.” [Online]. Available: <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/autonomous-systems-and-robotics/rehabilitation-robots>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [5] “Cutting edge haptic research using the Geomagic Touch | Inition.” [Online]. Available: <https://www.inition.co.uk/haptic-research-geomagic-touch/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [6] “MIT Touch Lab.” [Online]. Available: <http://touchlab.mit.edu/oldresearch/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [7] “Haptic Touch Feedback.” [Online]. Available: <http://www.esterline.com/interfacetechologies/Technologies/TouchScreens/HapticTouch.aspx>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [8] “CyberGlove Systems LLC.” [Online]. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/>. [Accessed: 24-May-2015].
- [9] “Apple apresentou o 3D Touch: Sabe o que é?” [Online]. Available: <https://pplware.sapo.pt/gadgets/iphone/apple-apresentou-o-3d-touch-sabe-o-que-e/>.
- [10] “Tanvas.” [Online]. Available: <https://tanvas.co/>. [Accessed: 08-Mar-2016].
- [11] “TPad Tablet Project.” [Online]. Available: <http://tpadtablet.org/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [12] “3D Systems Geomagic.” [Online]. Available: <http://www.geomagic.com/en/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [13] M. Kciuk and R. Turczyn, “Properties and Application of Magnetorheological Fluids,” *J. Achiev. Mater. ...*, vol. 18, no. 1, pp. 127–130, 2006.
- [14] “Brownian motion | physics | Britannica.com.” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/Brownian-motion>. [Accessed: 10-Aug-2016].
- [15] “Bingham plastic.” [Online]. Available: http://america.pink/bingham-plastic_670218.html. [Accessed: 25-Jul-2016].
- [16] “Herschel-Bulkley Flows.” [Online]. Available:

<http://wwwf.imperial.ac.uk/~rvcras/herschel.html>.

- [17] H. Hirani, “Magneto-Rheological (MR) Fluids.”
- [18] F. Filisko and F. Filisko, “Electrorheological Materials,” in *Encyclopedia of Smart Materials*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [19] K. Zhang and H. Choi, “Smart Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites and Their Electrorheological Response,” *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 5, pp. 3399–3414, Apr. 2014.
- [20] “Method and means for translating electrical impulses into mechanical force,” 1942.
- [21] G. Yang, B. F. Spencer, J. D. Carlson, and M. K. Sain, “Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations,” *Eng. Struct.*, vol. 24, pp. 309–323, 2002.
- [22] N. Caterino, “Semi-active control of a wind turbine via magnetorheological dampers,” *J. Sound Vib.*, vol. 345, pp. 1–17, Jun. 2015.
- [23] “Magneride v2.” [Online]. Available: <http://hotrodsandguns.net/wp-content/uploads/2015/03/file-page1-1024x768.jpg>.
- [24] “MagneShocks.” [Online]. Available: <http://magneshocks.com/index.htm>.
- [25] J. Kozłowska and M. Leonowicz, “Processing and Properties of Magnetorheological Fluids for Prospective Application in a Passive Armour,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 8, pp. 4721–4724, Aug. 2013.
- [26] “MRF polishing: How it works.” [Online]. Available: <https://qedmrf.com/en/mrfpolishing/mrf-technology/how-it-works>. [Accessed: 26-Aug-2016].
- [27] T. D. C. Thanh and K. K. Ahn, “Intelligent phase plane switching control of pneumatic artificial muscle manipulators with magneto-rheological brake,” *Mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 85–95, Mar. 2006.
- [28] “LORD MR Products.” [Online]. Available: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>. [Accessed: 26-Aug-2016].
- [29] G. Magnac, C. Benoit, and F. Claeysen, “Miniature Magneto Rheological Fluid Actuator for High Force Locking and Damping Application,” *Actuator*, pp. 1–4, 2010.
- [30] J. Z. Chen and W. H. Liao, “Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 3, p. 35029, Mar. 2010.
- [31] “MagneRide.” [Online]. Available: [http://www.magneride.com/DENALI WEBSITE/DENALI home page.html](http://www.magneride.com/DENALIWEBSITE/DENALI%20home%20page.html).
- [32] “RD-8058-1 TFD Device 12 Nm.” [Online]. Available: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/12-nm-tfd-device>. [Accessed: 26-Aug-2016].
- [33] “RD-8191 TFD Device - Cross Drilled Shaft 5 Nm.” [Online]. Available: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/rd-8191-5-nm-tfd-device-cross-drilled-shaft>. [Accessed: 26-Aug-2016].
- [34] D. Senkal and H. Gurocak, “Compact MR-brake with serpentine flux path for haptics applications,” in *World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2009, no. Figure 1, pp. 91–96.
- [35] F. Ahmadkhanlou, G. N. Washington, S. Bechtel, V. Utkin, and G. Rizzoni, “Design ,

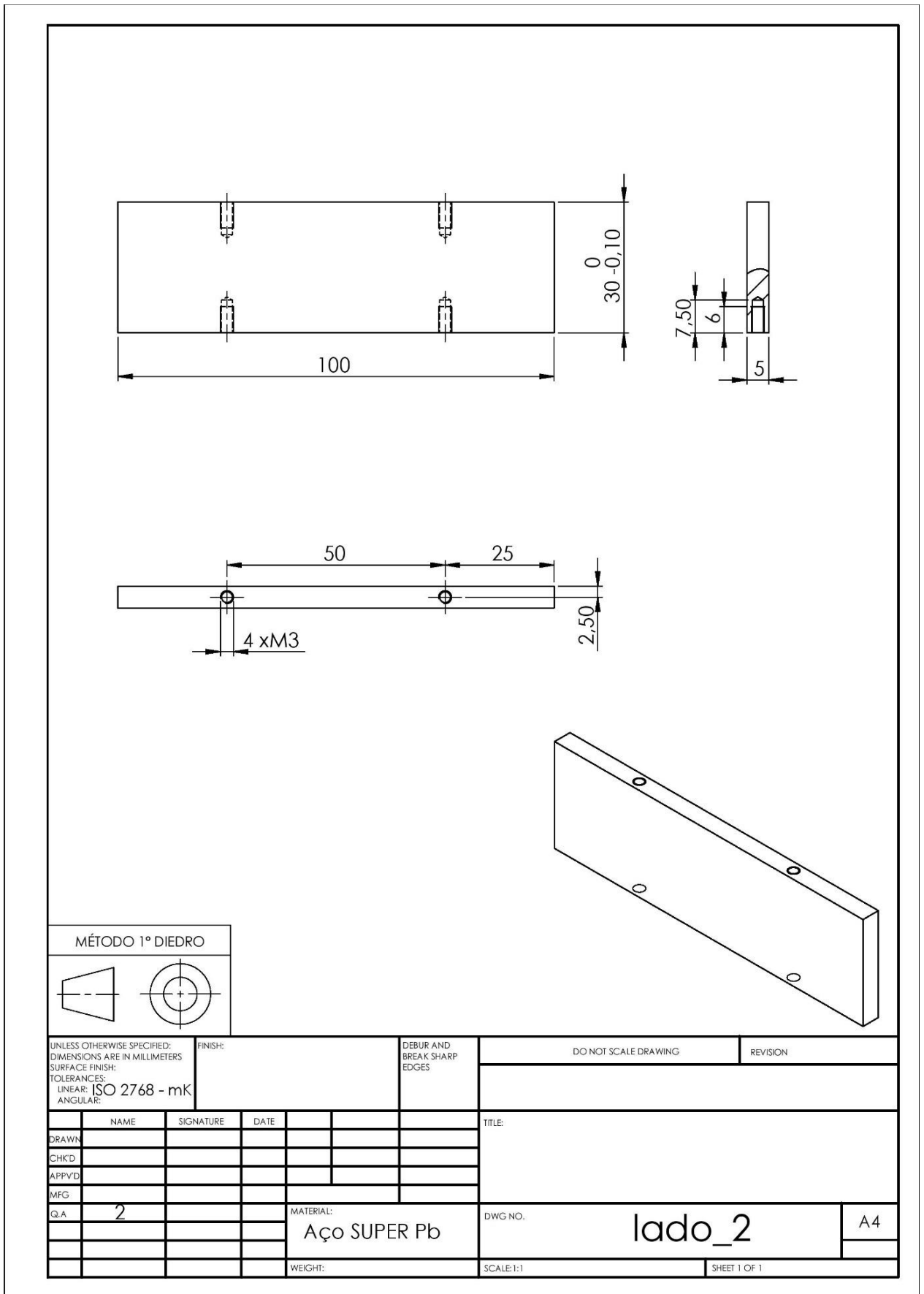
- Modeling and Control of Magnetorheological Fluid-Based Force Feedback Dampers for Telerobotic Systems,” 2008.
- [36] J.-S. Oh, S.-H. Choi, and S.-B. Choi, “Control of repulsive force in a virtual environment using an electrorheological haptic master for a surgical robot application,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 1, p. 15010, Jan. 2014.
- [37] D. Senkal and H. Gurocak, “Haptic joystick with hybrid actuator using air muscles and spherical MR-brake,” *Mechatronics*, vol. 21, no. 6, pp. 951–960, Sep. 2011.
- [38] T.-H. Yang, J.-H. Koo, S.-Y. Kim, K.-U. Kyung, and D.-S. Kwon, “Application of magnetorheological fluids for a miniature haptic button: Experimental evaluation,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 9, pp. 1025–1031, Jun. 2012.
- [39] M. S. Alkan, H. Gurocak, and B. Gonenc, “Linear magnetorheological brake with serpentine flux path as a high force and low off-state friction actuator for haptics,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 14, pp. 1699–1713, Sep. 2013.
- [40] T. Tsujita, K. Sase, A. Konno, M. Nakayama, X. S. Chen, K. Abe, and M. Uchiyama, “Design and Evaluation of an Encountered-type Haptic Interface Using MR Fluid for Surgical Simulators,” *Adv. Robot.*, vol. 27, no. 7, pp. 525–540, 2013.
- [41] R. Rizzo, “A permanent-magnet exciter for magneto-rheological fluid-based haptic interfaces,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 4, pp. 1390–1401, 2013.
- [42] D. Carlson, B. Marjoram, J. Toscano, and D. Leroy, “Magneto-Rheological Technology and Applications,” *History*, p. 28, 2007.
- [43] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*, Second. Suffolk: Chapman and Hall, 1998.
- [44] F. T. ULABY, *Eletromagnetismo para Engenheiros*. BOOKMAN COMPANHIA ED, 2007.
- [45] “Magnetorheological fluid with carbonyl iron powder suppliers,price,buy Magnetorheological fluid with carbonyl iron powder on metal-dust.com.” [Online]. Available: <http://www.metal-dust.com/products/Magnetorheological-fluid-with-carbonyl-iron-powder/>. [Accessed: 25-Aug-2016].
- [46] “AISI 1010 Carbon Steel (UNS G10100).” [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6539>. [Accessed: 18-Jan-2016].
- [47] “Manual pr 2261.” [Online]. Available: http://www.prelectronics.com/filearkiv/PDF/2200series/2261/Manual/2261V101_UK.pdf. [Accessed: 03-Sep-2016].
- [48] “USB-6008 - National Instruments.” [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201986>.
- [49] “SuperPB.” [Online]. Available: http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-corte-fa-a-lcil/super-pb_.html. [Accessed: 25-Jul-2016].
- [50] “Turcon® Variseal® M2 - Trelleborg.” [Online]. Available: http://www.tss.trelleborg.com/global/en/products_2/hydraulicrodseals/detailpages_rodseals/turcon-variseal-m2.html.
- [51] “Turcite® Slydring®, Hydraulic Wear Ring - Trelleborg.” [Online]. Available: http://www.tss.trelleborg.com/global/en/products_2/hydraulicwearings/detailpages_hydraulic_wearings/turcite-slydring.html.
- [52] “Properties of Nomex ® 410 | DuPont™ Nomex ® Insulation | DuPont USA.” [Online]. Available: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical->

materials/electrical-insulation/brands/nomex-electrical-insulation/articles/nomex-410.html. [Accessed: 25-Aug-2016].

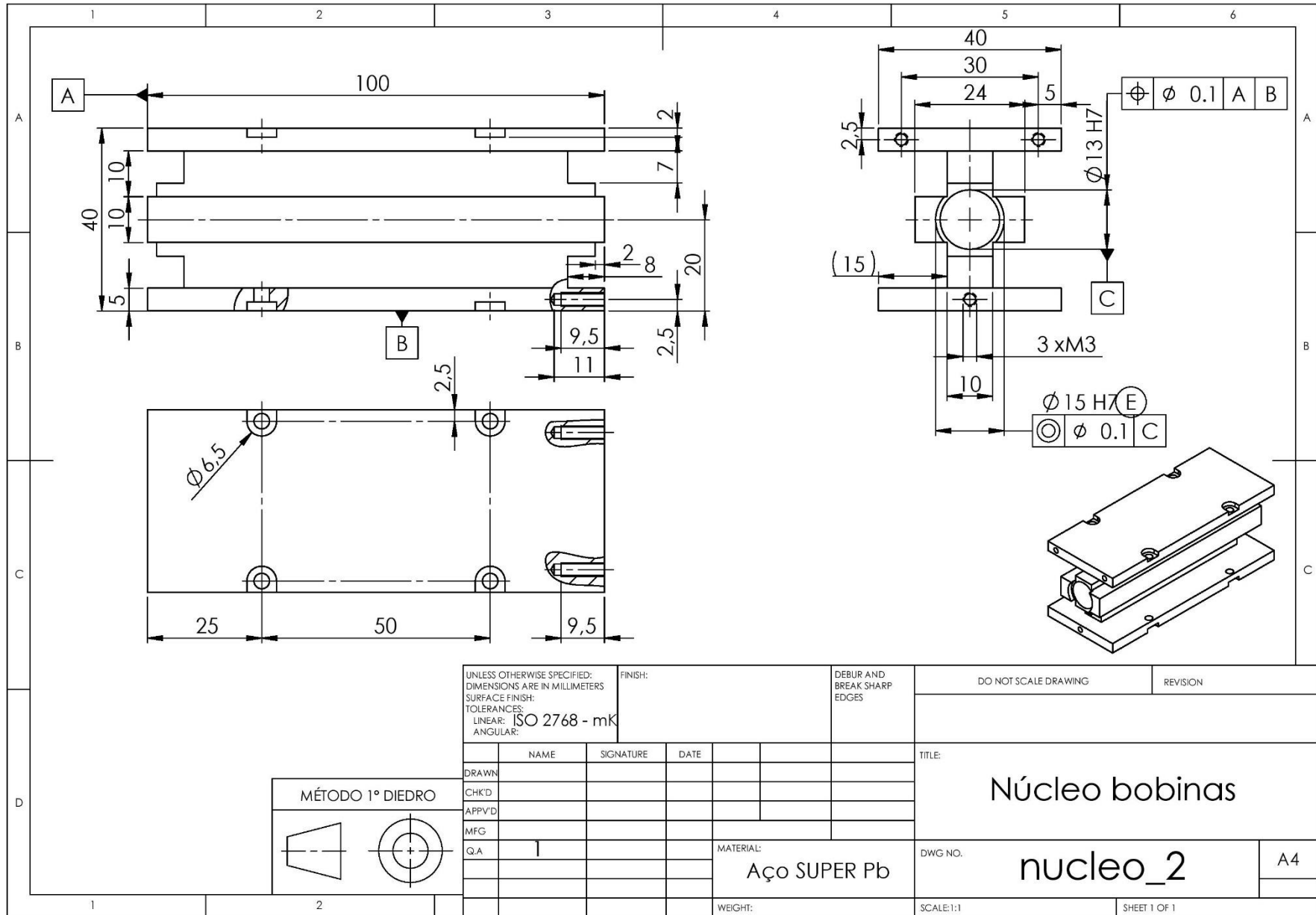
- [53] “RC Low-pass Filter Design tool - Result -.” [Online]. Available: <http://sim.okawadenshi.jp/en/CRtool.php>. [Accessed: 19-Apr-2016].
- [54] K. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice Hall, 1997.

ANEXO A: Desenhos de definição

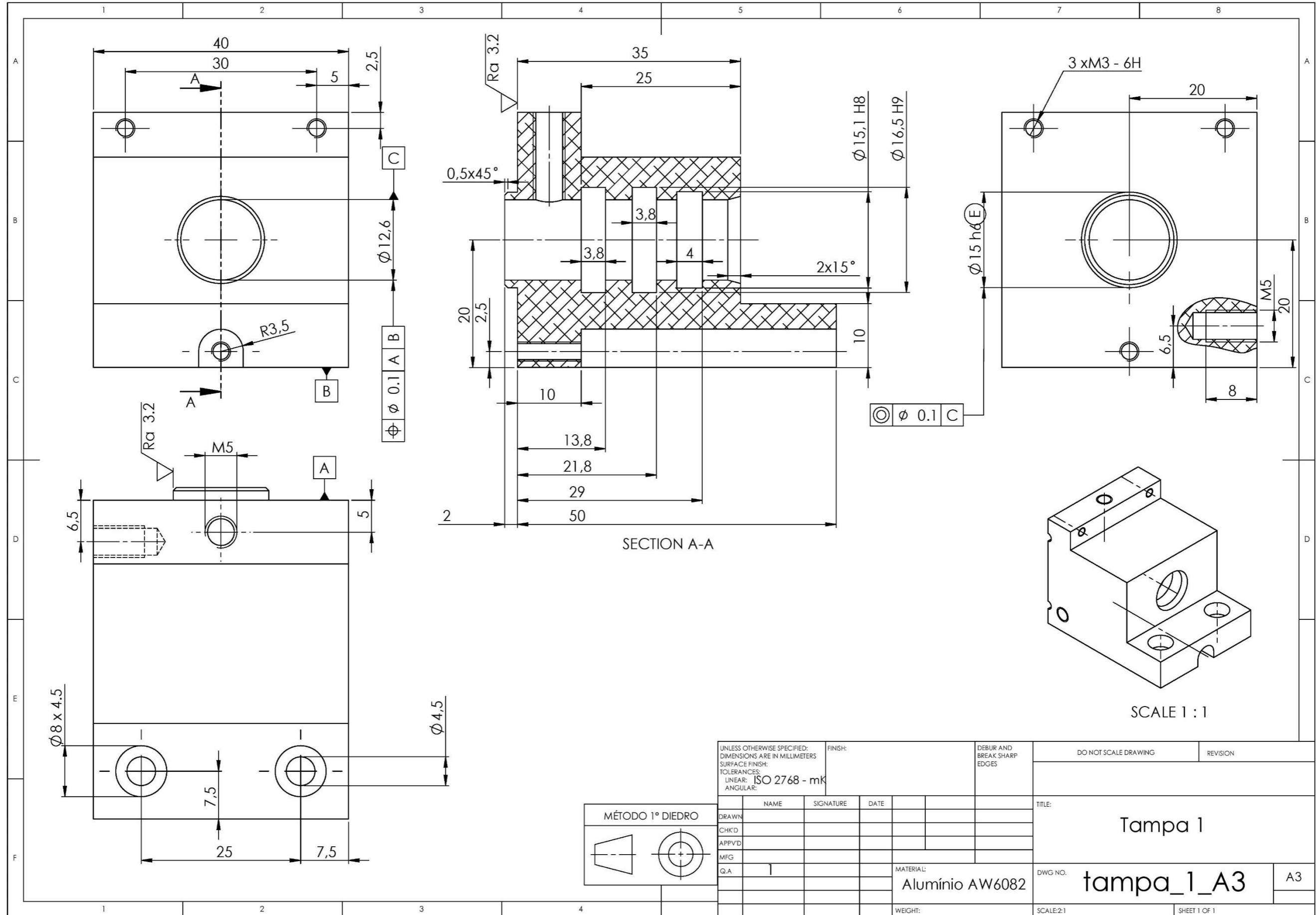
A2: Desenho técnico da tampa lateral

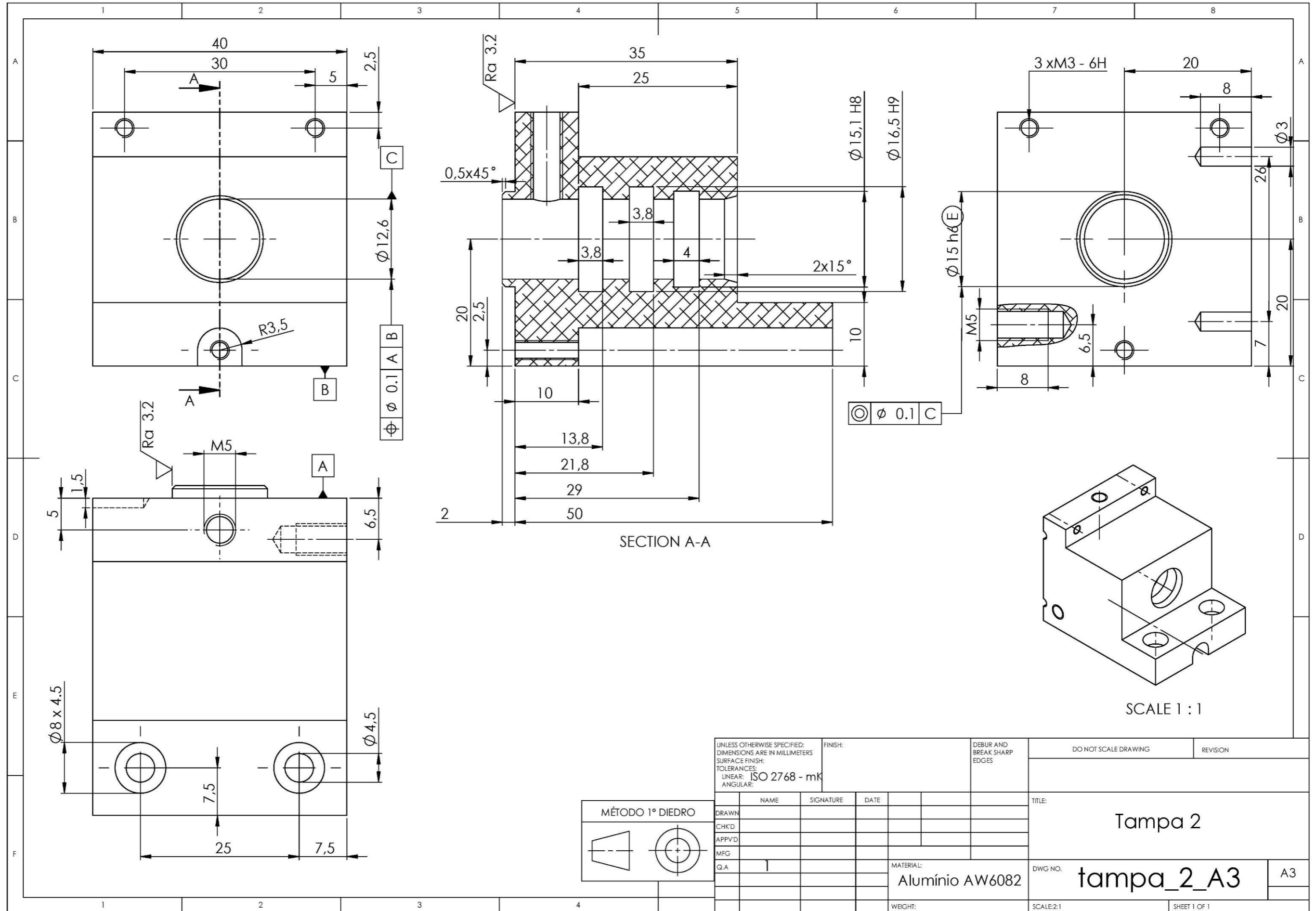


A3: Desenho técnico do núcleo

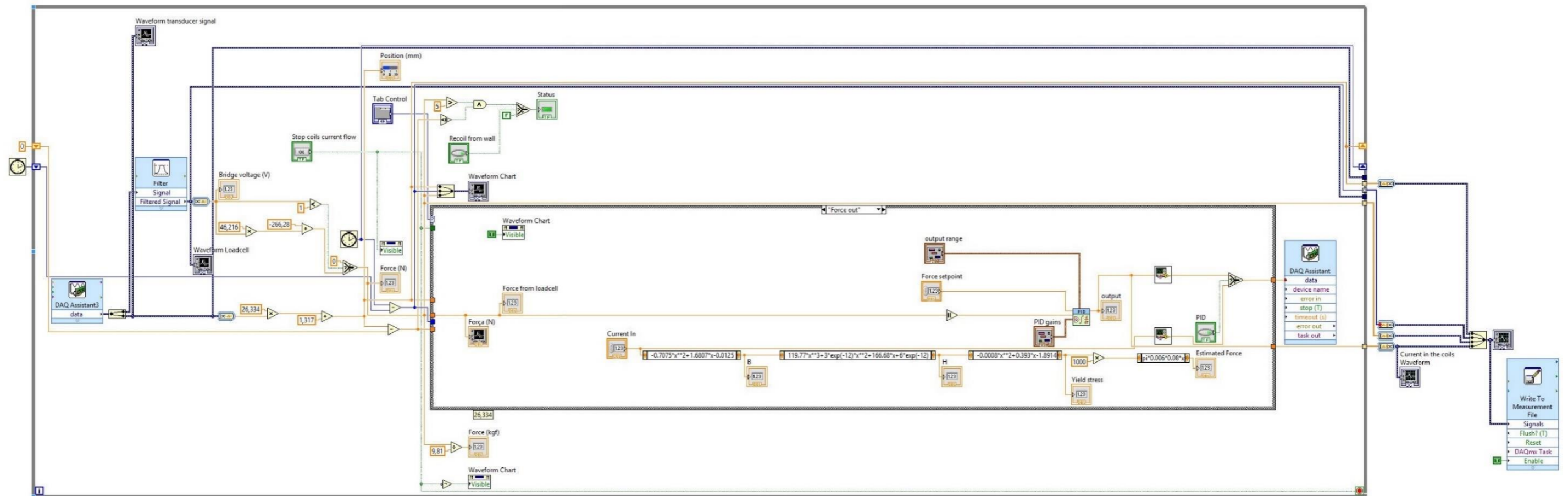


A4: Desenho técnico da tampa 1

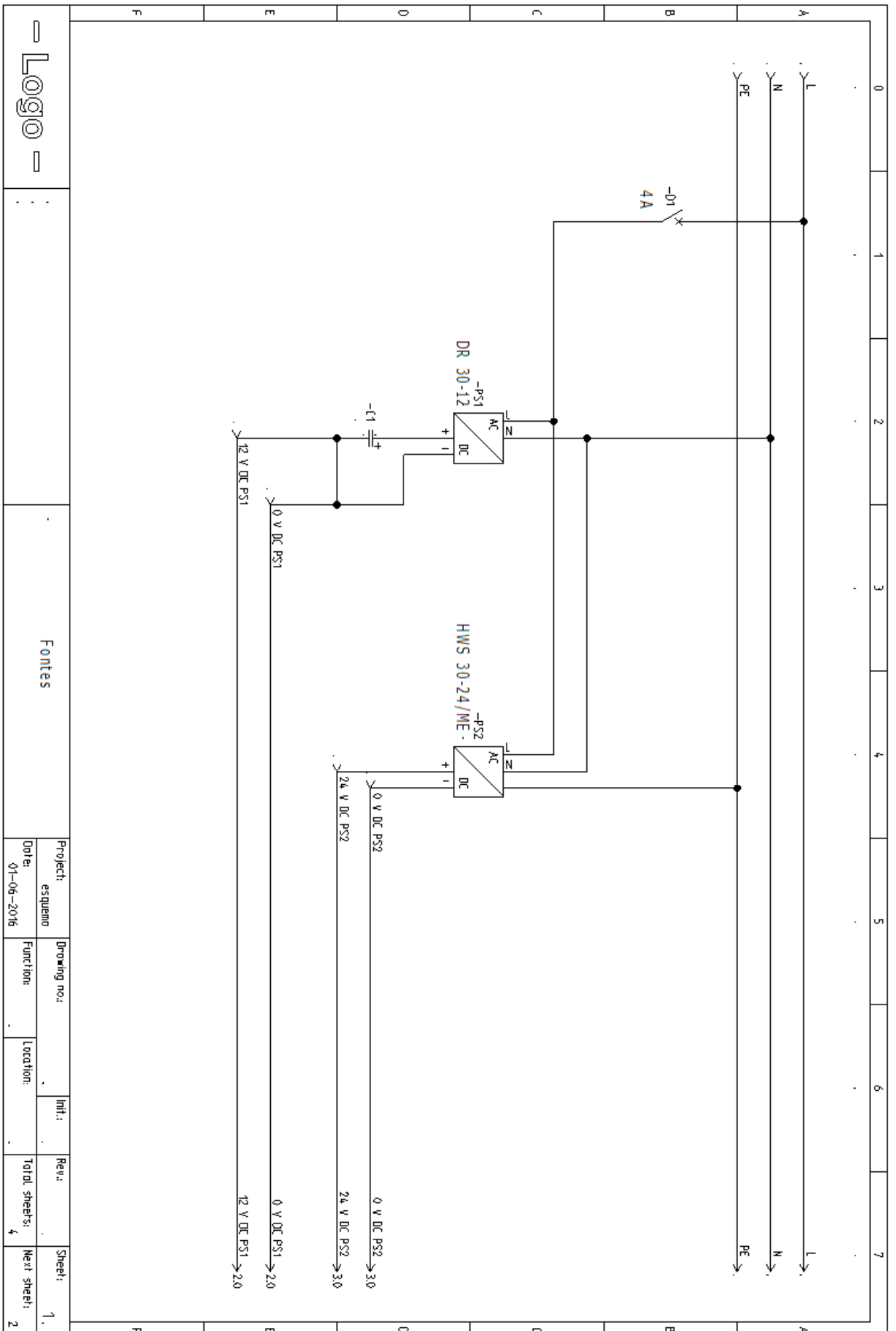


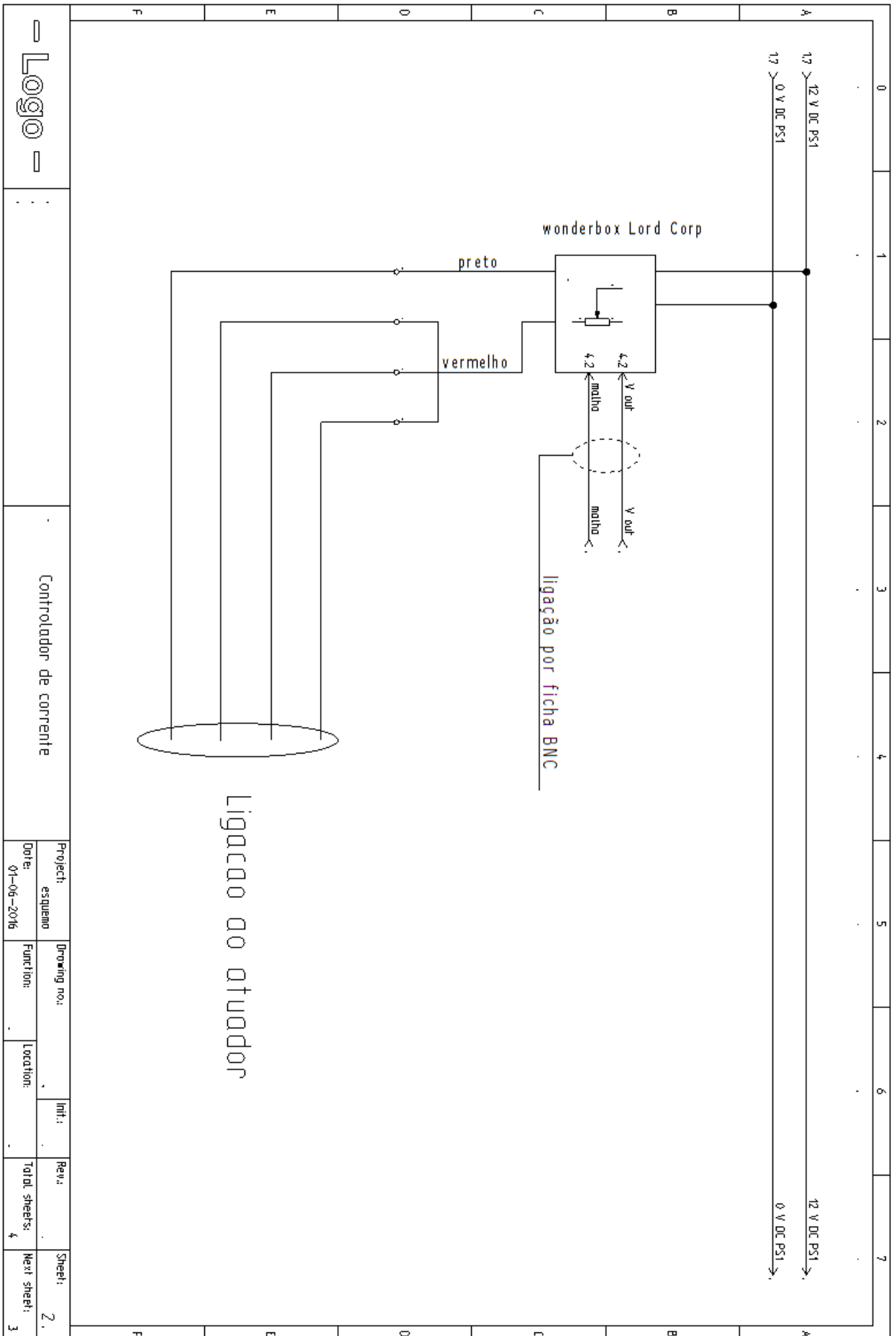


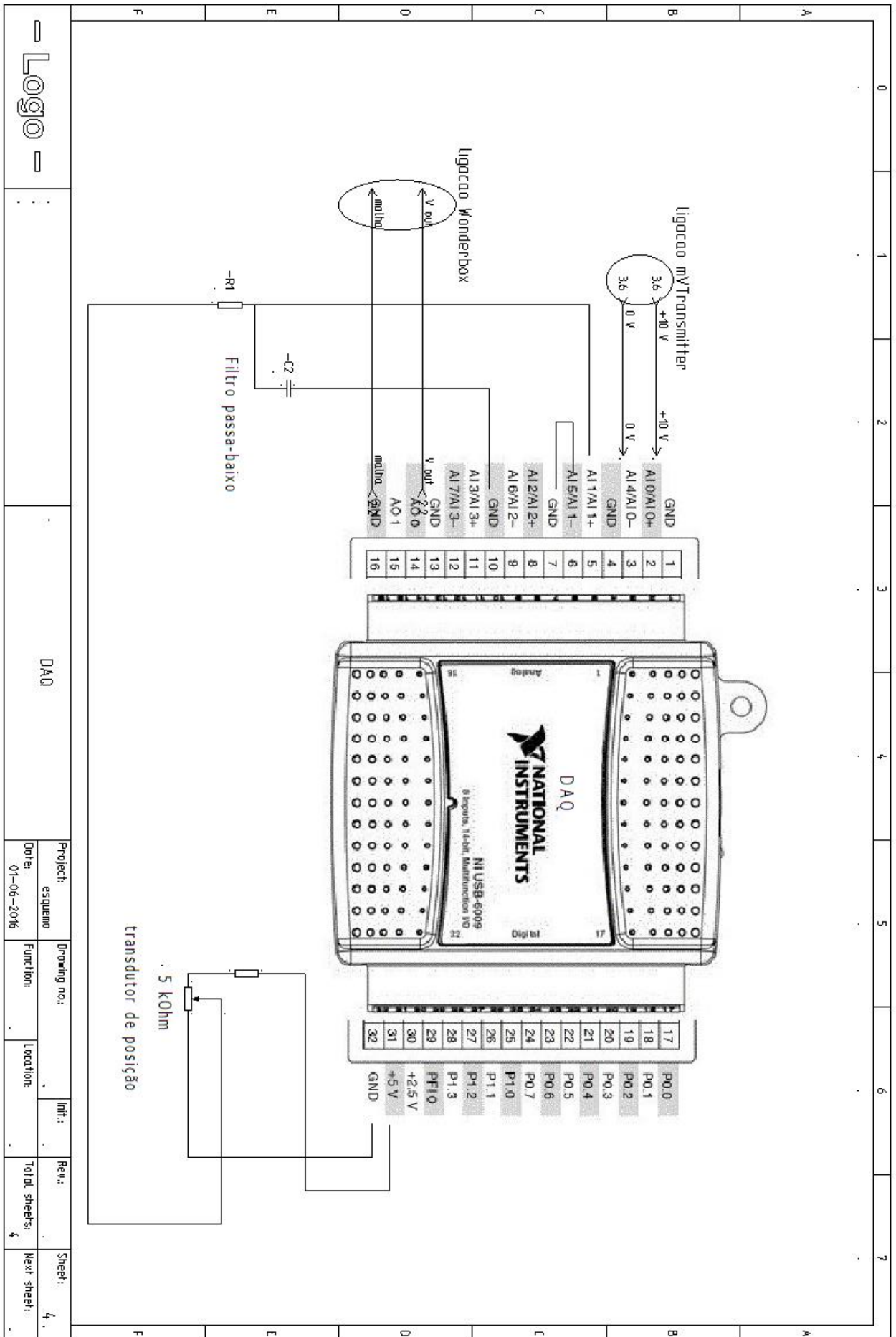
ANEXO B: Aplicação de LabVIEW para controlo



ANEXO C: Esquemas Elétricos







Logo		Project: esquema		Drawing no:		Int.:		Rev.:		Sheet: 4	
		Date: 01-06-2016		Function:		Location:		Total sheets: 4		Next sheet:	
		DAO									