



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2015

**Ana Filipa Fernandes  
Rodrigues**

**Desenvolvimento de solenóides para eletroválvulas  
hidráulicas**



**Ana Filipa Fernandes  
Rodrigues**

**Desenvolvimento de solenóides para eletroválvulas  
hidráulicas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça, Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e, sob a co-orientação científica do Prof. Doutor Luís Cadillon Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

À Memória de Nuno Miguel Fernandes.

## **O júri**

### **Presidente**

Prof. Doutor João Filipe Calapez de Albuquerque Veloso  
Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

### **Orientador**

Prof. Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça  
Investigador Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

### **Co-orientador**

Prof. Doutor Luís Manuel Cadillon Costa  
Professor Associado c/ Agregação, Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

### **Arguente**

Doutor Hugo Manuel Gonçalves da Silva  
Investigador Auxiliar, Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora.

## **Agradecimentos**

Quero expressar o meu sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça e ao meu co-orientador, Prof. Doutor Luís Cadillon Costa, pela disponibilidade e acompanhamento na realização deste trabalho, bem como pela boa disposição e bom ambiente de trabalho.

Agradeço também à empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda., especialmente aos sócios gerentes, Sr. João Batista Prior e Doutor Carlos Neves, pela oportunidade de desenvolver este trabalho integrado no grupo de investigação e desenvolvimento da mesma. Ao Engenheiro Pinho e ao Engenheiro Seabra, um muito obrigada, pelos conhecimentos que me transmitiram, pela disponibilidade e paciência e, acima de tudo, pela boa disposição. Obrigada também aos restantes membros da gerência e a todos os colaboradores da empresa pela disponibilidade e pela incansável simpatia.

A todos os membros do Laboratório Associado *Novel Materials and Biosystems* da Universidade de Aveiro, nomeadamente, ao J. Suresh Kumar, obrigada. À responsável pelo Laboratório Central de Análises da Universidade de Aveiro, Dra. Rosário Soares, deixo também o meu sincero agradecimento.

Aos amigos que me acompanharam durante todo o meu percurso académico e me ajudaram a atingir esta grande meta, MUITO OBRIGADA!

À Mariana Pires, presente desde o início deste percurso e que, longe ou perto, sempre me incentivou a terminar esta caminhada com boa disposição e ambição.

Um agradecimento especial aos meus pais, Valdir e Sofia Rodrigues, por me proporcionarem esta oportunidade, pelo amor e pelo apoio incondicional, mesmo quando a vontade de “baixar os braços” falava mais alto.

**Palavras-chave**

Solenóides, eletroválvulas, campo magnético, propriedades magnéticas, ferromagnetismo, temperatura de funcionamento, consumo de corrente elétrica, estabilidade eletromecânica.

**Resumo**

Os solenóides para eletroválvulas, em conjunto com outros produtos e equipamentos, permitem a automação dos sistemas de distribuição de águas não potáveis, como, por exemplo, em sistemas de rega. Deste modo é possível controlar diversos parâmetros, como o caudal e a pressão da água que passa na válvula, podendo estes ser fiscalizados à distância. Neste trabalho, foram desenvolvidos solenóides para acoplar a válvulas que se destinam à rega agrícola, comercializadas pela empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda. Para o efeito, foram definidos vários processos necessários para a criação de uma linha piloto de pré industrialização destes dispositivos. Etapas como a conceção do dispositivo, prototipagem, testes de temperatura, consumo de corrente, estabilidade eletromecânica e testes de desempenho associados a diferentes valores de pressão e de caudal de funcionamento, foram essenciais para este desenvolvimento, assim como, análises estruturais e morfológicas do material que constitui o núcleo dos solenóides. Além disso, procurou-se responder às necessidades do mercado numa perspetiva mais completa do que a existente. Para isso, foram produzidos dois tipos de solenóides de 24 V AC, com pressões máximas de funcionamento de 4 bar e de 12 bar.

**Keywords**

Solenoids, solenoid valves, magnetic field, magnetic properties, ferromagnetism, operating temperature, current consumption, electromechanical stability.

**Abstract**

The solenoids valves when combined with some other products and equipment, allow the automation of non-potable water distribution processes, like for instance, the automation of irrigation systems. This permits the control of parameters such as the flow and pressure of the water that passes the valve, which can also be monitored remotely. In the present work were studied and developed solenoids designed for solenoids valves production in the company JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda, which have as primary application crop irrigation. For this purpose was necessary to define along this work, several processes which are required for the establishment of a pilot assembly line of these devices. Steps like the product design, prototyping, temperature tests, current consumption, electromechanical stability and performance tests with different pressure and operating flow values, were essential to this development. Additionally, structural and morphological analysis of the material which constitutes the solenoid's core were performed. Besides the referred analysis and work, it was also intended that the developed product could provide a more complete and extensive response to the market needs. Therefore, two types of 24 V AC solenoids valves were produced, with maximum operating pressure of 4 bar and 12 bar.

# ÍNDICE

Lista de Figuras .....	i
Lista de Tabelas .....	iii
Capítulo 1   Introdução .....	1
1.1.Motivação.....	1
1.2.Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da Tese.....	1
Capítulo 2   Estado da arte.....	3
2.1.Magnetismo e Campo Magnético .....	3
2.2. Solenóides em Eletroválvulas .....	7
2.3 Mercado Atual.....	10
Capítulo 3   Conceção .....	13
3.1. Projetos.....	13
3.2. Produção de Peças Plásticas .....	18
3.3. Caracterização do Núcleo do Solenóide .....	21
Capítulo 4   Prototipagem.....	25
4.1. Componentes Físicos .....	25
4.2. Etapas de Montagem.....	26
4.3. Estudo Do Campo no Solenóide .....	29
4.4. Caracterização de Funcionamento Do Solenóide .....	30
Capítulo 5   Pré Industrialização.....	39
Capítulo 6   Conclusões.....	45
Bibliografia.....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linhas de campo magnético evidenciadas pela deposição de limalha de ferro na superfície de um íman.....	3
Figura 2 - “Regra da mão direita”: O dedo polegar indica o sentido da corrente e os restantes definem o sentido do campo magnético.....	4
Figura 3 - a) Linhas de campo magnético num íman; b) Linhas de campo magnético num solenóide percorrido por ima corrente elétrica.....	4
Figura 4 - Geometria utilizada para determinar o valor do campo magnético num solenóide finito num ponto P do eixo central do solenóide (vista transversal) .....	5
Figura 5 - Curva de histerese característica de um material ferromagnético.....	6
Figura 6 - Curvas de histerese de materiais ferromagnéticos: a) material ferromagnético macio; b) material ferromagnético duro.....	6
Figura 7 - Solenóide com um núcleo dividido em duas partes de comprimento $L_1$ e $L_2$ .	7
Figura 8 - Vista em corte de uma válvula de membrana: a) válvula aberta; b) válvula fechada.....	7
Figura 9 - Esquema representativo, em corte, de um solenóide: a) núcleos desmagnetizados; b) núcleos magnetizados.....	8
Figura 10 - Vista em corte do solenóide acoplado à eletroválvula: a) núcleo móvel desmagnetizado; b) núcleo móvel magnetizado; 1 – solenóide; 2 – câmara de entrada; 3 – câmara de saída; 4 – câmara de pressão.....	8
Figura 11 - Representação da força do peso: a) plano vertical; b) plano inclinado.....	9
Figura 12 - Desenho da base do solenóide: a) vista de frente; b) base do solenóide.....	13
Figura 13 - Desenho do núcleo fixo: a) pormenor da base da bobine; b) desenho técnico do núcleo fixo.....	13
Figura 14 - a) núcleo móvel; b) vedante.....	14
Figura 15 - a) anel de cobre; b) desenho técnico do anel de cobre.....	14
Figura 16 - a) Desenho técnico da mola; b) mola.....	15
Figura 17 - Gráfico da temperatura de funcionamento de solenóides com diferentes diâmetros do fio de enrolamento.....	16
Figura 18 - Armadura metálica.....	16
Figura 19 - Desenho técnico da cápsula do solenóide: a) vista de cima; b) vista em corte....	17
Figura 20 - Desenho técnico da tampa: a) vista de cima; b) vista em corte.....	17
Figura 21 - Desenho técnico do solenóide: a) vista em corte com todos os componentes; b) vista de frente.....	17
Figura 22 - Operações do processo de moldagem por injeção (sequência) .....	18
Figura 23 - Máquina de injeção por moldagem com pormenor do molde de injeção (aberto).....	19
Figura 24 - Difratograma de Raios-x obtido para o material constituinte do núcleo do solenóide.....	21
Figura 25 - Imagens óticas da superfície do aço.....	22
Figura 26 - Micrografias de SEM da superfície do aço: a) aço base; b) aço atacado quimicamente.....	23
Figura 27 - Curva de Histerese obtida para o material constituinte do núcleo do solenóide..	23
Figura 28 - Cravação: a) prensa mecânica; b) núcleo móvel e anel de cobre; c) conjunto base da bobine + anel de cobre + núcleo fixo.....	27
Figura 29 - Bobinagem: a) máquina de bobinar; b) enrolamento à volta da base da bobine..	27
Figura 30 - Solenóide com cabos e armaduras.....	28

Figura 31 - a) Dispensador de misturas; b) Solenóide encapsulado.....	28
Figura 32 - Estufa.....	29
Figura 33 - Impressora para rotulagem dos solenóides.....	29
Figura 34 - Campo magnético no interior do solenóide.....	30
Figura 35 - Dispositivo de Ensaio de Solenóides.....	30
Figura 36 - Gráfico da temperatura em função do tempo.....	31
Figura 37 - Gráfico da corrente em função do tempo.....	32
Figura 38 - Gráfico da estabilidade eletromecânica do núcleo móvel em função do tempo...	32
Figura 39 - Temperatura de funcionamento dos solenóides.....	34
Figura 40 - Corrente de consumo dos solenóides.....	34
Figura 41 - Estabilidade eletromecânica dos solenóides.....	35
Figura 42 - Temperatura de funcionamento dos solenóides.....	35
Figura 43 - Corrente de consumo dos solenóides.....	36
Figura 44 - Estabilidade eletromecânica dos solenóides.....	36
Figura 45 - Tempo de fecho do solenóide para um caudal constante de 30m <sup>3</sup> /h.....	37
Figura 46 - Tempo de fecho do solenóide para uma pressão constante.....	38
Figura 47 - Visão geral da linha piloto de pré industrialização: a) Desenho do projeto; b) Imagem real.....	40
Figura 48 - B1: Bancada de prensagem.....	40
Figura 49 - B2: Bancada de bobinagem.....	41
Figura 50 - B3: Bancada de solda.....	41
Figura 51 - B4: Bancada de pré teste.....	41
Figura 52 - Dispositivo para teste rápido de solenóides.....	42
Figura 53 - a) Desenho do porta-solenóides; b) Imagem real do porta-solenóides; c) Dispositivo de ligação ao TRS; d) Porta-solenóides, Dispositivo de ligação e TRS.....	42
Figura 54 - B5: Bancada de enchimento.....	43
Figura 55 - B6: Bancada de pré teste.....	43
Figura 56 - B7: Bancada de rotulagem.....	44
Figura 57 - B8: Bancada de montagem final e embalagem.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas de solenóides.....	11
Tabela 2 - Características do perfil de injeção.....	20
Tabela 3 - Percentagens de componentes constituintes da liga.....	24
Tabela 4 - Componentes do solenóide e respetivas funções.....	25
Tabela 5 - Comprimento do núcleo móvel e respetivas pressões máximas de funcionamento.....	33

# CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

O mercado global atual, cada vez mais competitivo e exigente, tem requerido que as empresas apostem na melhoria dos seus processos produtivos com o objetivo de aperfeiçoar e renovar os seus produtos e metodologias de produção, criação de novos produtos e métodos de produção, gestão, distribuição, etc., de forma a responderem mais rápida e eficazmente às necessidades do mercado, mantendo assim a possibilidade de competir com os concorrentes diretos.

Um caso particular que tem revelado uma elevada necessidade de tecnologias mais avançadas são produtos, equipamentos e sistemas associados à distribuição de água em setores como a agricultura em campo aberto, agricultura “em abrigo”, espaços verdes, indústria e obras públicas que estão em constante desenvolvimento e renovação. Este trabalho de mestrado, enquadra-se nesta conformidade. Assim, é motivado pelo interesse da marca *MARLUX*, pertencente à empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda., em produzir solenóides que possam ser acoplados às válvulas de distribuição que já possuem em mercado. A produção deste elemento eletromagnético irá, aliando-se às válvulas, completar o produto “electroválvula”, como um produto fabricado na sua totalidade por esta empresa. De referir que atualmente este tipo de elementos eletromagnéticos são adquiridos a um fornecedor externo.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho possui dois grandes objetivos. O primeiro relaciona-se com a conceção, prototipagem e caracterização de solenóides de 24 V<sub>ac</sub> para eletroválvulas para controlo de distribuição de águas não potáveis, com características de funcionamento, no mínimo, semelhantes aos atualmente existentes no mercado. O segundo objetivo reside em projetar e implementar uma linha piloto de pré-industrialização para a produção destes solenóides.

## 1.3. ESTRUTURA DA TESE

A tese encontra-se estruturada em seis capítulos.

No primeiro capítulo são apresentadas a motivação deste trabalho, os objetivos e a estrutura da tese.

O segundo capítulo destina-se ao estado da arte, onde são explicitados os conceitos físicos da base deste trabalho, assim como alguns dos desenvolvimentos que ocorreram ao longo dos tempos relativamente ao estudo e à produção de solenóides, como também a sua aplicação em eletroválvulas. Neste capítulo são ainda apresentados alguns solenóides do tipo 24 V<sub>ac</sub> de marcas presentes no mercado, atualmente.

O terceiro capítulo reserva-se à conceção dos solenóides de 24 V<sub>ac</sub>, onde são mostrados os projetos efetuados para a sua construção. É também apresentada a técnica de moldagem por injeção para a produção de peças plásticas, bem como a caracterização estrutural e morfológica do núcleo dos solenóides desenvolvidos.

A prototipagem dos componentes que constituem os solenóides é incluída no capítulo quatro: são apresentadas todas as peças e as respetivas funções, as etapas de montagem e os

testes de temperatura, pressão e estabilidade eletromecânica em função do número de espiras e das dimensões do núcleo móvel.

No capítulo cinco é apresentada uma linha piloto de pré industrialização dos solenóides, introduzida na empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda., delineada com o auxílio de um *software* de modelação em 3D.

As conclusões do trabalho são discutidas no capítulo seis. Por fim são apresentadas propostas de trabalhos futuros para estes solenóides de 24 V<sub>ac</sub> e também para outro tipo de solenóides.

## CAPÍTULO 2 | ESTADO DA ARTE

### 2.1. MAGNETISMO E CAMPO MAGNÉTICO

O magnetismo é um excelente exemplo de como as ciências exatas se têm desenvolvido ao longo do tempo. É conhecido desde o século VII a.C., através de textos gregos que fazem referência à observação de propriedades magnéticas em determinados corpos constituídos por um material, a magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), proveniente da Magnésia, de onde veio o nome de magnetismo. No entanto, só no século VII d.C. voltaram a aparecer registros sobre o magnetismo, vindos de relatos dos chineses sobre o uso da bússola utilizada em caminhos marítimos. Somente quando estes trouxeram a bússola para a Europa, na época do Renascimento, houve um maior interesse pelo magnetismo, uma vez que a bússola teve um papel muito importante nas grandes viagens e nos descobrimentos que se realizaram nesta época [1].

Cientificamente, o estudo do magnetismo só teve início no século XVI com as publicações de William Gilbert acerca do seu estudo de observação deste fenômeno. Gilbert foi o primeiro a aplicar métodos científicos no seu estudo e foi ele quem descobriu que a Terra é um íman gigante. Separou a diferença entre as cargas elétricas e enunciou os fundamentos para as ciências da eletricidade e do magnetismo. Observou, também, a trajetória das linhas de campo magnético, do polo norte para o polo sul, através da deposição de limalha de ferro sobre um íman, Figura 1 [1,2].

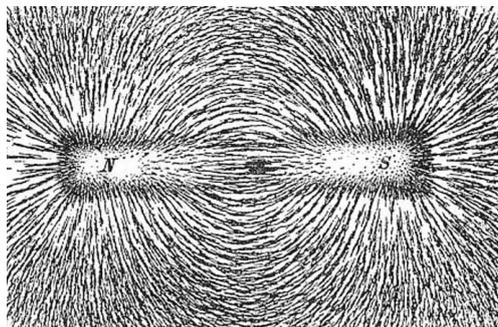


FIGURA 1 – LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO EVIDENCIADAS PELA DEPOSIÇÃO DE LIMALHA DE FERRO NA SUPERFÍCIE DE UM ÍMAN [3].

No ano de 1820, o dinamarquês *Hans Christian Oersted* mostrou que os efeitos magnéticos podiam ser produzidos por uma corrente elétrica que flui num circuito elétrico. Foi o primeiro cientista a observar a deflexão sofrida pela agulha da bússola magnética quando esta é colocada na proximidade de um fio percorrido por uma corrente elétrica. Notou, assim, que as linhas de campo magnético em torno de um fio percorrido por uma corrente formam círculos concêntricos que obedecem à simples convenção da “Regra da mão direita” que permite saber qual a direção do campo magnético em torno de um fio percorrido por uma corrente elétrica, Figura 2 [2].

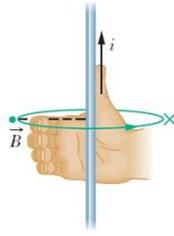


FIGURA 2 – “REGRA DA MÃO DIREITA”: O DEDO POLEGAR INDICA O SENTIDO DA CORRENTE E OS RESTANTES DEFINEM O SENTIDO DO CAMPO MAGNÉTICO [4].

Posteriormente, a natureza dos campos magnéticos gerados pela corrente elétrica foi explorada por *André-Marie Ampère*, entre 1821 e 1825, que constatou que os polos magnéticos, norte e sul, ocorrem aos pares e, portanto, se uma partícula magnética existe na escala atômica, pode concluir-se que esta deve assumir a forma de um dipolo magnético. À escala macroscópica, o efeito de um dipolo magnético é, precisamente, o mesmo que o de um pequeno circuito de corrente com dimensões atômicas. *Ampère* conclui que os efeitos magnéticos de corpos magnetizados podem resultar de correntes que circulam numa malha. Assim, a hipótese de que todos os efeitos magnéticos no espaço livre podem ser descritos tanto em termos de distribuição de dipolos como em termos de distribuições de corrente, sejam eles resultantes de corpos magnetizados ou de circuitos de transporte de corrente elétrica [5,2,].

Com isto, *Ampère* mostrou, experimentalmente, que um íman pode ser substituído por um solenóide, sendo este formado por um enrolamento de um fio condutor, por exemplo cobre, feito em forma de espiral, ao qual chamamos de bobine. Se o comprimento do solenóide for pelo menos dez vezes maior do que o seu diâmetro, o campo magnético produzido no seu centro é, praticamente, uniforme quando este é percorrido por uma corrente, Figura 3 [1].

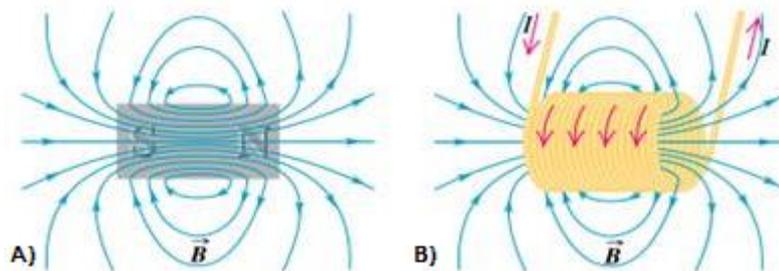


FIGURA 3 – A) LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO NUM ÍMAN; B) LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO NUM SOLENÓIDE PERCORRIDO POR ÍMAN CORRENTE ELÉTRICA [6].

Se o solenóide tiver comprimento finito, o campo magnético num ponto localizado no eixo do solenóide, pode ser calculado a partir da Lei de *Ampère*, traduzida pela equação [1]:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} (\sin \phi_2 - \sin \phi_1) \quad (1)$$

Onde  $B$  é o valor do campo magnético,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ ),  $N$  é o número de espiras do enrolamento do fio,  $I$  é o valor da corrente que percorre o fio,  $L$  é o comprimento do solenóide e os ângulos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são os definidos na Figura 4.

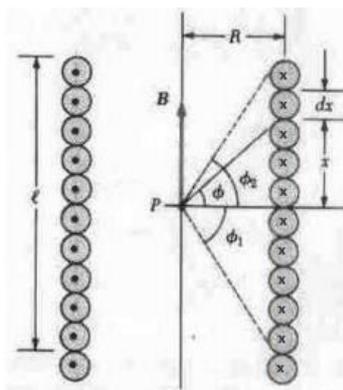


FIGURA 4 – GEOMETRIA UTILIZADA PARA DETERMINAR O VALOR DO CAMPO MAGNÉTICO NUM SOLENÓIDE FINITO NUM PONTO P DO EIXO CENTRAL DO SOLENÓIDE (VISTA TRANSVERSAL) [2].

A equação 1 pode reduzir-se ao caso de um solenóide de comprimento infinito quando os ângulos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  tendem para  $90^\circ$ . Assim, o campo magnético num solenóide percorrido por uma corrente elétrica é dado por [2]:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (2)$$

Quando se considera um solenóide infinito, o valor do campo magnético no interior deste não é uniforme. É mais intenso no centro e decresce com uma dependência dos ângulos  $\phi_1$  e  $\phi_2$  nas extremidades, tendendo, rapidamente, para zero à medida que nos afastamos do centro [2].

Pela equação (2), consegue obter-se o valor do campo magnético para um solenóide sem núcleo, isto é, quando dentro do enrolamento do fio existe apenas ar. Para alcançar o objetivo deste trabalho, foi estudado, em pormenor, o solenóide cujo núcleo é constituído por um material magnético, em particular, um material ferromagnético. Ao introduzir-se um material magnético no interior do solenóide no qual se faz passar uma determinada corrente que magnetiza o núcleo, verifica-se que o campo magnético se torna mais intenso no interior do solenóide. Assim, o valor do campo magnético é obtido por:

$$B = \frac{\mu NI}{L} \quad (3)$$

A diferença entre esta e a equação (2) reside no valor da permeabilidade magnética do vácuo,  $\mu_0$ , que é substituído pelo valor da permeabilidade magnética do material magnético em questão,  $\mu$ .

No caso dum material ferromagnético, a permeabilidade magnética não é constante, variando com o aumento da magnetização,  $M$ , do material. Os materiais que apresentam elevados valores de permeabilidade magnética dizem-se facilmente magnetizáveis.

Entre os materiais magnéticos, os metais como o ferro, o níquel e o cobalto, que apresentam comportamento ferromagnético, são considerados os mais importantes do ponto de vista industrial devido às inúmeras aplicações em que podem ser usados. Este tipo de materiais é caracterizado pela criação de uma forte magnetização quando lhes é aplicado um campo magnético. Se considerarmos o efeito de um campo aplicado,  $H$ , ao campo magnético,  $B$ , de um metal ferromagnético durante a sua magnetização e desmagnetização, verifica-se que o campo aplicado aumenta a partir do zero até atingir o ponto de saturação, magnetização de saturação,  $M_s$ . Depois, se o campo aplicado for anulado, a curva de magnetização inicial reduz para um valor de magnetização chamada magnetização remanescente,  $M_r$ . Deste modo, para

que o campo magnético se reduza até zero é necessário aplicar um campo inverso ao valor do campo aplicado inicialmente que se designa por campo coercivo,  $H_c$ . A Figura 5 esquematiza este comportamento.

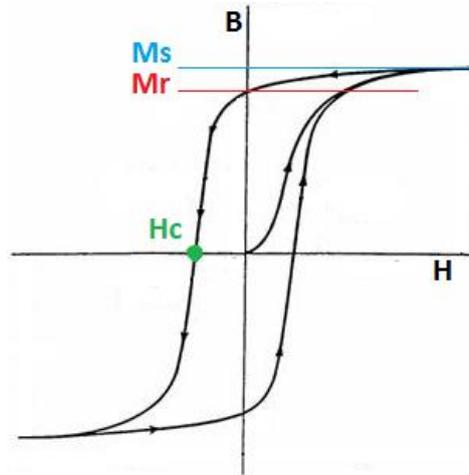


FIGURA 5 – CURVA DE HISTERESE CARACTERÍSTICA DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO [3].

Os materiais ferromagnéticos podem ser divididos em dois grandes grupos, o dos materiais ferromagnéticos macios e o dos materiais ferromagnéticos duros. Um material ferromagnético macio é magnetizado e desmagnetizado facilmente, o valor do campo coercivo,  $H_c$ , varia entre  $0,004 \times 10^{-6}$  e  $0,88 \times 10^{-6}$  kA/m, ao contrário de um material ferromagnético duro [3]. Para que um material ferromagnético seja macio, é necessário que a sua curva de histerese apresente um campo coercivo o mais pequeno possível, ou seja, a curva de histerese deve ser estreita e, assim, o material magnetiza-se facilmente e apresenta uma elevada permeabilidade magnética. Além disso, deve também apresentar uma magnetização de saturação elevada. Portanto, a curva de histerese estreita e longa é característica dos materiais ferromagnéticos macios. Por outro lado, os materiais ferromagnéticos duros são caracterizados por apresentarem um campo coercivo elevado, entre 37 a 1200 kA/m, assim como uma magnetização remanescente também elevada. Uma vez magnetizados, estes materiais são difíceis de desmagnetizar, uma vez que o campo magnetização aplicado é intenso o suficiente para orientar os respetivos domínios magnéticos na direção do campo aplicado, sendo que, parte da energia do campo aplicado é convertida em energia potencial que fica armazenada no ímã, Figura 6.

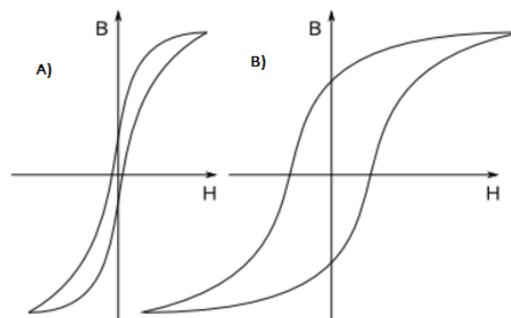


FIGURA 6 – CURVAS DE HISTERESE DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS: A) MATERIAL FERROMAGNÉTICO MACIO; B) MATERIAL FERROMAGNÉTICO DURO [3].

Os materiais macios, como os vidros metálicos, são utilizados no desenvolvimento de núcleos de transformadores de potência em multicamada. As ligas de ferro e níquel aplicam-se

em comunicações de alta sensibilidade para detecção e transmissão de sinais fracos. No caso dos materiais ferromagnéticos duros, como as ligas de alumínio, níquel e cobalto, têm, atualmente, maior importância comercial, sendo responsáveis por 35 % do mercado de materiais magnéticos duros [3]. Além destes, os materiais magnéticos compostos por ligas de terras raras, constituem também uma elevada percentagem de procura no mercado. São utilizados em dispositivos médicos, como por exemplo, em pequenos motores de bombas e válvulas e no movimento assistido das pálpebras. Aplicam-se, também, em relógios de pulso eletrónicos, tubos de ondas, motores de corrente contínua, etc, [3].

## 2.2. SOLENÓIDES EM ELETROVÁLVULAS

Existem diversas aplicações que requerem o controlo da passagem de algum tipo de fluido podendo este ser efetuado por válvulas acionadas eletricamente por intermédio de solenóides [5]. Como foi referido, um solenóide que tenha um núcleo constituído por um material ferromagnético, sendo este magnetizado pela passagem de uma corrente elétrica, apresenta um campo magnético elevado no seu interior. Consideremos que o núcleo do solenóide é dividido em duas partes,  $L_1$  e  $L_2$ , Figura 7.

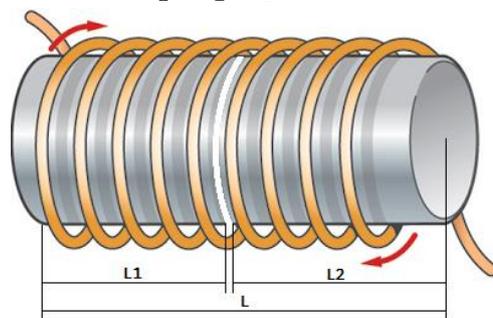


FIGURA 7 – SOLENÓIDE COM UM NÚCLEO DIVIDIDO EM DUAS PARTES DE COMPRIMENTO  $L_1$  E  $L_2$  [7].

Tomando esta configuração como base, estamos agora em condições de percebermos de que forma é que um solenóide pode permitir a abertura e o fecho de uma electroválvula. Na Figura 8 é apresentado um esquema muito simples de uma válvula de membrana vista em corte, onde é reproduzido o seu funcionamento.

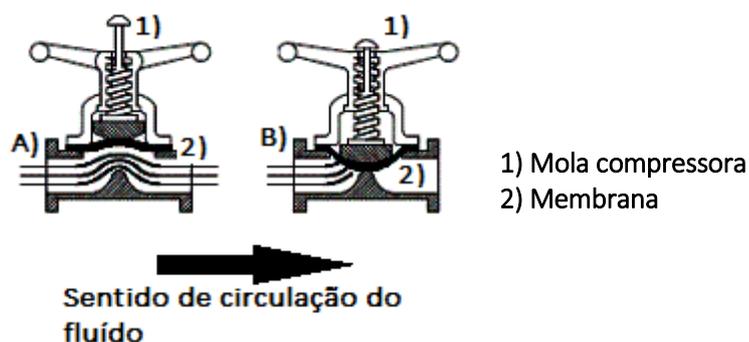
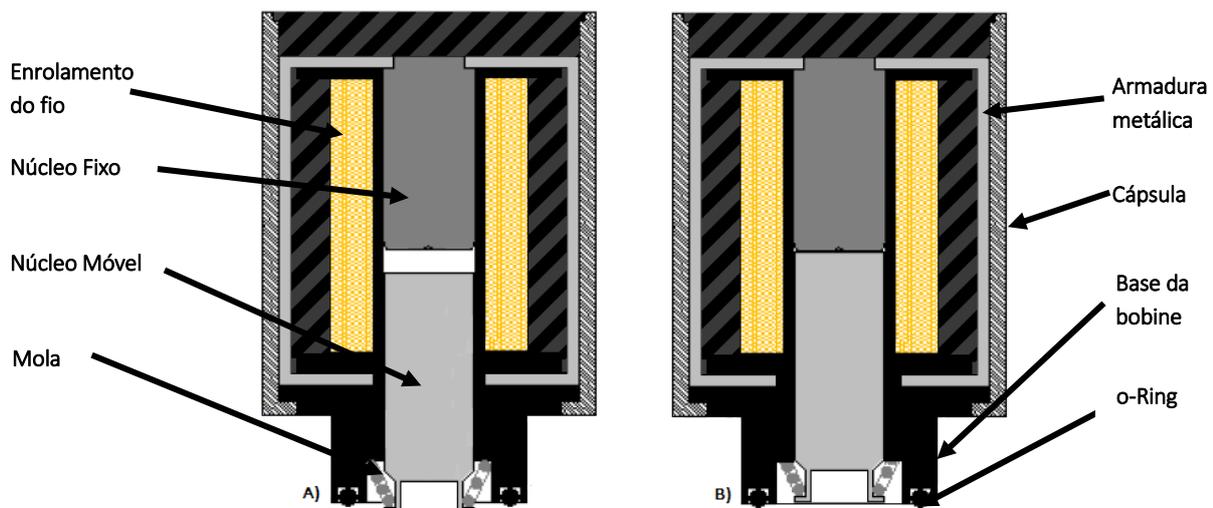


FIGURA 8 – VISTA EM CORTE DE UMA VÁLVULA DE MEMBRANA: A) VÁLVULA ABERTA; B) VÁLVULA FECHADA [8].

Quando a válvula está aberta, Figura 8 A), não existe qualquer força a atuar na mola compressora e, por isso, a membrana da válvula sobe, permitindo que o fluido passe através da

válvula. Quando a válvula está fechada, Figura 8 B), a mola é comprimida e a membrana forma uma barreira física à passagem do fluido e, assim, este fica retido na câmara da válvula.

Considerando o comportamento acima descrito, é possível substituir a mola compressor por um solenóide que permite que a válvula abra e feche consoante o fluxo de corrente elétrica. Ou seja, quando existe uma corrente que flui através do solenóide, esta vai magnetizar o núcleo do solenóide e este permite a abertura da válvula. Caso contrário, quando o núcleo é desmagnetizado, pela ausência de fluxo de corrente, a válvula é fechada. O facto da configuração do núcleo do solenóide ser dividido em dois é devido à necessidade de haver uma parte do núcleo que esteja fixa, que denominamos de núcleo fixo, e outra que possa efetuar o movimento de abrir e fechar a válvula, a que denominamos núcleo móvel, Figura 9.



**FIGURA 9 - ESQUEMA REPRESENTATIVO, EM CORTE, DE UM SOLENÓIDE: A) NÚCLEOS DESMAGNETIZADOS; B) NÚCLEOS MAGNETIZADOS.**

Às válvulas que são acionadas por solenóides dá-se o nome de eletroválvulas. Deste modo é exequível verificar a abertura e o fecho das válvulas automaticamente, isto é, controladamente e à distância.

Na figura seguinte é representado o conjunto eletroválvula e solenóide. Primeiramente, a electroválvula está fechada, ou seja, não há passagem de fluido da câmara de entrada para a câmara de saída, uma vez que não existe passagem de fluxo de corrente no solenóide e, por conseguinte, o núcleo móvel está desmagnetizado. Em seguida, o núcleo móvel é atraído para o núcleo fixo, isto é, existe fluxo de corrente no solenóide, o que permite a abertura da electroválvula, permitindo a passagem do fluido da câmara de entrada para a câmara de saída.

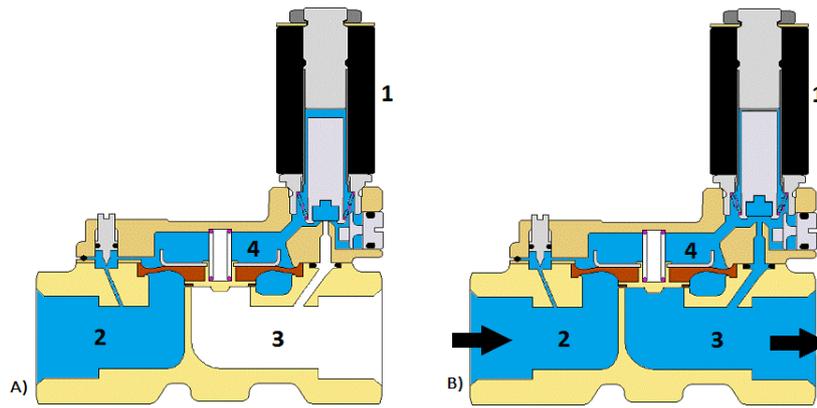


FIGURA 10 - VISTA EM CORTE DO SOLENÓIDE ACOPLADO À ELETROVÁLVULA: A) NÚCLEO MÓVEL DESMAGNETIZADO; B) NÚCLEO MÓVEL MAGNETIZADO; 1 – SOLENÓIDE; 2 – CÂMARA DE ENTRADA; 3 – CÂMARA DE SAÍDA; 4 – CÂMARA DE PRESSÃO [9].

Assim, para que o solenóide passe da sua posição de fechado para aberto, é necessário, para além do fluxo de corrente, contornar a força do peso do núcleo móvel, comprimir a mola e a força de pressão que é exercida pelo fluido em passagem.

Sabemos que a força de uma mola, ou força elástica, é dada por:

$$\vec{F}_{elástica} = -k\vec{x} \quad (4)$$

Onde  $k$  é a constante de elasticidade da mola e  $\vec{x}$  é a deformação sofrida pela mola, segundo a direção  $x$ .

Como se pode visualizar na Figura 10 A), mesmo quando a eletroválvula está fechada, o fluido em questão já se encontra dentro do solenóide, pelo que a força de pressão exercida no núcleo móvel depende da área do mesmo e do valor de pressão do fluido, (5) que se pretende fazer passar pela eletroválvula.

$$F = PA \quad (5)$$

Onde  $P$  é a pressão do fluido e  $A$  é a área da secção do núcleo móvel, que é circular e então é obtida pela equação:

$$A = \pi r^2 \quad (6)$$

O peso do núcleo móvel tem sempre direção vertical, dado que é provocado pela aceleração da gravidade que tem origem no centro da Terra, seja qual for a posição do solenóide ou do conjunto solenóide e electroválvula. Por outro lado, sabemos que a força normal é a força de reação que tem origem na superfície onde ocorre o movimento. Portanto tem um ângulo igual ao do plano do movimento, Figura 11. Ou seja, segundo o peso e força normal, garante-se que, seja qual for a posição da electroválvula e, conseqüentemente, do solenóide, o núcleo móvel vai desempenhar a sua função normalmente.

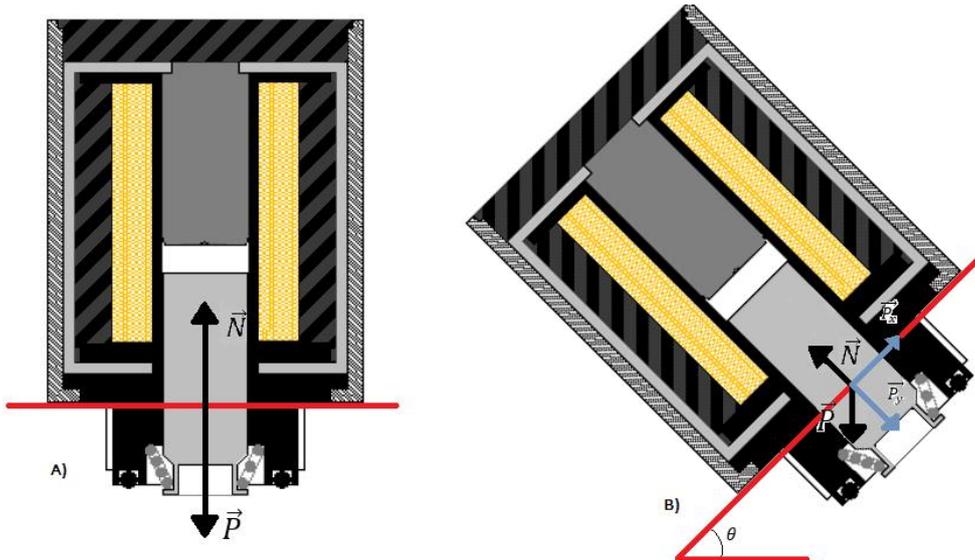


FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DA FORÇA DO PESO: A) PLANO VERTICAL; B) PLANO INCLINADO.

Pela Figura 11, temos que, para o plano vertical, a força do peso é traduzida por:

$$\vec{P} = m_{\text{núcleo móvel}} \vec{g} \quad (8)$$

Onde  $|\vec{g}| = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$  representa a aceleração a gravidade.

Para o plano inclinado, podemos definir o plano cartesiano com inclinação igual ao plano inclinado, ou seja, o eixo x forma um ângulo igual ao do plano, e o eixo y é perpendicular ao eixo x. A força normal será igual à decomposição da força do peso no eixo y e a decomposição da força do peso no eixo x será a responsável pelo movimento do núcleo móvel. O ângulo formado entre a força do peso e a sua decomposição no eixo y é igual ao ângulo formado entre o plano inclinado e a direção horizontal.

$$\begin{cases} \vec{P}_x = \vec{P} \sin \theta = m_{\text{núcleo móvel}} \vec{g} \sin \theta \\ \vec{P}_y = \vec{P} \cos \theta = m_{\text{núcleo móvel}} \vec{g} \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

Portanto, o movimento que núcleo móvel do solenóide executa quando é atraído para o núcleo fixo, isto é, para que o orifício da eletroválvula seja aberto, é traduzido pela seguinte equação:

$$\vec{F}_{\text{magnética}} > \vec{F}_{\text{elástica}} + \vec{F} + \vec{P} \quad (10)$$

Ou seja, a força magnética que permite a atração dos núcleos tem de ser superior ao somatório de todas as forças que estão aplicadas no núcleo móvel, a força elástica, exercida pela mola, a força de pressão exercida pelo fluido na secção do núcleo e a força do peso do núcleo.

## 2.3 MERCADO ATUAL

Existem, atualmente, diversas marcas que fabricam produtos para a distribuição de águas não potáveis.

Os solenóides para eletroválvulas são um dos produtos entre muitos outros destinados à automação industrial e agrícola para a distribuição de água que estas marcas disponibilizam no mercado.

Para a realização deste trabalho, foram consideradas, como referência, duas destas marcas, *Baccara* e *Orbit*, sendo a primeira líder do mercado mundial.

Com o intuito de desenvolver solenóides para eletroválvulas, foi consultada a informação disponível relativa a este produto, para que, durante o processo de concepção do produto, pudéssemos ter parâmetros de comparação. Esta informação é apresentada na tabela seguinte.

**TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE SOLENÓIDES.**

Marca	Voltagem (V <sub>ac</sub> )	Corrente de influxo (A)	Corrente de funcionamento (A)	Pressão (bar)
<i>Baccara</i>	24	0,3	0,19	12
<i>Orbit</i>	24	-	-	12



# CAPÍTULO 3 | CONCEÇÃO

## 3.1. PROJETOS

Os solenóides destinam-se a serem acoplados a válvulas implementadas em sistemas de rega. Considerando os princípios físicos enunciados no capítulo anterior, o processo de conceção destes dispositivos passou por várias etapas. Primeiramente, foi necessário esboçar, de grosso modo, todos os componentes que viriam a ser necessários para o seu desenvolvimento de modo a que, na fase seguinte, se pudessem realizar desenhos técnicos, dimensionais, de cada peça que permitam obter o solenóide idealizado. Para este projeto fixou-se a tensão de funcionamento dos solenóides em 24 V<sub>ac</sub>. O desenvolvimento de todos os componentes teve como base a estrutura e funcionamento da válvula *MARLUX*, que funciona de forma satisfatória usando solenóides produzidos pela *Baccara* e *Orbit*.

Em primeira instância, começou por se projetar a base do enrolamento do fio que constitui o solenóide. Havia necessidade de ter um suporte físico para realizar esse enrolamento e ao mesmo tempo, era essencial que nesse suporte fosse incorporado o núcleo do solenóide. Além disso, existia também a necessidade de que esta base realizasse a ligação entre o solenóide e a válvula, isto é, era preciso que a base do solenóide tivesse uma extremidade “macho” coincidente com a rosca da válvula, Figura 12. O material constituinte desta base é a poliamida, uma matéria-prima utilizada, industrialmente, para a produção de peças plásticas para a água.

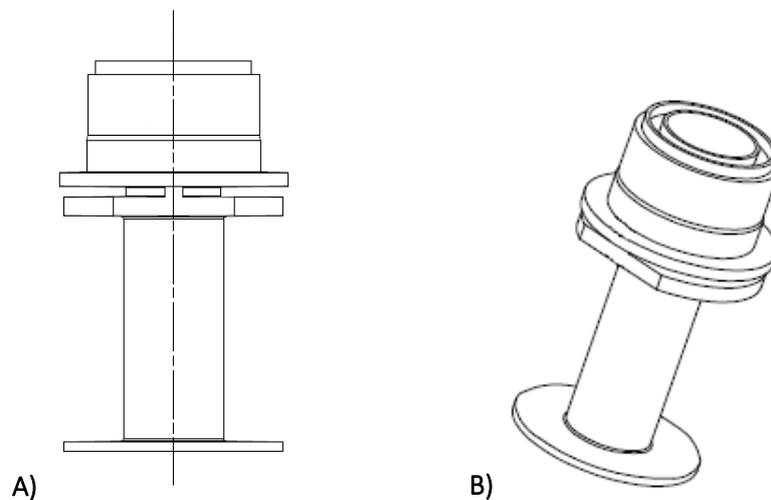
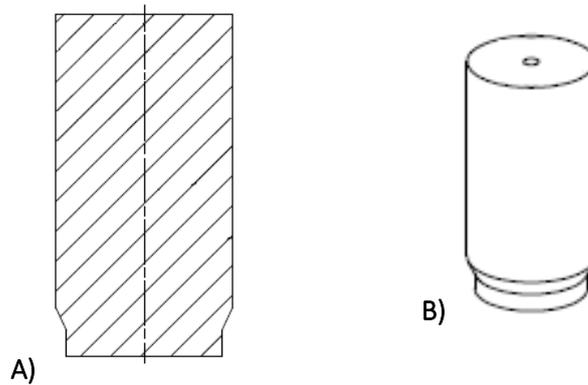


FIGURA 12 – DESENHO DA BASE DO SOLENÓIDE: A) VISTA DE FRENTE; B) BASE DO SOLENÓIDE.

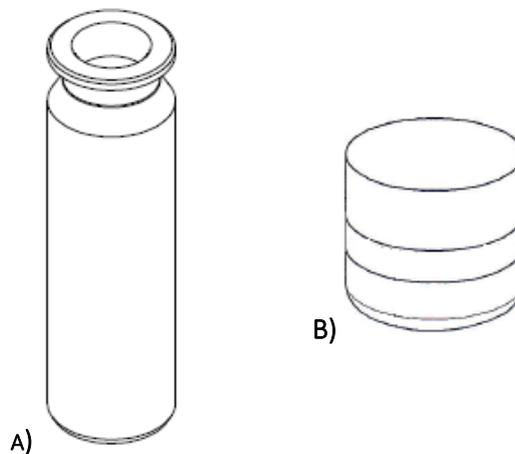
Paralelamente à concetualização da base do solenóide, adveio o dimensionamento do núcleo do solenóide, uma vez que este teria de ficar incluído na base. Como foi referido anteriormente, este núcleo terá de ser dividido em dois, um núcleo que ficará fixo na base do solenóide e um núcleo móvel que realizará um movimento que permite abrir e fechar a válvula. Posto isto, o núcleo fixo foi pensado de forma a ficar encaixado na base da bobine, garantindo que enquanto o solenóide estiver a funcionar, este ficará completamente fixo. Portanto, no

interior da base da bobine foi criada uma secção circular que permite envolver o núcleo e, para o núcleo fixo, foi criada uma saliência para que este fique rigidamente colocado, Figura 13.



**FIGURA 13 – DESENHO DO NÚCLEO FIXO: A) PORMENOR DA BASE DA BOBINE; B) DESENHO TÉCNICO DO NÚCLEO FIXO.**

Posto isto, em seguida foi projetado o núcleo móvel do solenóide. A soma do seu comprimento com o comprimento do núcleo fixo terá de ser igual ao comprimento do orifício circular criado na base do solenóide. Como este vai ter uma das extremidades que vai ficar em contacto direto com o orifício de abertura ou fecho da válvula, terá de ser criada uma reentrância nessa extremidade com o objetivo de incluir um vedante para garantir que não haverá fugas, Figura 14.



**FIGURA 14 – A) NÚCLEO MÓVEL; B) VEDANTE.**

Considerando ainda a etapa de conceção do núcleo do solenóide, e tendo em conta que o objetivo que se pretende é que o núcleo fixo atraia o núcleo móvel quando estes são magnetizados por ação de um fluxo de corrente alternada, surgiu a necessidade de incluir, no núcleo fixo, um anel de um material condutor e neste caso foi utilizado cobre. Isto porque se trata de uma corrente elétrica cujo sentido é variável, ou seja, os polos magnéticos dos núcleos invertem-se, simultaneamente, a cada ciclo de corrente, mantendo a atração entre eles. No entanto, a constante inversão dos polos pode provocar a vibração do núcleo móvel e, para contrariar este efeito é incluído um pequeno anel de cobre no núcleo fixo do solenóide. Assim, é gerada uma força eletromotriz induzida no anel, proporcional à derivada da corrente que flui

no enrolamento, criando um campo magnético suficiente para manter os núcleos atracados quando os polos se invertem, Figura 15, [5].

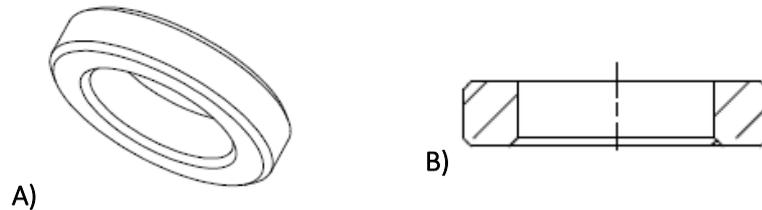


FIGURA 15 – A) ANEL DE COBRE; B) DESENHO TÉCNICO DO ANEL DE COBRE.

Pela Lei de Faraday sabemos que o fluxo do campo magnético que passa pelo anel de cobre pode ser calculado através de:

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad (11)$$

Onde  $B$  é o valor do campo magnético,  $A$  é a área do circuito definido pelo anel de cobre e  $\cos \theta$  é o ângulo entre o campo magnético e o plano do anel. Por conseguinte, é possível calcular o valor da força eletromotriz induzida:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (12)$$

Conclui-se então que a força eletromotriz produzida é tanto maior quanto mais elevada for a variação do fluxo magnético por intervalo de tempo. Pela equação 11, sabemos que o fluxo magnético está diretamente relacionado com o número de espiras,  $N$ . Por isso, quanto maior for o número de espiras, maior será o valor do fluxo magnético e, conseqüentemente, maior será o valor do campo magnético. Este campo magnético, como referido anteriormente, é o responsável pela magnetização dos núcleos do solenóide e pela sua atração e, por conseguinte, pela abertura do orifício da válvula. Logo, quanto maior for o valor do campo magnético, melhor e mais rápida se dá a atração entre o núcleo móvel e o núcleo fixo, permitindo assim valores mais elevados de pressão do fluído que passa na válvula [10,11].

Para além do anel de cobre, foi também necessária a inclusão de uma mola de aço inoxidável no núcleo móvel, com o objetivo de ajudar este núcleo a manter-se afastado do núcleo fixo, quando o solenóide é desligado. Figura 16.

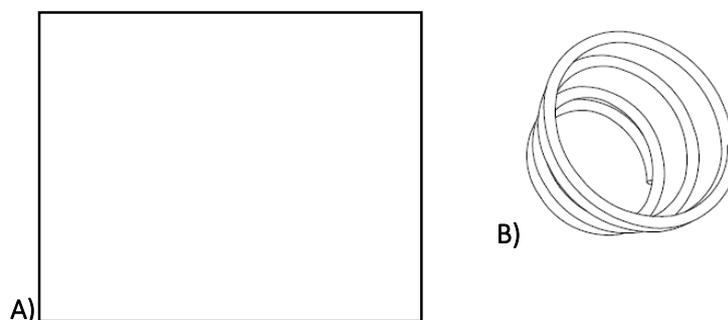
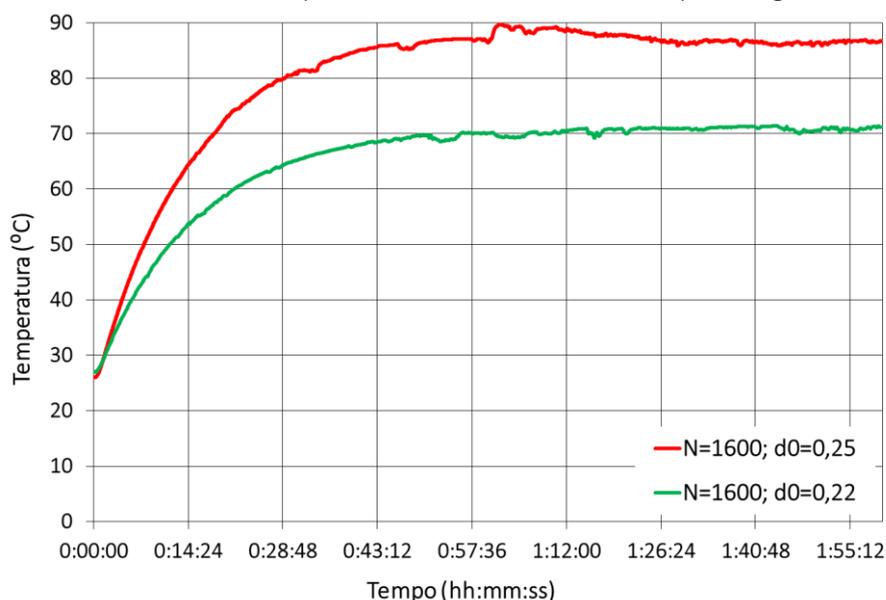


FIGURA 16 – A) DESENHO TÉCNICO DA MOLA; B) MOLA.

O material que compõe a mola é um material resistente à oxidação, uma vez que esta estará, permanentemente, em contacto com a água.

Para o enrolamento, foi escolhido um fio de cobre com um diâmetro de 0,22 mm. O mercado oferece fios de cobre com múltiplas características diferentes: vários diâmetros, diferentes isolamentos, etc. O diâmetro do fio escolhido foi de 0,22 mm, uma vez que, para diâmetros menores, a resistência mecânica do fio é reduzida, podendo este partir-se durante o processo de bobinagem. Além disso, um fio mais grosso vai provocar um aumento da temperatura de funcionamento do solenóide, uma vez que o consumo de corrente vai ser superior. Fios de cobre com diâmetros maiores que 0,22 mm, nomeadamente com um diâmetro de 0,25 mm, foi testado para um solenóide com 1600 espiras, Figura 17.



**FIGURA 17 – GRÁFICO DA TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO DE SOLENÓIDES COM DIFERENTES DIÂMETROS DO FIO DE ENROLAMENTO.**

Apenas foi realizado um teste de temperatura de funcionamento durante duas horas, mas é possível concluir que o solenóide com o enrolamento de fio de 0,25 mm de diâmetro, atinge uma temperatura de funcionamento mais elevada do que o solenóide com o enrolamento de fio de 0,22 mm.

Aparentemente, poderia considerar-se finalizado o processo de conceção dos constituintes fundamentais do solenóide. No entanto, dada a configuração do conjunto base do solenóide, enrolamento e núcleos, surge a necessidade de concentrar as linhas de campo magnético produzidas pelo solenóide quando neste circula um fluxo de corrente e evitar que estas se dispersem, o que provocaria uma diminuição da força de atração sobre o núcleo móvel. Esta função é desempenhada por um componente ao qual se deu o nome de armadura. Uma vez que os solenóides produzidos têm uma configuração cilíndrica, é necessária a introdução de duas armaduras, de forma a “revestir” toda a superfície do enrolamento, Figura 18.

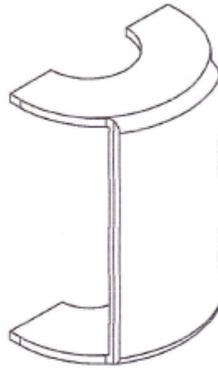


FIGURA 18 – ARMADURA METÁLICA.

Depois disto, estão em falta os componentes exteriores do solenóide, uma vez que é necessário resguardar toda a estrutura que foi apresentada anteriormente. Para isso, foi projetada uma cápsula cilíndrica que encaixa na extremidade da base da bobine que contém o encaixe para a rosca da válvula. Na superfície exterior da cápsula existem três frisos espaçados de  $120^\circ$ , de forma a facilitar ao utilizador a colocação do solenóide na válvula, Figura 19.

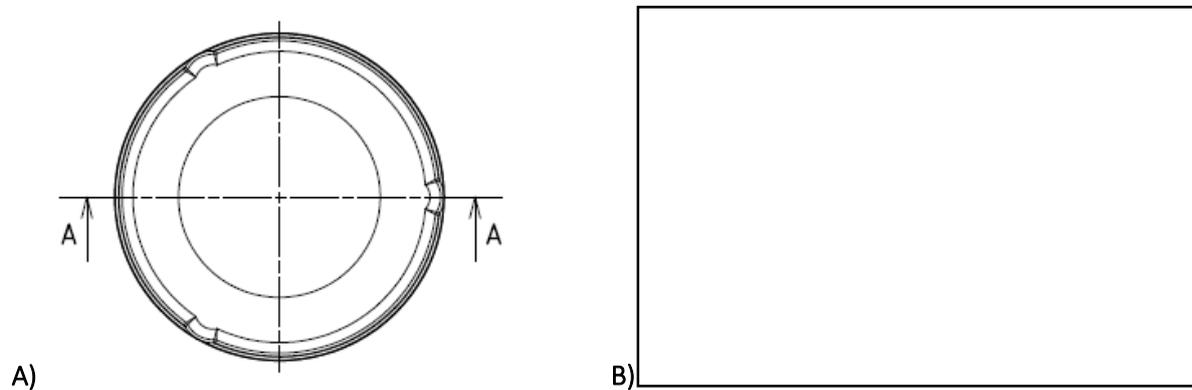


FIGURA 19 – DESENHO TÉCNICO DA CÁPSULA DO SOLENÓIDE: A) VISTA DE CIMA; B) VISTA EM CORTE.

Em seguida foi projetada uma tampa para garantir que, no transporte do solenóide, nenhum dos componentes é perdido, nomeadamente, o núcleo móvel e a mola, Figura 20.

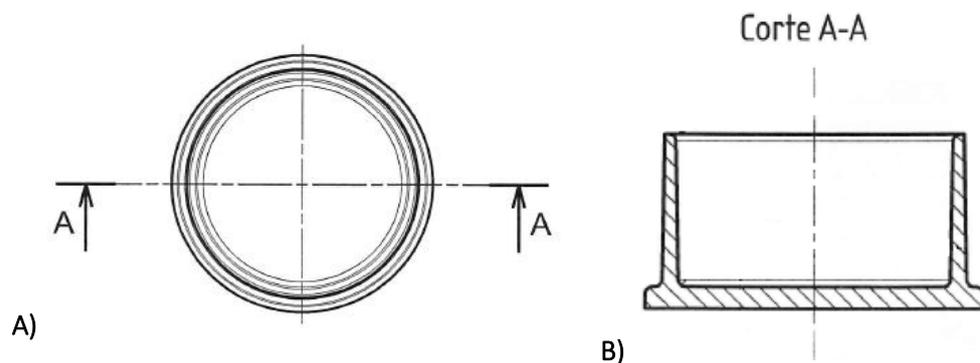


FIGURA 20 – DESENHO TÉCNICO DA TAMPA: A) VISTA DE CIMA; B) VISTA EM CORTE.

Assim, considera-se o processo de concetualização terminado. Acoplando todas as peças projetadas tem-se, assim, uma estrutura física capaz de ser implementada como um solenóide de  $24 V_{ac}$ , Figura 21.

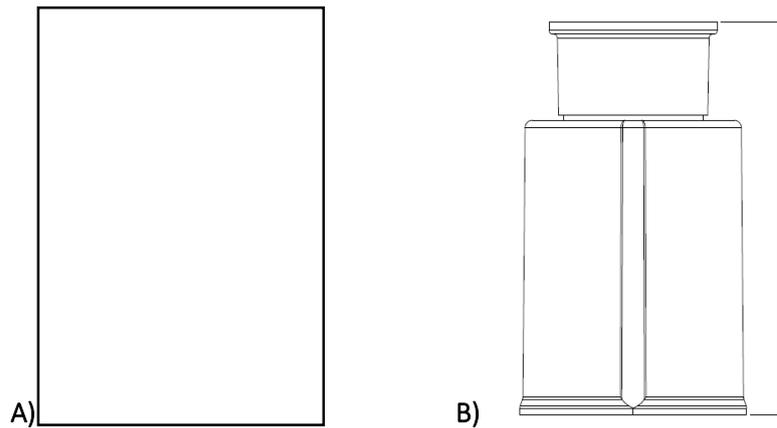


FIGURA 21 – DESENHO TÉCNICO DO SOLENÓIDE: A) VISTA EM CORTE COM TODOS OS COMPONENTES; B) VISTA DE FRENTE.

### 3.2. PRODUÇÃO DE PEÇAS PLÁSTICAS

Atualmente, são utilizados variados processos para a transformação de granulados e *pelletes* de plástico em produtos de múltiplas formas. O processo utilizado depende, em grande parte, do tipo de plástico que se pretende transformar. Existem duas classes de plásticos: os termoplásticos e os termoendurecíveis. No caso dos termoplásticos, estes são normalmente aquecidos até amolecerem e, seguidamente, são reenformados antes de arrefecerem totalmente. Os termoendurecíveis são um tipo de plásticos que não polimerizam completamente antes do seu processamento na forma final, por isso é usado um processo em que ocorre uma reação química que conduz à formação das ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, dando origem a um material polimérico reticulado. Portanto, a polimerização final ocorre por aplicação de calor e de pressão ou por ação de um catalisador, à temperatura ambiente ou a temperaturas mais elevadas.

O suporte físico do solenóide é feito através de componentes plásticos produzidos pelo processo de moldagem por injeção. Esta técnica é uma das mais importantes para dar forma a materiais termoplásticos. Os equipamentos atuais de moldagem por injeção utilizam o mecanismo do parafuso móvel para fundir o plástico e proceder à sua injeção num molde. Este mecanismo apresenta diversas vantagens em relação ao mecanismo utilizado nos equipamentos mais antigos, que utilizavam um êmbolo para injetar o plástico, em que a mais importante reside na obtenção de um fundido mais homogéneo.

No processo de moldagem por injeção com parafuso móvel, o granulado de plástico é descarregado para o alimentador da máquina de moldagem de plásticos sobre um parafuso rotativo. Este granulado é fundido à medida que se desloca no parafuso rotativo e, quando a quantidade de fundido é suficiente, o parafuso para de rodar. Posteriormente, move-se, bruscamente, para a frente e injeta o plástico fundido no sistema de alimentação, através de uma abertura e, em seguida, na cavidade do molde fechado. Depois, o parafuso é recolhido e peça plástica acabada é ejetada, Figura 22.

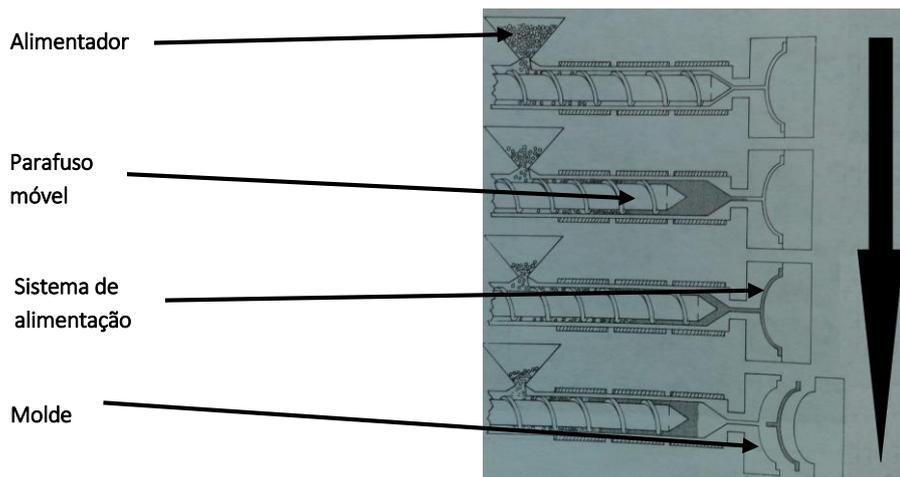


FIGURA 22 – OPERAÇÕES DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO (SEQUÊNCIA) [15].

O elemento fundamental da máquina de moldagem por injeção, Figura 23, é o molde. Este é, normalmente, constituído por duas partes (duas metades) que se combinam para formar uma cavidade 3D que forma as superfícies exteriores do objeto moldado (ciclo de produção de unidade única). É também possível criar moldes com várias cavidades, com o objetivo de produzir mais do que uma unidade no mesmo ciclo. Uma das partes do molde é montada sobre uma placa fixa, enquanto que a outra é móvel, permitindo assim que as duas metades possam ser acopladas (molde fechado) ou desacopladas (molde aberto). A unidade de fixação mantém o molde fechado durante a injeção, sendo que é necessário uma força que exceda a pressão de injeção de modo a evitar que o molde se abra enquanto o fundido está a ser injetado e para que a pressão na cavidade se conserve. A temperatura do molde é controlada por um sistema de arrefecimento que, normalmente, utiliza água como fluido circulante [12].

Após a injeção, o material fundido arrefece ou solidifica no molde e, quando está suficientemente endurecido, é ejetado através dos pinos localizados na parte móvel do molde. No entanto, a peça moldada pode requer um tratamento de cura, a fim de adquirir as suas características mecânicas finais. Esta cura é conhecida como encolhimento e pode ocorrer dentro do molde ou após a ejeção, sendo que esta deformação pode consistir numa flexão ou numa torção do objeto, resultando assim em alterações de forma bidimensional, podendo ser considerado como um encolhimento não uniforme [13,14].

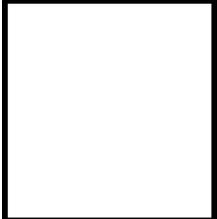


FIGURA 23 – MÁQUINA DE INJEÇÃO POR MOLDAGEM COM PORMENOR DO MOLDE DE INJEÇÃO (ABERTO)

As peças plásticas, base da bobine, corpo do solenóide e tampa, usadas na conceção do solenóide de 24 V<sub>ac</sub> foram produzidas pelo processo de injeção por moldagem. O perfil de injeção de cada peça é apresentado na tabela seguinte, bem como o molde correspondente a cada uma delas.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE INJEÇÃO.

Componente	Molde	Matéria-prima	Temperatura do bico (T <sub>máx</sub> ) (°C)	Velocidade de injeção (mm/s)	Pressão de injeção (bar)	Tempo de ciclo (s)	Tempo de arrefecimento (s)
		PA6*	250	140	120	18	9

		PA66 + 30% FV**	320	120	150	19	10
		PEBD***	--	--	--	--	--

\* PA6 – Poliamida.

\*\*PA66 + 30% FV – Poliamida reforçada com 30% de fibra de vidro.

\*\*\*PEBD – Polietileno de baixa densidade.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DO NÚCLEO DO SOLENÓIDE

Como foi referido no Capítulo 1, dentro dos materiais ferromagnéticos que podem constituir o núcleo de um solenóide, existem os ferromagnéticos macios e os duros. Tendo em conta o objetivo deste trabalho, a escolha do material que constitui os núcleos do solenóide de 24 V<sub>ac</sub> foi minuciosa e foram estudados diversos tipos de materiais magnéticos, particularmente ligas de ferro (aços), para que o material ideal respondesse às necessidades da aplicação. Uma vez que o foco de aplicação destes solenóides é o controlo de fluxo de água em electroválvulas, os seus núcleos terão de apresentar, principalmente, facilidade no processo de magnetização e desmagnetização, para que a electroválvula possa ser aberta ou fechada num curto espaço de tempo (na ordem dos milissegundos). Assim, com os equipamentos disponíveis na Universidade de Aveiro para caracterização morfológica e estrutural de materiais e considerando a informação que existe acerca de materiais mais utilizados na indústria e para projetos de engenharia, foi possível, entre vários, escolher um material ferromagnético macio para a construção dos núcleos dos solenóides de 24 V<sub>ac</sub>.

A primeira das técnicas de caracterização utilizada foi a difração de raios-X, Figura 24. Esta é uma técnica de análise microestrutural e foi realizada com recurso ao difratómetro *Empyrean*, que opera a uma corrente de 45 mA e a uma tensão de 40 kV, com incidência monocromática da linha  $K\alpha$ ,  $\lambda_{K\alpha} = 1,54060 \text{ \AA}$ . O registo do difratograma foi efetuado à temperatura ambiente com um varrimento contínuo de  $2\theta$  entre 35° e 100° com um passo de 0,03°.

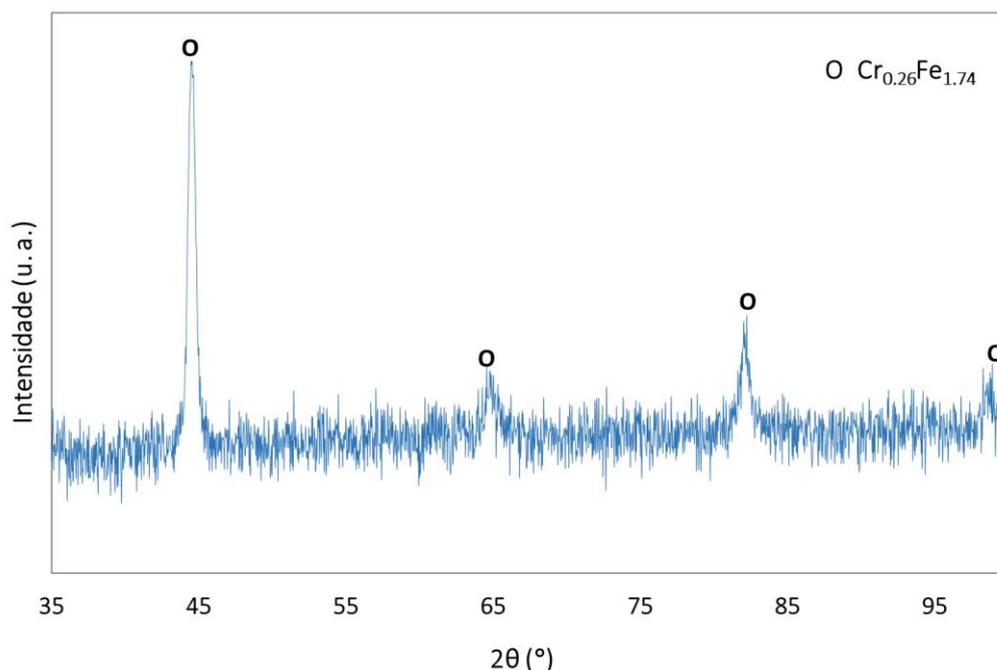
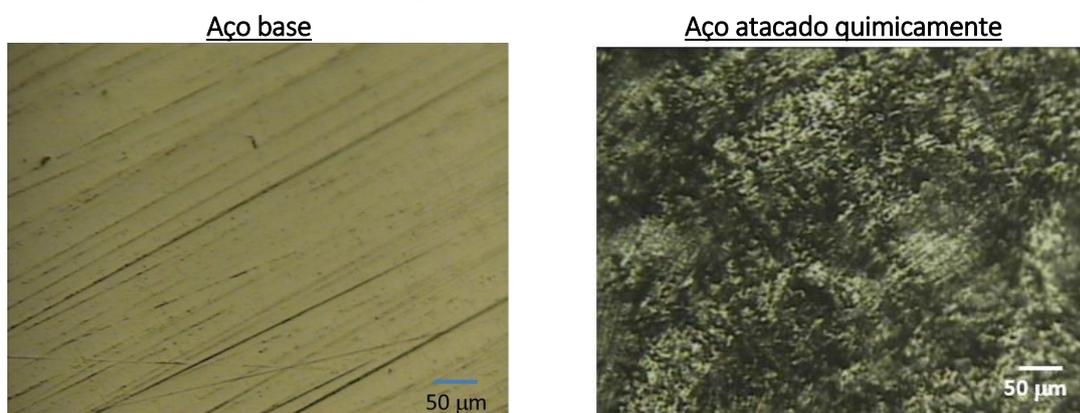


FIGURA 24 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X OBTIDO PARA O MATERIAL CONSTITUINTE DO NÚCLEO DO SOLENÓIDE.

Através dos dados reportados na literatura [14] em conjunto com a análise do difratograma foi possível concluir, que os picos de difração são característicos de um aço inoxidável ferrítico pela presença da fase  $\text{Cr}_{0,26}\text{Fe}_{1,74}$ , podendo assim ser considerado uma liga binária de ferro-crómio.

Após esta análise, foi relevante estudar a resistência deste material à corrosão/oxidação, uma vez que os solenóides produzidos serão, principalmente, aplicados em sistemas de rega, o que implica que o núcleo do solenóide vai estar em permanente contacto com a água muitas vezes contendo produtos químicos associados à fertilização agrícola, o que poderá ser um dos principais agentes envelhedores do material que constitui o núcleo. Para o efeito, amostras do aço foram condicionadas a um ambiente ácido, usando uma solução aquosa com 20%  $\text{HNO}_3$  + 1%  $\text{HF}$ , por um período de tempo até 80 horas, à temperatura ambiente.

A análise deste ataque químico foi realizada através de microscopia ótica e eletrónica. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos por microscopia ótica da amostra base e da atacada quimicamente e a Figura 26 as micrografias dessas amostras, utilizando o microscópio eletrónico de varrimento *TESCAN-Vega III*.



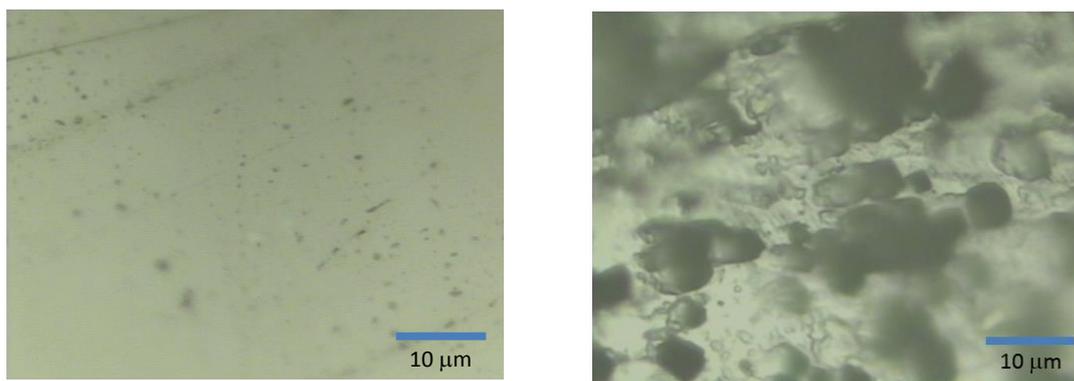


FIGURA 25 - IMAGENS ÓTICAS DA SUPERFÍCIE DO AÇO.

Pelas imagens de microscopia ótica, pode observar-se que a superfície do material sofre oxidação quando este é atacado quimicamente. Na primeira imagem obtida para o aço base, são visíveis riscos na superfície da amostra, resultantes do processo de polimento da mesma. Na segunda imagem, para além desses riscos, observa-se que a superfície do aço contém alguns buracos, o que mostra indícios de corrosão mesmo estando o material apenas em contacto com o ar. Para a amostra de aço atacada quimicamente, é visível que a sua superfície sofre oxidação e que os buracos existentes na superfície da amostra base, aumentam de tamanho, comprovando, assim, a corrosão deste material quando exposto a um ambiente ácido.

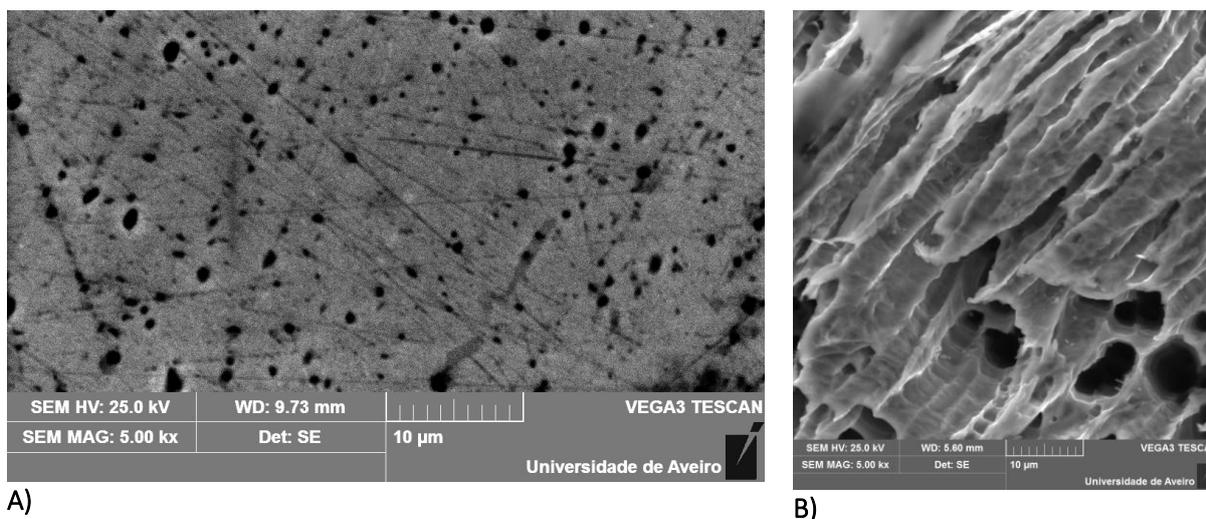


FIGURA 26 – MICROGRAFIAS DE SEM DA SUPERFÍCIE DO AÇO: A) AÇO BASE; B) AÇO ATACADO QUIMICAMENTE.

Pelas micrografias realizadas à superfície das amostras, comprova-se o que foi observado através da microscopia ótica. Existem, de facto, buracos na superfície da amostra base e estes aumentam o seu tamanho quando a amostra é atacada quimicamente. No entanto, este aumento poderia ser maior se não se tratasse de um aço inoxidável ferrítico, em que a presença de crómio na sua composição promove a formação de um óxido superficial que protege a corrosão da liga.

Através da análise de EDX foi possível obter a percentagem dos constituintes do aço, Tabela 3.

TABELA 3 – PERCENTAGENS DE COMPONENTES CONSTITUINTES DA LIGA.

	Fe	Cr	C	Si
Obtidas pelo EDX	80,5 %	16,0 %	2,80 %	0,70 %
Informação do fabricante	-	16 % - 18 %	0,8 % (máx)	-

Comparando os resultados obtidos com os reportados na literatura [2], conclui-se que a percentagem de crómio presente nesta liga é característica de um aço inoxidável ferrítico, como era esperado, teoricamente e pela informação fornecida pelo fabricante.

Posteriormente, foi realizada uma análise das propriedades magnéticas do aço com recurso ao magnetómetro de amostra vibrante, *VSM*. O princípio de funcionamento deste equipamento consiste num vibrador, responsável pela vibração da amostra, que se encontra junto de bobines que funcionam como sensores na presença de um campo magnético externo. A tensão induzida nessas bobines é proporcional ao momento magnético da amostra que depende do valor do campo magnético externo aplicado. O *VSM* opera segundo o princípio de indução da lei de Faraday. A medição do momento magnético é obtida através da deteção da força eletromotriz induzida produzida pela vibração da amostra magnetizada nas bobines. Estas bobines estão colocadas em sentidos opostos (oposição de fase) e no centro está colocada a amostra a vibrar. A força eletromotriz induzida é medida através de um amplificador *lock-in* utilizando o sinal vibrador como sinal de referência. Através da medição desta tensão em função do campo magnético aplicado, a uma temperatura fixa, obtém-se uma curva de histerese, Figura 27.

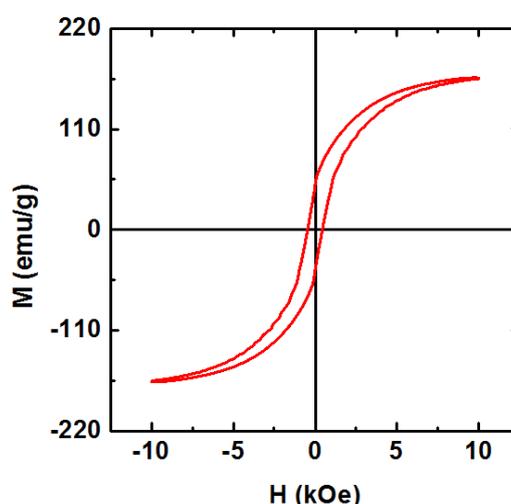


FIGURA 27 – CURVA DE HISTERESE OBTIDA PARA O MATERIAL CONSTITUINTE DO NÚCLEO DO SOLENÓIDE.

A Figura 27 representa a curva de histerese característica do aço que constitui o núcleo do solenóide. Observa-se que esta é estreita e longa, isto é, o valor do campo coercivo é baixo, a ordem de 14,23 kOe, o que permite caracterizar este aço como um material ferromagnético macio.

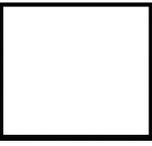
# CAPÍTULO 4 | PROTOTIPAGEM

## 4.1. COMPONENTES FÍSICOS

Após a etapa de conceção, descrita no capítulo anterior, todos os elementos constituintes do solenóide de 24 V<sub>ac</sub> foram prototipados e produzidos de forma a cumprirem as características e necessidades definidas.

Na tabela seguinte são apresentados todos os componentes, assim como a função que cada um desempenha.

**TABELA 4 – COMPONENTES DO SOLENÓIDE E RESPETIVAS FUNÇÕES.**

Componente		Função
Núcleo Fixo		Concentrar as linhas de campo magnético gerado pela bobine, permitindo uma melhor atração do núcleo móvel. Limitar o curso do núcleo móvel.
Núcleo Móvel		Abertura do orifício de controlo da válvula mediante o seu deslocamento para o interior do solenóide. Este deslocamento é provocado pela atração do campo magnético gerado pela bobine.
Mola		Assegurar o movimento de desatracação do núcleo móvel quando não existe fluxo de corrente.
Vedante		Assegurar o fecho do orifício de controlo de abertura da válvula.
o-Ring		Vedar a rosca do solenóide quando este é acoplado à electroválvula.
Anel de Cobre		Armazenar uma pequena quantidade de corrente eléctrica induzida pela variação de fluxo magnético de modo a produzir um pequeno campo magnético que irá atenuar a vibração inerente provocada pela inversão da onda de corrente AC

Armadura		Otimizar o fluxo magnético no interior do solenóide.
Cápsula		Encapsular o solenóide. Funciona como suporte exterior de todos os componentes que constituem o solenóide.
Base da Bobine		Suportar e/ou guiar os restantes componentes que constituem o solenóide. Esta peça é o “esqueleto” do solenóide
Tampa		Fechar a extremidade superior do solenóide, permitindo o seu transporte sem perda do núcleo móvel.
Cabos elétricos		Permitir a ligação do solenóide à corrente elétrica.

## 4.2. ETAPAS DE MONTAGEM

Para o desenvolvimento do solenóide de 24 V<sub>ac</sub> foram definidas várias etapas de montagem, entre as quais, seis são fundamentais. Todas as etapas foram realizadas com auxílio de equipamentos existentes nas instalações da empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda.

### 1. Cravação

A primeira etapa consiste na cravação do anel de cobre no núcleo fixo e, em seguida, na cravação deste conjunto na base da bobine, Figura 28. Esta cravação é feita com o auxílio de uma prensa mecânica, *EMG X3 – 4HR*.

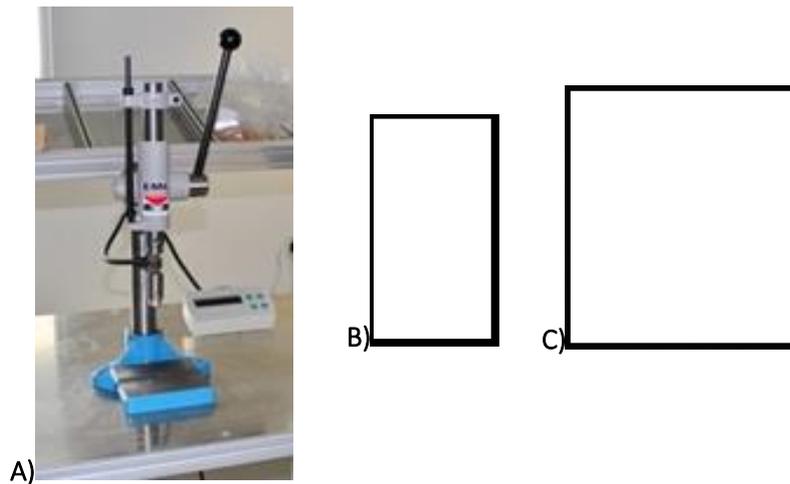


FIGURA 28 – CRAVAÇÃO: A) PRENSA MECÂNICA; B) NÚCLEO MÓVEL E ANEL DE COBRE; C) CONJUNTO BASE DA BOBINE + ANEL DE COBRE + NÚCLEO FIXO.

## 2. Bobinagem

A bobinagem consiste no enrolamento do fio de cobre em torno da base da bobine. O enrolamento é feito utilizando um equipamento eletrônico, *EL GROUPE X3 100 – 33*, onde é possível definir o número de voltas pretendido (número de espiras,  $N$ ) e a velocidade de enrolamento, Figura 29.

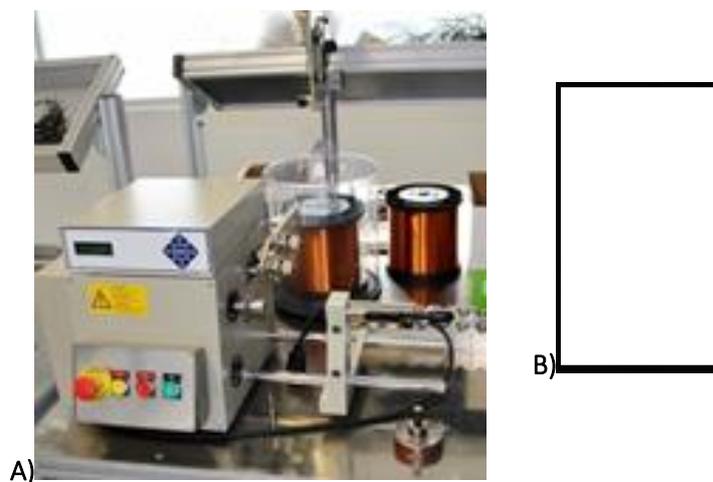


FIGURA 29 – BOBINAGEM: A) MÁQUINA DE BOBINAR; B) ENROLAMENTO À VOLTA DA BASE DA BOBINE.

## 3. Soldagem

Esta etapa consiste em soldar os cabos elétricos às pontas do solenóide provenientes da bobinagem, Figura 30. Salienta-se que nesta etapa poderá ser necessário, de acordo com o tipo de fio, retirar o verniz isolante que este tem. Neste caso, uma pré- etapa de decapagem das extremidades do fio de enrolamento terá de ser efetuada por via mecânica, térmica ou química.

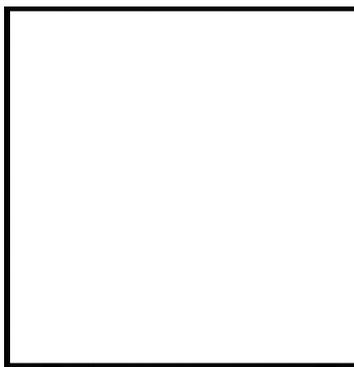


FIGURA 30 – SOLENÓIDE COM CABOS E ARMADURAS.

#### 4. Enchimento

Após a colocação das armaduras e da cápsula do solenóide, a etapa seguinte tem o objetivo de isolar e incapsular todos os componentes do solenóide. Este processo é feito com o auxílio de um equipamento dispensador de misturas, *GRACO PR70v*, que através de um misturador estático permite o encapsulamento preciso dos solenóides, Figura 31. O equipamento contém dois tanques, num deles é colocada a resina (poliuretano) e no outro é colocado o secante (isocianato) que, posteriormente, são misturados na proporção de 3:1 e injetados no corpo do solenóide.

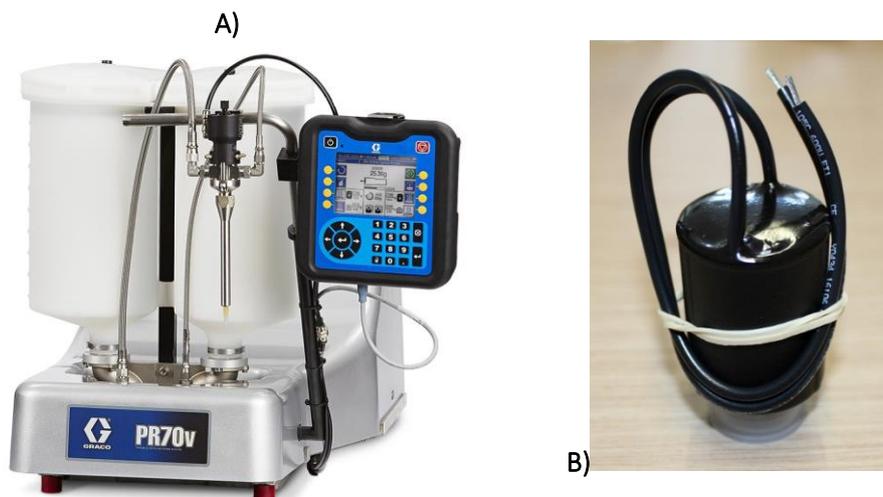


FIGURA 31 – A) DISPENSADOR DE MISTURAS; B) SOLENÓIDE ENCAPSULADO.

#### 5. Cura

O processo de cura da resina usada para encapsulamento é dividido em dois estágios: o primeiro, cura, é realizado à temperatura ambiente num período mínimo de 24 horas, garantindo que a resina solidifica completamente; o segundo é a pós-cura, em que os solenóides são submetidos a uma temperatura de 60° C durante 15 horas. Este último estágio é realizado numa estufa com circulação forçada, *ESCO ISOTHERM, Forced Convection Laboratory Oven*, Figura 32, e tem como objetivo garantir que a polimerização da resina de enchimento é concluída, sendo por isso utilizada uma temperatura superior à temperatura ambiente.



FIGURA 32 – ESTUFA.

#### 6. Rotulagem/ Marcação

O processo de rotulagem ou marcação consiste em imprimir a informação acerca do solenóide na sua superfície exterior. Esta informação pode conter a marca, o número do lote a que pertence o solenóide e características técnicas, como a voltagem de funcionamento, a pressão máxima de funcionamento, entre outras. Para o efeito é utilizada uma impressora de codificação e marcação industrial, *HITACHI PXR 460 W*, Figura 33.



FIGURA 33 – IMPRESSORA PARA ROTULAGEM DOS SOLENÓIDES.

### 4.3. ESTUDO DO CAMPO NO SOLENÓIDE

Com o objetivo de confirmar que o campo magnético no interior do solenóide é uniforme e que aumenta com a introdução do núcleo, neste caso o núcleo fixo, e das armaduras metálicas, foram realizadas medidas do campo magnético em função do deslocamento, espaço percorrido pelo gaussímetro no interior do solenóide, que não é mais que uma sonda de *Hall*. Sabendo que, pelo efeito de *Hall*, num fio condutor, percorrido por uma corrente elétrica e sujeito a um campo magnético perpendicular a essa corrente, os portadores de carga sofrem um desvio por ação da força magnética, então, se o valor do fluxo magnético for aumentado por ação de agentes externos, a densidade desses portadores de carga será

mais elevado [15]. Para verificar esse efeito foi utilizado um gaussímetro *MAGSYS HANDGAUSSMETER*, com a função de sonda de Hall e foram realizadas quatro medidas distintas ao solenóide: com armaduras e com núcleo, com armaduras e sem núcleo, com núcleo e sem armaduras e sem núcleo e sem armaduras, Figura 34.

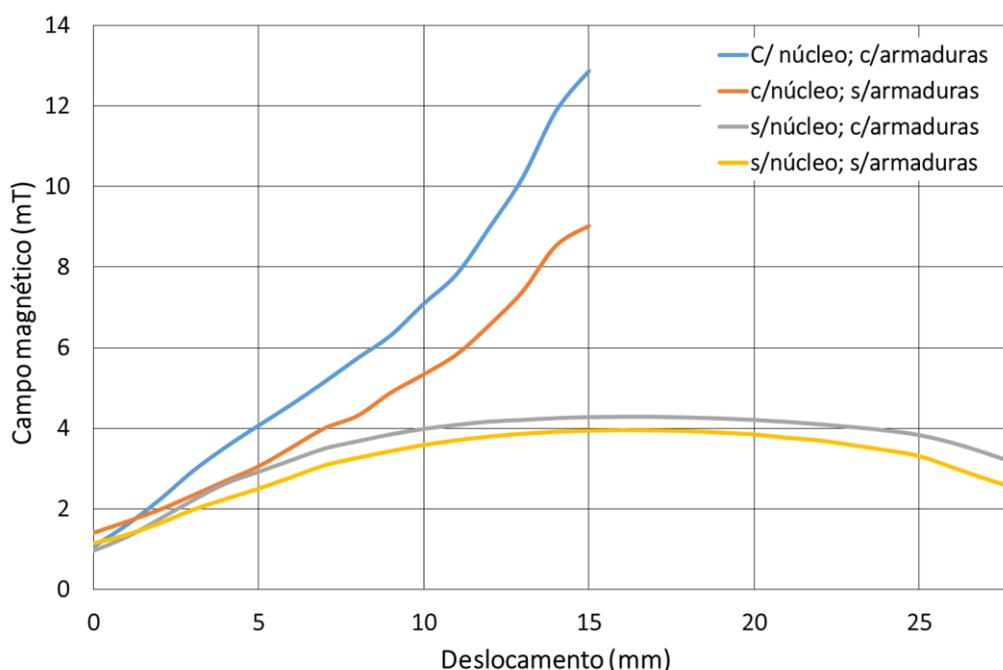


FIGURA 34 - CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DO SOLENÓIDE.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que o valor do campo no interior do solenóide é máximo quando a sonda de Hall se encontra exatamente na posição central do solenóide. Também se verifica que este valor aumenta com a introdução do núcleo fixo e que é ainda mais elevado quando se colocam as armaduras metálicas. Assim, mostra-se que, de facto, as armaduras metálicas têm a função de concentrar o fluxo magnético dentro do solenóide.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO SOLENÓIDE

No seguimento da conceção, da produção e aquisição de componentes físicos e do planeamento das etapas de construção dos solenóides de 24 V<sub>ac</sub>, foi necessário realizar um estudo de modo a aprimorar pormenores para a obtenção do melhor solenóide. Parâmetros como a temperatura, pressão e consumo energético do solenóide em funcionamento, determinam a geometria de alguns componentes físicos que o constituem. Este estudo foi realizado com o auxílio de um dispositivo de ensaio para solenóides, DES, desenvolvido na empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda., Figura 35.



FIGURA 35 – DISPOSITIVO DE ENSAIO DE SOLENÓIDES.

Assim, o primeiro parâmetro que foi estudado foi a temperatura máxima de funcionamento que o solenóide atinge, utilizando bobines com diferentes números de espiras. Foram realizados ensaios com a duração de duas horas onde o número de espiras,  $N$ , variou entre 1600 e 2000, Figura 36. Também foram, igualmente, testados solenóides “concorrentes” das marcas *Baccara* e *Orbit*.

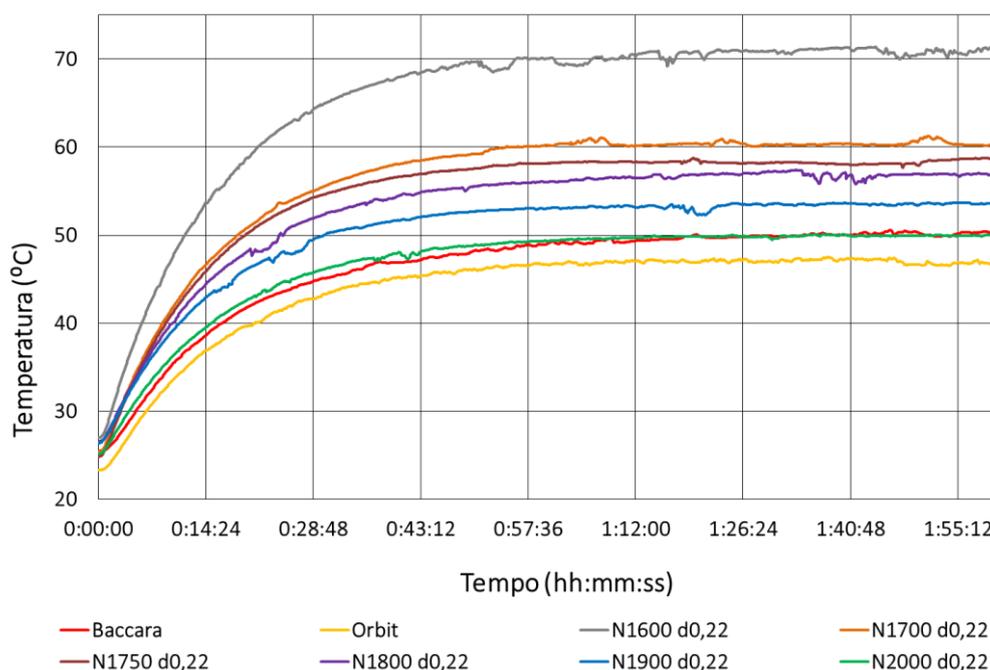


FIGURA 36 – GRÁFICO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Através da análise da Figura 36, conclui-se que os enrolamentos de 1900 e 2000 são aqueles que apresentam uma temperatura de funcionamento mais próxima dos solenóides concorrentes, sendo que, o mais próximo é o de 2000 espiras. Os restantes, atingem temperaturas mais elevadas, entre os 65° e os 73° C, o que não é apreciável nestes solenóides, uma vez que a variação de temperatura pode ser causada por uma menor estabilidade eletromecânica (maior vibração do núcleo móvel quando o solenóide está ligado) e, além disso, uma temperatura mais alta indica um consumo de corrente mais elevado.

O segundo parâmetro estudado foi o consumo de energia elétrica. Os ensaios foram realizados, novamente, durante duas horas também em função do número de espiras tal como no teste anterior, Figura 37.

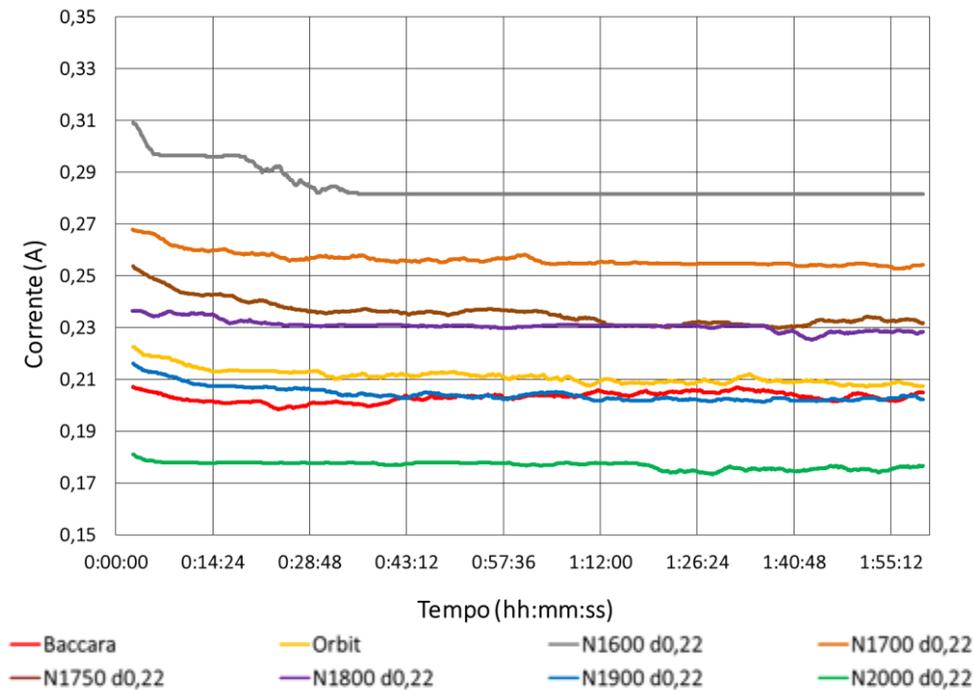


FIGURA 37 – GRÁFICO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Analisando o gráfico apresentado pela Figura 37, podemos ver que dos seis solenóides testados, os que apresentam um consumo de corrente elétrica mais aproximado dos solenóides das marcas comercializadas é o de 1900 espiras. No entanto, o solenóide de 2000 espiras apresenta um consumo inferior a qualquer um dos outros.

Por fim, testou-se o parâmetro estabilidade eletromecânica do solenóide, isto é, a vibração do núcleo móvel quando o solenóide está ligado, Figura 38. O ensaio foi realizado nas mesmas condições que os ensaios anteriores.

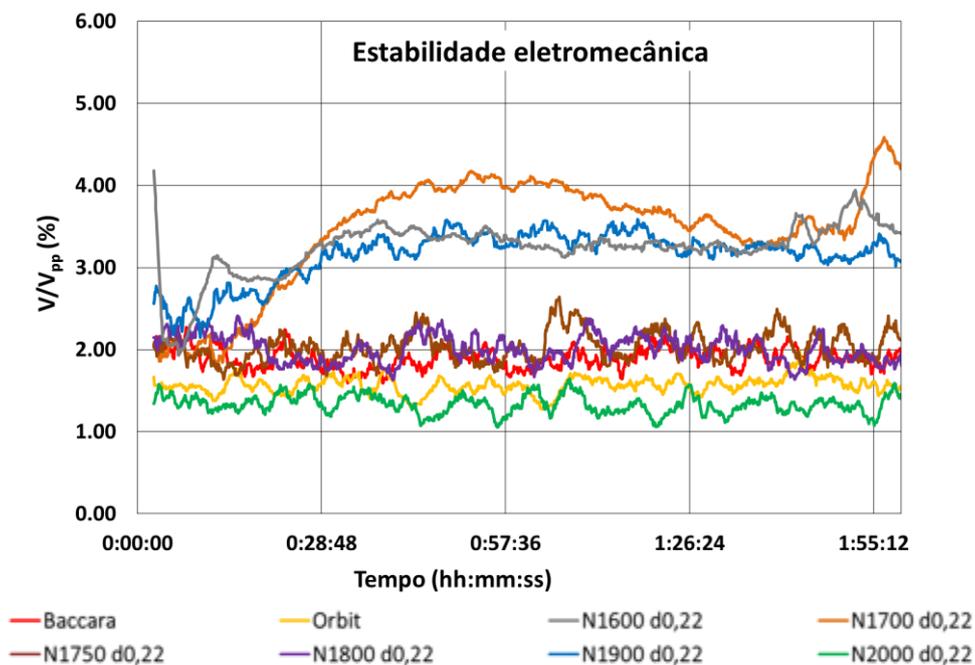


FIGURA 38 – GRÁFICO DA ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA DO NÚCLEO MÓVEL EM FUNÇÃO DO TEMPO.

No caso do teste que verifica a estabilidade mecânica do núcleo móvel, os solenóides de 1750 e 1800 espiras são aqueles que apresentam valores mais próximos dos solenóides das marcas *Baccara* e *Orbit*. O solenóide de 2000 espiras apresenta valores de vibração inferiores a todos os outros.

Por inspeção direta dos gráficos anteriormente apresentados, poderíamos dizer que o solenóide ideal seria o que tem um enrolamento de 2000 espiras, pois é aquele que apresenta menor temperatura de funcionamento, menor consumo de corrente e maior estabilidade eletromecânica comparado com os solenóides de 24 V<sub>ac</sub> das marcas concorrentes. No entanto, neste contexto empresarial é também avaliado o custo de produção de cada solenóide, sendo que produzir um solenóide com 2000 espiras é mais dispendioso do que produzir um solenóide com 1900, que também é capaz de responder às necessidades do mercado. Além disso, o solenóide com um enrolamento de 2000 espiras tem mais volume do que qualquer outro enrolamento, o que leva, após o processo de cura da resina de encapsulamento, a uma ovalização da cápsula exterior do solenóide. Esta situação poderia ser contornada através do aumento do diâmetro da cápsula do solenóide, mas assim as suas dimensões seriam diferentes às estipuladas industrialmente para este tipo de solenóides e para a aplicação em distribuição de águas, uma vez que o seu acoplamento às válvulas seria, desta forma, dificultado. Portanto, assumiu-se que o solenóide que cumpre os requisitos de eficiência de produção é aquele que tem um enrolamento de 1900 espiras.

Estando fixo o número de espiras para a produção dos solenóides, podem agora variar-se outros parâmetros de forma a tornar este produto mais versátil, como por exemplo, responder a diferentes pressões máximas de funcionamento. Um deles é o tamanho dos núcleos. Mantendo o núcleo fixo inalterável se aumentar o móvel, diminui-se o percurso que este tem de realizar quando é atraído para o núcleo fixo, sendo assim capaz de vencer uma maior força de pressão exercida pelo fluido. Com isto, foram definidas duas pressões de funcionamento: 4 bar, que é a pressão normal para a maior parte dos sistemas de rega; e 12 bar, uma vez que as válvulas às quais serão acoplados os solenóides, são normalizadas a uma pressão nominal de 10 bar e, por isso, é necessário que os solenóides garantam o bom funcionamento das válvulas para esse valor de pressão.

**TABELA 5 – COMPRIMENTO DO NÚCLEO MÓVEL E RESPATIVAS PRESSÕES MÁXIMAS DE FUNCIONAMENTO.**

<b>Nº de Espiras (N)</b>	<b>Núcleo Móvel (mm)</b>	<b>Pressão Máxima (bar)</b>
<b>1900</b>	A	4
	B	12

De forma a garantir o bom funcionamento do solenóide após a introdução desta nova variante, foram realizados, novamente, testes com recurso ao DES, Figuras 39 a 44, e os solenóides também foram testados em electroválvulas no laboratório hidráulico existente na empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda.

- $P_{m\acute{a}x} = 4 \text{ bar}$

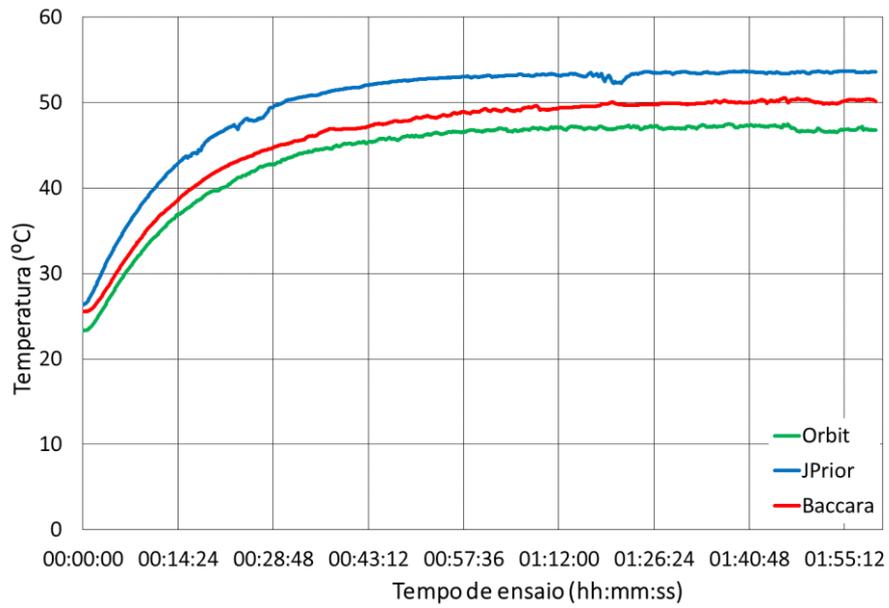


FIGURA 39 – TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO DOS SOLENÓIDES.

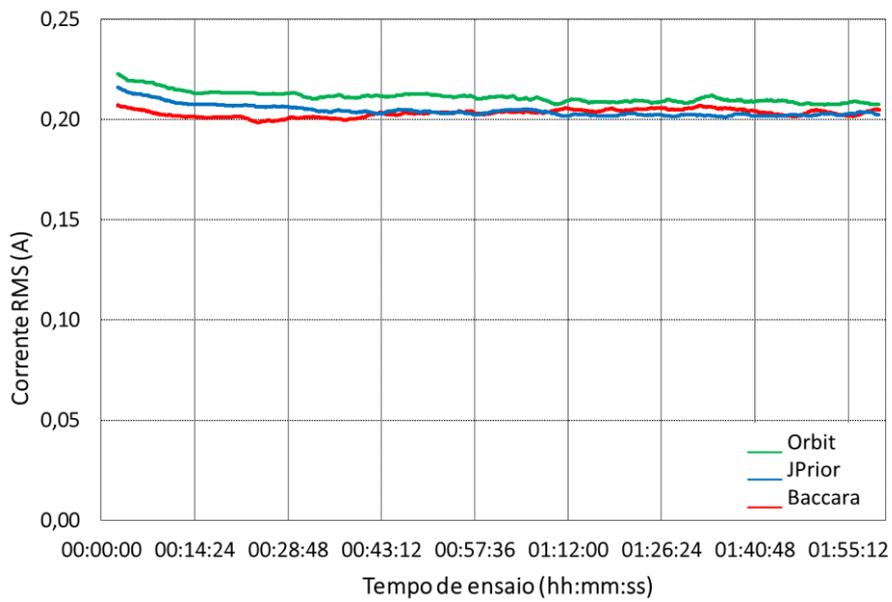


FIGURA 40 – CORRENTE DE CONSUMO DOS SOLENÓIDES.

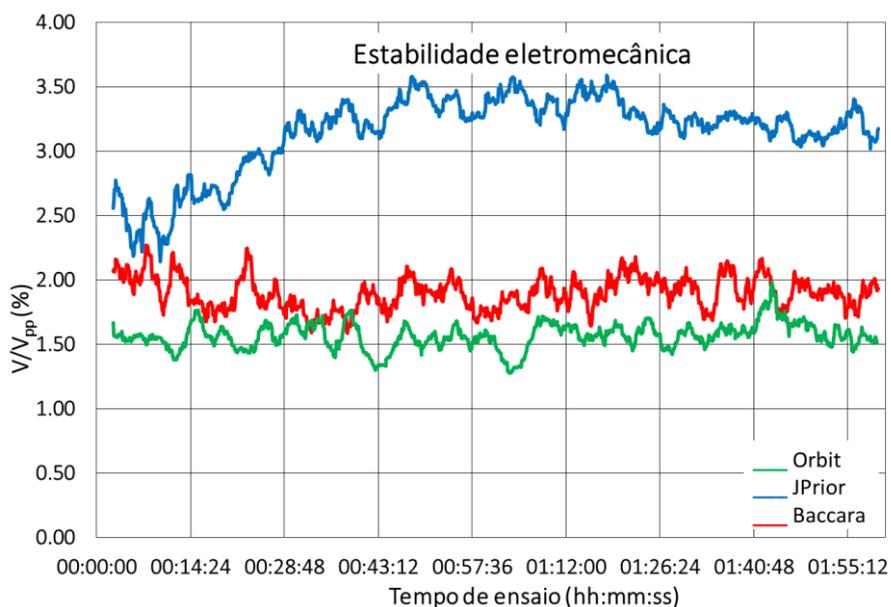


FIGURA 41 – ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA DOS SOLENÓIDES.

Pela análise dos gráficos apresentados pode observar-se que, quando se compara um solenóide com pressão máxima de funcionamento de 4 bar com os solenóides das marcas concorrentes, a temperatura de funcionamento é mais elevada durante todo o período de ensaio. Em relação à corrente consumida verifica-se que esta, no início do ensaio, apresenta valores semelhantes ao consumo dos solenóides concorrentes, mas com o decorrer do tempo, esta tende a diminuir, sendo que no fim do ensaio os valores obtidos para o solenóide de 4 bar são mais baixos. Relativamente à estabilidade eletromecânica, o solenóide produzido apresenta valores menos lineares e mais elevados do que os solenóides concorrentes, ou seja, a vibração do núcleo móvel para uma pressão máxima de 4 bar é maior. Através dos resultados obtidos podemos concluir que, quanto menor for a estabilidade eletromecânica do solenóide, maior será a sua temperatura de funcionamento.

- **$P_{m\acute{a}x} = 12 \text{ bar}$**

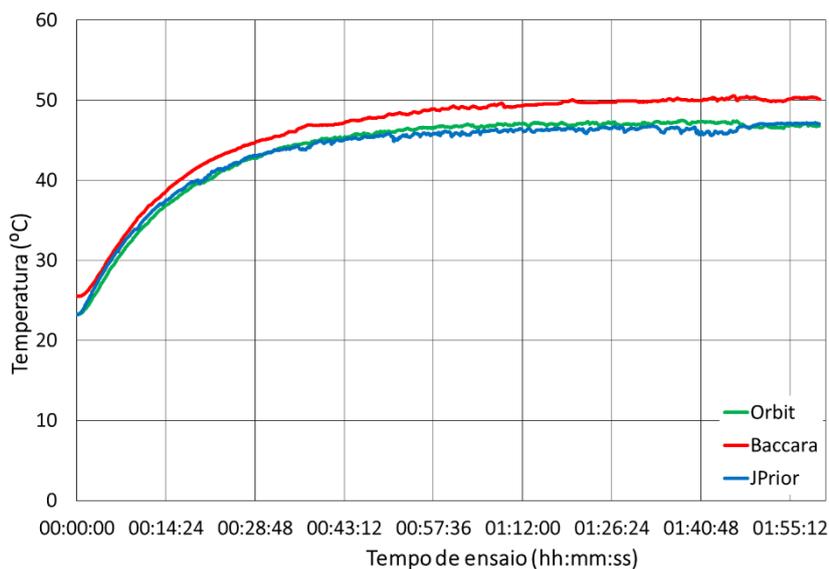


FIGURA 42 - TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO DOS SOLENÓIDES.

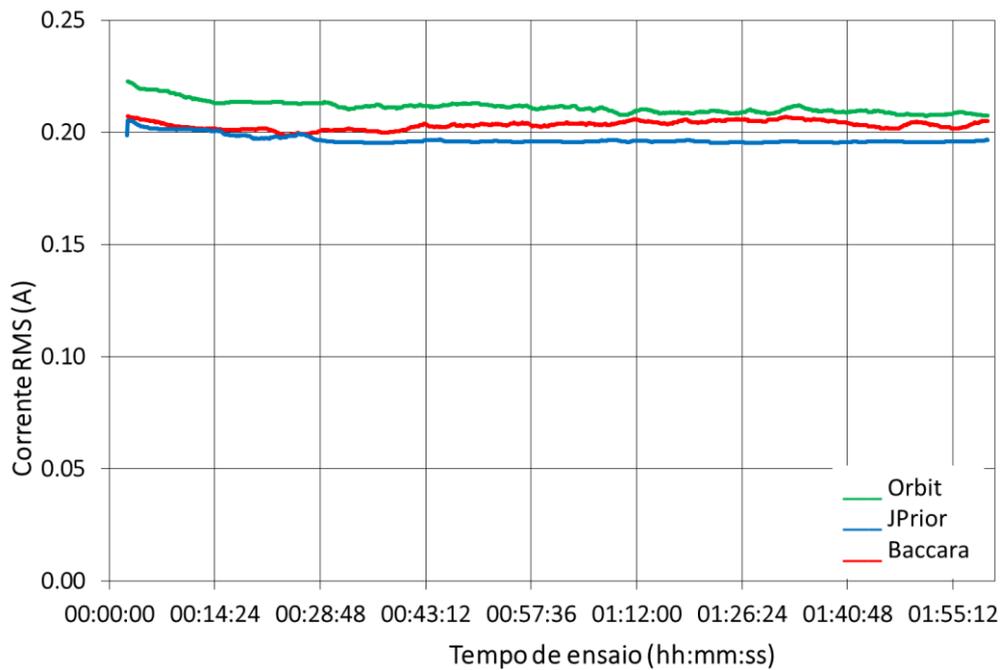


FIGURA 43 – CORRENTE DE CONSUMO DOS SOLENÓIDES.

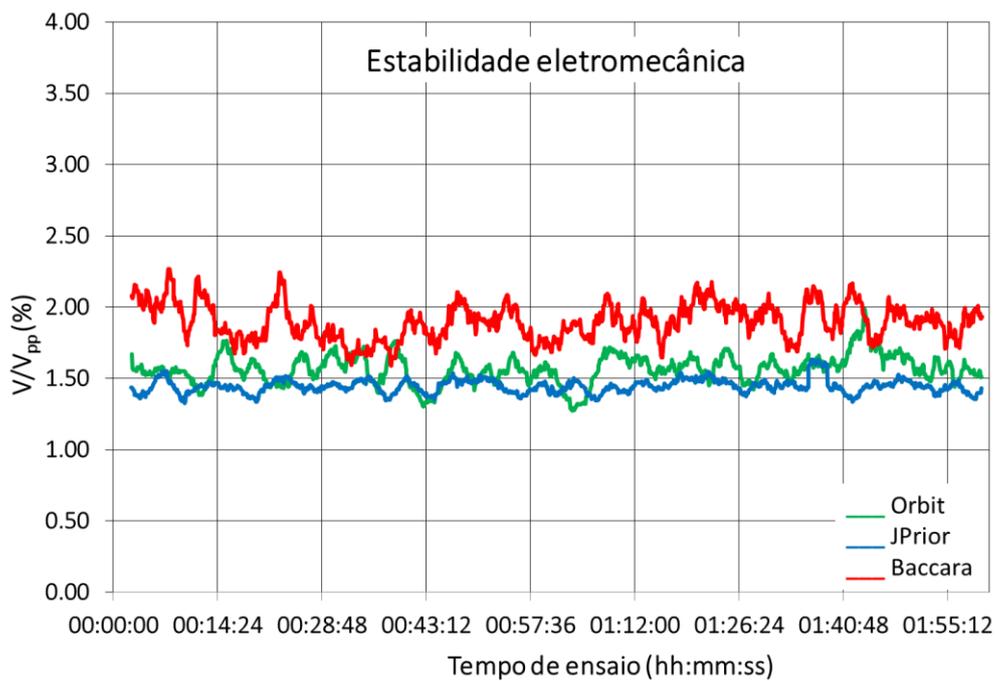


FIGURA 44 – ESTABILIDADE ELETROMECAÂNICA DOS SOLENÓIDES.

Para o solenóide com pressão máxima de funcionamento de 12 bar, por inspeção dos gráficos apresentados, pode concluir-se que os parâmetros de temperatura de funcionamento, corrente de consumo e vibração do núcleo móvel apresentam valores mais baixos do que os solenóides concorrentes. Posto isto, podemos concluir que para uma estabilidade

eletromecânica maior, a temperatura máxima de funcionamento é menor, bem como a corrente de consumo.

Para os testes em electroválvula, com o objetivo de saber qual o tempo de fecho dos solenóides, isto é, quanto tempo demora o núcleo fixo a ser atraído para o núcleo móvel, foram fixados dois parâmetros. Em primeiro, testaram-se os solenóides para um caudal constante de 30 m<sup>3</sup>/h e, que é o caudal máximo de funcionamento para a válvula e, em seguida, manteve-se a pressão constante de 4 bar e de 12 bar, para os solenóides de pressões máximas de funcionamento de 4 bar e de 12 bar, respetivamente, Figuras 45 e 46.

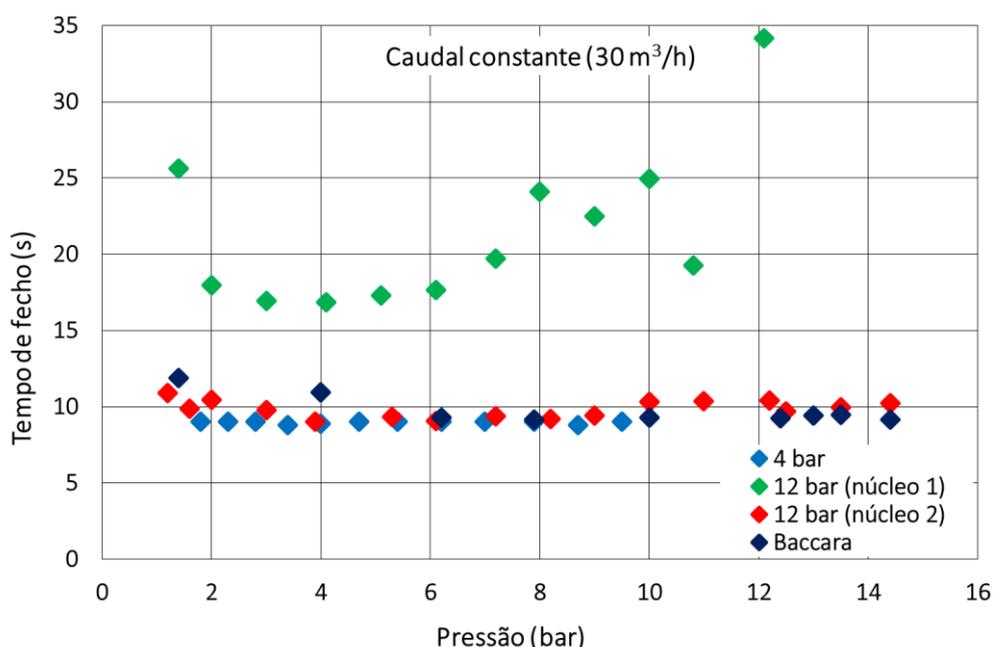


FIGURA 45 – TEMPO DE FECHO DO SOLENÓIDE PARA UM CAUDAL CONSTANTE DE 30M<sup>3</sup>/H.

Para um caudal constante de 30 m<sup>3</sup>/h variou-se a pressão da água entre 0 e 16 bar. Pelo gráfico podemos ver que o tempo de fecho do solenóide com pressão máxima de funcionamento de 4 bar está compreendido entre os 8 e os 9 s. Este foi testado até a uma pressão de 9,8 bar, e verificou-se que para pressões mais elevadas o núcleo móvel não atraca com o núcleo fixo. Uma vez que o comprimento do núcleo móvel deste solenóide é menor do que o comprimento do núcleo móvel para o solenóide de 12 bar, o curso que este tem de realizar no interior do solenóide para permitir a abertura da eletroválvula é maior. Portanto, este não consegue vencer pressões acima dos 10 bar. Para o solenóide com pressão máxima de funcionamento de 12 bar, foram efetuados dois ensaios, uma vez que o primeiro, 12 bar (núcleo 1), apresentava tempos de fecho muito elevados e pouco estáveis relativamente ao que era esperado. Verificou-se, no fim do ensaio, que o vedante que é incorporado no núcleo móvel do solenóide estava fora da sua posição de encaixe normal. Este problema reside, provavelmente, numa deficiência de maquinaria do núcleo móvel, em que a ranhura que se destina ao encaixe do vedante não apresenta as dimensões corretas para que este se mantenha fixo. Consequentemente, o solenóide não permitia a normal abertura e fecho da eletroválvula. Posto isto, realizou-se um segundo ensaio, 12 bar (núcleo 2) que permitiu verificar que o tempo de fecho para o solenóide de 12 bar está incluído no intervalo de 9,00 a 10,87 s. Comparando os resultados com os tempos de fecho medidos para o solenóide da concorrência, compreendidos

entre os 9,83 e 11,87 s, pode dizer-se que os solenóides produzidos apresentam tempos de fecho aceitáveis. Além disso, conclui-se também que, tanto para o solenóide de 4 bar como para o de 12 bar, os tempos de fecho medidos para pressões superiores às pressões máximas de funcionamento a que estes se destinam, têm também um comportamento linear. Isto permite garantir ao mercado que os solenóides funcionam, certamente, às pressões máximas que são indicadas pelo fabricante.

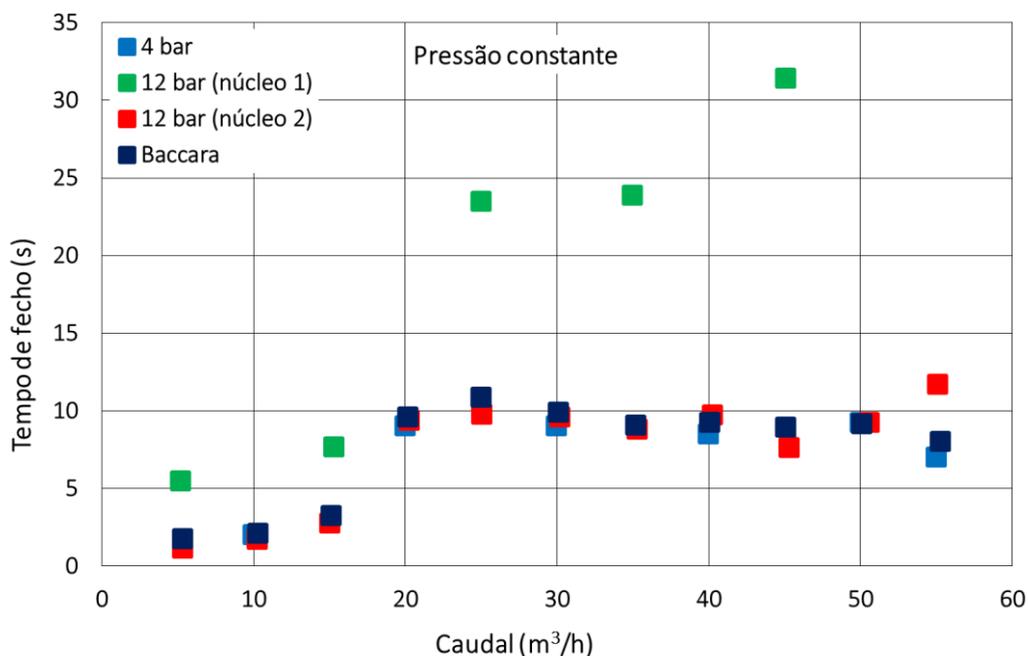


FIGURA 46 – TEMPO DE FECHO DO SOLENÓIDE PARA UMA PRESSÃO CONSTANTE.

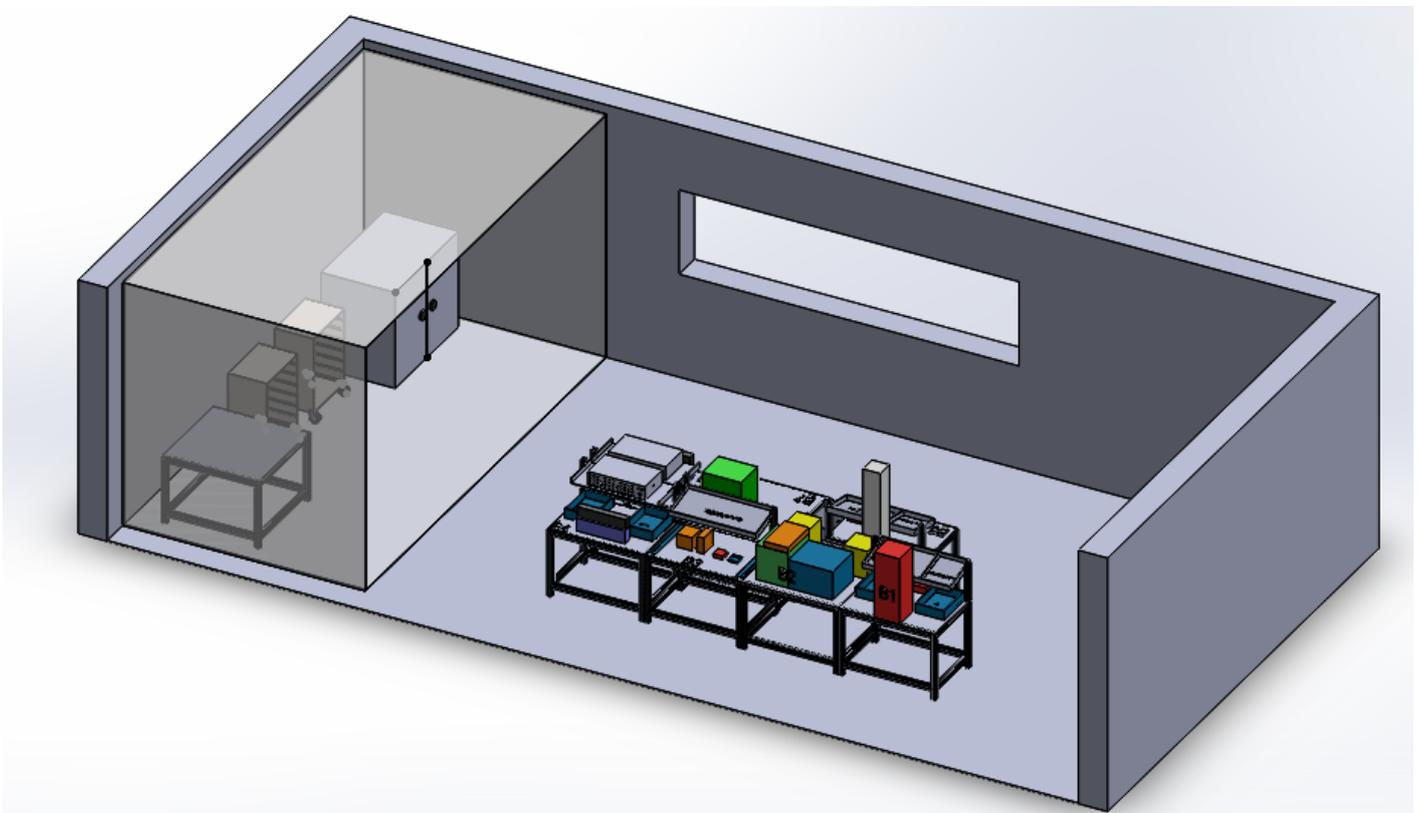
Para uma pressão constante de 4 bar, foi testado o solenóide com pressão máxima de funcionamento de 4 bar e podemos concluir que os tempos de fecho para um caudal entre os 5 e os 15 m³/h, estão compreendidos entre 1 e 4 s. Para caudais entre os 20 e os 55 m³/h, os tempos de fecho para este solenóide variam entre os 7,00 e os 9,75s. Fixando a pressão nos 12 bar, foram, novamente, realizados dois ensaios, pela mesma razão acima apresentada. Conclui-se que o solenóide com pressão máxima de funcionamento de 12 bar apresenta tempos de fecho entre 1,00 e 2,75 s para um caudal inferior a 20 m³/h. Acima desse valor e até aos 55 m³/h, os tempos de fecho variam entre 7,60 e 11,7 s. Comparando estes resultados com os tempos de fecho da concorrência, conclui-se que os tempos de fecho são semelhantes.

## CAPÍTULO 5 | PRÉ INDUSTRIALIZAÇÃO

Para a produção dos solenóides foi criada uma linha piloto de pré industrialização. Esta foi pensada de forma a respeitar as etapas de montagem apresentadas no Capítulo 3, onde foram incluídas mais duas etapas, em diferentes pontos da linha piloto, para a realização de um teste rápido para os solenóides, com o objetivo de garantir que estes, após a produção, estão em boas condições de funcionamento.

A linha de pré industrialização é constituída por oito etapas, associadas a oito bancadas, onde é desempenhada uma função diferente em cada uma delas. Em seguida serão apresentados os desenhos efetuados com recurso a um *software* de modelação de imagens em 3D.

A Figura 47 A) ilustra o projeto de toda a linha de pré industrialização e na figura 47 B) é mostrada uma imagem real da mesma.



A)



B)

FIGURA 47 - VISÃO GERAL DA LINHA PILOTO DE PRÉ INDUSTRIALIZAÇÃO: A) DESENHO DO PROJETO; B) IMAGEM REAL.

A primeira bancada é a da prensagem, onde é cravado o anel de cobre no núcleo fixo e, em seguida, este conjunto é cravado na base da bobine. O bloco apresentado a vermelho, representa a prensa mecânica utilizada neste estágio Figura 48.

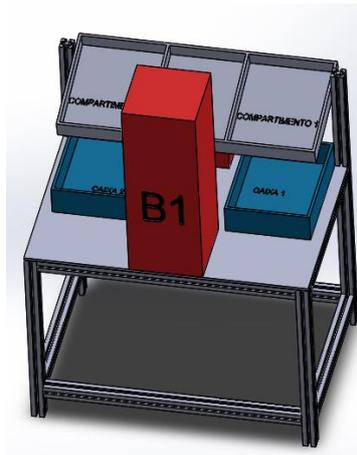


FIGURA 48 – B1: BANCADA DE PrensAGEM.

Na segunda bancada, a etapa desempenhada é a de bobinagem. Nesta bancada é feito o enrolamento do fio de cobre em torno da base da bobine proveniente da primeira bancada, Figura 49. Os blocos coloridos representam os equipamentos e os materiais utilizados nesta etapa. Os blocos amarelos correspondem aos rolos de fio de cobre, os blocos azuis e verdes representam a máquina de bobinagem e a cinzento representa-se o esticador de fio da máquina.

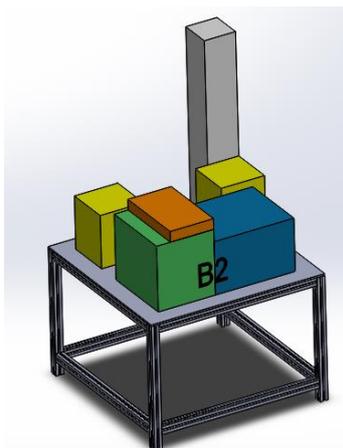


FIGURA 49 – B2: BANCADA DE BOBINAGEM.

A terceira bancada destina-se à etapa de soldagem. Os cabos elétricos são soldados às extremidades do fio de cobre resultante do enrolamento, Figura 50. Estes cabos serão cortados e decapados, previamente, e estarão à disposição do operador na prateleira da bancada.

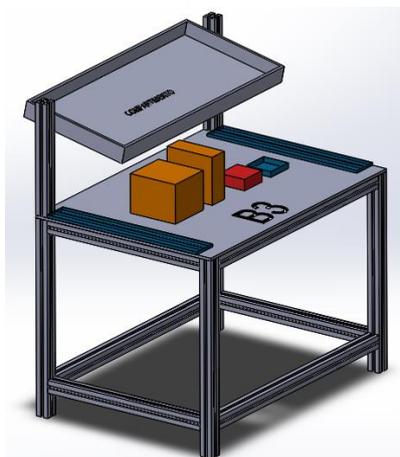


FIGURA 50 – B3: BANCADA DE SOLDA.

Na bancada quatro são colocadas as armaduras no solenóide e a cápsula. Em seguida, os solenóides são colocados no porta-solenóides e é efetuado o primeiro pré teste, em que é medida a resistência elétrica dos solenóides. Se todos estiverem OK, passam para a etapa seguinte, Figura 51.

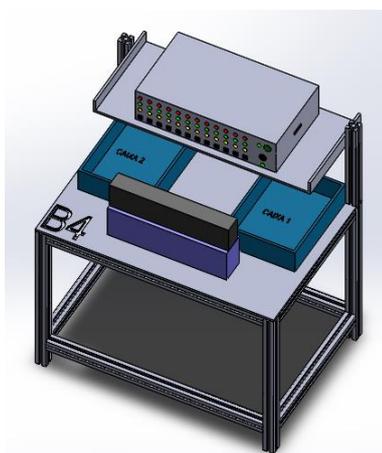


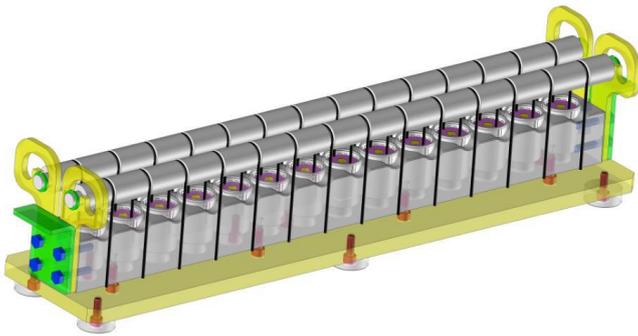
FIGURA 51 – B4: BANCADA DE PRÉ TESTE.

Para a realização do pré-teste, foi desenvolvido o equipamento de teste rápido para solenóides, TRS, na empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda., Figura 52.



FIGURA 52 - DISPOSITIVO PARA TESTE RÁPIDO DE SOLENÓIDES.

Surgiu assim a necessidade de criar um porta-solenóides que permitisse o transporte destes durante o processo de produção. Conseqüentemente, foi necessário criar um dispositivo que admitisse a ligação entre o TRS e o porta-solenóides, para que os solenóides sejam testados e possam passar, imediatamente, para a etapa seguinte. Além disso, este dispositivo tem a funcionalidade de ejeção rápida dos solenóides, caso seja necessário retirá-los do porta-solenóides, Figura 53.



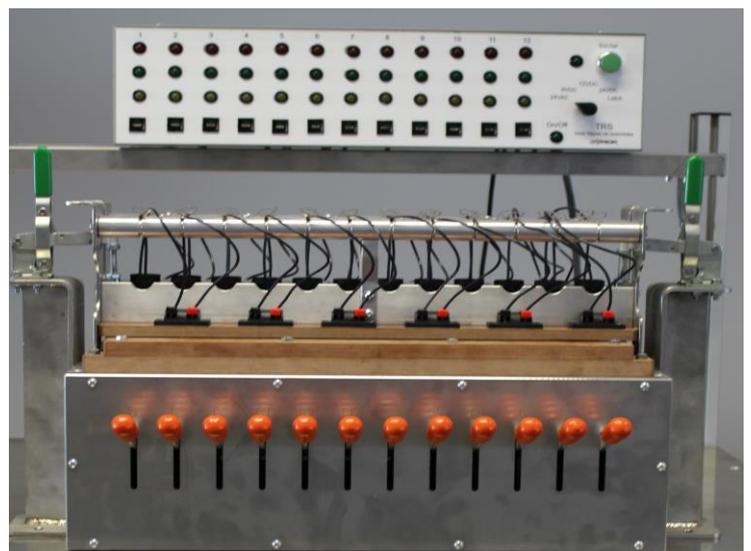
A)



B)



C)



D)

FIGURA 53 – A) DESENHO DO PORTA-SOLENÓIDES; B) IMAGEM REAL DO PORTA-SOLENÓIDES; C) DISPOSITIVO DE LIGAÇÃO AO TRS; D) PORTA-SOLENÓIDES, DISPOSITIVO DE LIGAÇÃO E TRS.

Na bancada cinco, está instalado o equipamento dispensador de misturas e é onde os solenóides são encapsulados através do misturador estático, Figura 54.

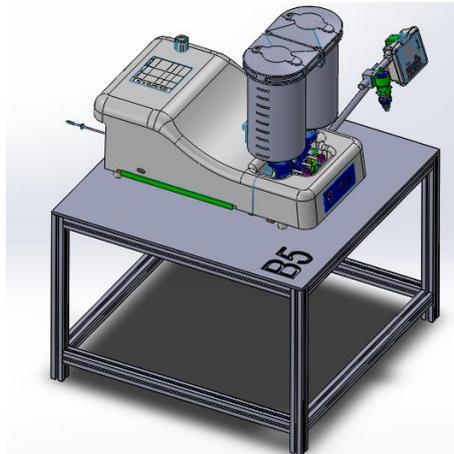


FIGURA 54- B5: BANCADA DE ENCHIMENTO.

Após o enchimento, os solenóides são submetidos ao processo de cura, à temperatura ambiente, e de pós cura, na estufa. É de notar que tanto o processo de enchimento como os processos de cura e pós cura, são efetuados num compartimento fechado com atmosfera controlada.

Em seguida, estes são submetidos ao segundo pré teste em que é, novamente, medido o seu valor de resistência elétrica, Figura 55.

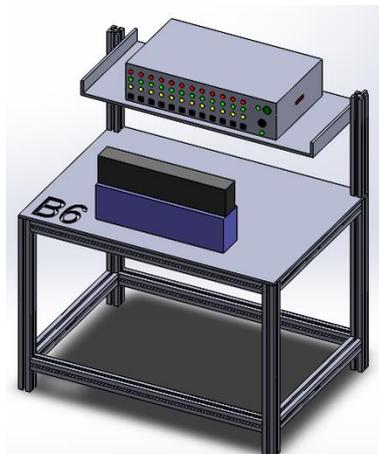


FIGURA 55— B6: BANCADA DE PRÉ TESTE.

Se os solenóides estiverem OK no pré teste, são retirados, individualmente, do porta-solenóides e são colocados na bancada seguinte, onde é feita a rotulagem dos solenóides, Figura 56. O bloco a verde representa a impressora de marcação e codificação industrial.

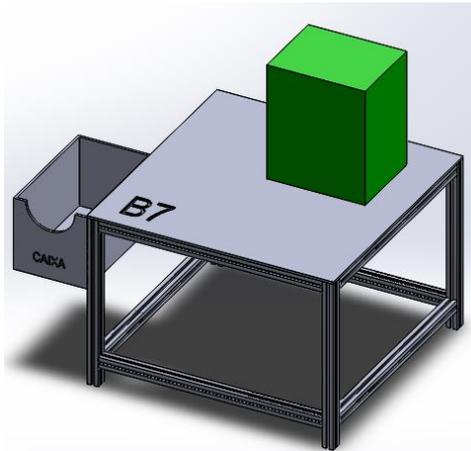


FIGURA 56 - B7: BANCADA DE ROTULAGEM.

Depois de rotulados, os solenóides são colocados na caixa acoplada à bancada sete e seguem para a última etapa de produção realizada na bancada oito. Aqui são inseridos nos solenóides o núcleo móvel e o vedante, montados previamente, a mola e a tampa. Em seguida, estes são embalados, Figura 57.

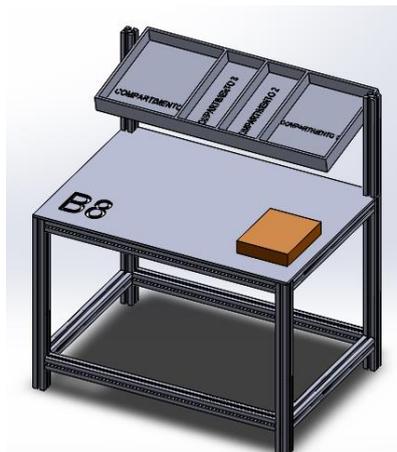


FIGURA 57 - B8: BANCADA DE MONTAGEM FINAL E EMBALAGEM.

## CAPÍTULO 6 | CONCLUSÕES

Um dos objetivos deste trabalho era o desenvolvimento de solenóides para electroválvulas que, após os processos de conceção, prototipagem e testes de desempenho, permite concluir que os solenóides produzidos podem operar a duas pressões máximas, 4 bar e 12 bar. Estes valores são condicionados pelas dimensões do núcleo móvel do solenóide, isto é, quanto maior for o comprimento deste núcleo, maior será a pressão máxima de funcionamento. Isto porque, o aumento do comprimento do núcleo fixo reduz a distância entre este e o núcleo móvel e, portanto, quando o solenóide é percorrido por uma corrente elétrica e, consequentemente, os núcleos são magnetizados, o percurso que o núcleo móvel realiza para ser atracado ao núcleo fixo é menor e, por isso, consegue vencer valores de pressão do fluido circulante na válvula.

Através da análise estrutural e morfológica e do estudo das propriedades magnéticas, concluiu-se que o material que constitui o núcleo do solenóide é um material ferromagnético macio, mais concretamente, uma liga binária de ferro-crómio. Este material apresenta um ciclo de histerese estreito e comprido, característico de materiais ferromagnéticos macios. Além disso, pelas técnicas de microscopia ótica e eletrónica de varrimento, podemos concluir que a superfície deste material é oxidada quando exposta a um ambiente ácido. Este comportamento deteriora o núcleo do solenóide, o que poderá por em causa o seu funcionamento.

Quando comparados com os solenóides concorrentes, conclui-se que os solenóides desenvolvidos são capazes de competir no mercado, uma vez que os tempos de fecho para diferentes valores de pressão e de caudal são similares aos tempos de fecho medidos para os solenóides de fornecedores externos. Além disso, para o solenóide com pressão máxima de funcionamento de 12 bar, os valores de temperatura, de corrente de consumo e de vibração são inferiores aos parâmetros apresentados pelas marcas *Baccara* e *Orbit*. No entanto, para o solenóide com pressão máxima de 4 bar, estes valores não são tão satisfatórios, mas se considerarmos a relação vibração – temperatura, concluímos que para um solenóide com menor estabilidade mecânica, a temperatura de funcionamento tende a aumentar. Assim, estes parâmetros poderão ser afinados através do número de espiras do enrolamento do solenóide ou através das dimensões do núcleo.

Relativamente à criação da linha piloto de pré industrialização para os solenóides de  $24 V_{ac}$ , esta foi implementada com êxito na empresa JPrior, Fábrica de Plásticos, Lda.

### Trabalhos Futuros:

O estudo do desempenho dos solenóides após diferentes períodos de tempo em funcionamento em contexto real, implementados num sistema de rega agrícola, permitirá saber qual a influência da oxidação da superfície do núcleo móvel no desempenho destes dispositivos.

A adaptação destes dispositivos para aplicações pneumáticas permite abranger uma maior amplitude de mercado, assim como o desenvolvimento de solenóides de três vias  $24 V_{ac}$  e de  $9 V_{dc}$ .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Elliott, "The story of magnetism," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 384, no. 1, pp. 44–52, Oct. 2007.
- [2] W. Smith, *Principles of materials science and engineering*, 3rd ed. NY, 1998, pp. 249–315;659–753.
- [3] C. Oatley, *Electric and magnetic fields, an introduction*. Cambridge University Press, 1976, pp. 56–88.
- [4] <http://www.pontociencia.org.br>, adaptado de; acedido em Agosto, 2015.
- [5] J. Carvallo and R. Vargas, "Válvulas de Solenoide," *Dep. Ing. ...*, 2003.
- [6] <http://www.educacao.uol.com.br>, adaptado de; acedido em Setembro, 2015.
- [7] <http://www.maquinaseletricas.pt>, adaptado de; acedido em Agosto, 2015.
- [8] <http://procesosbio.wikispaces.com>, adaptado de; acedido em Julho 2015.
- [9] <http://www.mgacontrols.com>, adaptado de; acedido em Maio, 2015.
- [10] S. V. Angadi, R. L. Jackson, S.-Y. Choe, G. T. Flowers, J. C. Suhling, Y.-K. Chang, and J.-K. Ham, "Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: A multi-physics finite element model," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 16, no. 3, pp. 874–887, Apr. 2009.
- [11] G. Tao, H. Chen, and Z. He, "Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, pp. 555–558, 2002.
- [12] M. Sortino, G. Totis, and E. Kuljanic, "Comparison of Injection Molding Technologies for the Production of Micro-optical Devices," *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 1296–1305, 2014.
- [13] L. Zema, G. Loreti, A. Melocchi, A. Maroni, and A. Gazzaniga, "Injection Molding and its application to drug delivery," *J. Control. Release*, vol. 159, no. 3, pp. 324–31, May 2012.
- [14] V. S. Sathyaseelan, a. L. Rufus, P. Chandramohan, H. Subramanian, and S. Velmurugan, "Preparation, characterization and dissolution of passive oxide film on the 400 series stainless steel surfaces," *J. Nucl. Mater.*, vol. 467, no. 2015, pp. 89–96, Dec. 2015.
- [15] C. L. Chien and C. R. Westgate, *The Hall effect and its application*. Maryland, Baltimore, pp. 55–76.