



Bruno dos Santos Mateus

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento e Aplicação de Equipamento para
Detecção de Defeitos Através de Células Bacterianas em
Componentes Microfabricados**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Arguente: Prof. Doutor Pedro Miguel dos Santos Vilaça da Silva

Vogal: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Desenvolvimento e Aplicação de Equipamento para Detecção de Defeitos através de Células Bacterianas em Componentes Microfabricados

Copyright © 2012 Bruno dos Santos Mateus

Faculdade Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Telmo Santos pelo seu empenho e disponibilidade, sendo de realçar o genuíno interesse demonstrado em acompanhar e debater ideias para um melhor desenvolvimento do trabalho realizado. Pela salutar relação estabelecida, essencial à minha motivação na progressão deste trabalho.

À Doutora Carla Carvalho, do Instituto Superior Técnico, por todo o trabalho de *background* realizado, bem como a ajuda e o acompanhamento, sem os quais não teria sido possível a realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, cuja experiência foi uma importante ajuda para ultrapassar problemas de concepção do equipamento.

Ao Mestre Mário Fonseca pela ajuda dada durante a realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Professor Stanimir Stovanov Valtchev pela disponibilidade demonstrada no empréstimo de equipamento necessário à realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos Diogo Carvalho e Mestre João Gonzalez com quem desenvolvi um verdadeiro trabalho de equipa, conjugando esforços para um melhor resultado final deste projecto. Sendo de salientar a importante ajuda do João na concepção e desenvolvimento de diversos componentes do trabalho. Ao Diogo agradeço em especial a amizade mantida durante todo o nosso percurso na FCT, essencial ao trabalho de equipa e a clareza na exposição das necessidades relativas à elaboração dos ensaios a que o equipamento concebido se destina.

Aos técnicos das oficinas do DEMI da FCT, Senhor António Campos e Senhor Paulo Magalhães pela ajuda prestada nas diversas operações realizadas, bem como pelo companheirismo nas horas de trabalho passadas com eles.

Agradeço ao meu colega, Mestre João Borges pelo desenvolvimento prévio deste trabalho.

A todos os meus amigos, por tudo o que passámos juntos.

À minha família por tudo o que me proporcionou, e cujo apoio foi essencial para alcançar os meus objectivos.

Desejo agradecer também às seguintes entidades:

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) e ao Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

Ao Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia (IBB) do Instituto Superior Técnico (IST) por possibilitar o uso das suas instalações e equipamentos necessários à realização deste projecto.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT – MEC), pelo suporte financeiro concedido a este trabalho no âmbito do projecto I&D MicroBac (PTDC/EME – TME/ 118678/2010).

RESUMO

O desenvolvimento recente de uma nova metodologia de Ensaio Não Destrutivos baseada em células bacterianas abriu novas perspectivas na inspecção de componentes microfabricados e na detecção de microdefeitos superficiais noutras aplicações.

A metodologia baseia-se na mobilidade, aderência, fluorescência e dimensão das bactérias. Ensaios preliminares demonstraram que a metodologia é viável e permite identificar defeitos com dimensões inferiores a 15 μm . Contudo, são necessários mais ensaios para avaliar a influência dos parâmetros envolvidos e determinar o limiar de detectabilidade dos defeitos. Para isso é necessário equipamento laboratorial dedicado que permita explorar as diversas propriedades das bactérias.

O objectivo deste trabalho é conceber, projectar, produzir e testar protótipos laboratoriais ajustados aos requisitos funcionais e especificidades da nova metodologia de END.

Foram criados vários equipamentos para as diferentes etapas da metodologia, dando solução às necessidades de aumento da mobilidade e de penetração das bactérias nos defeitos, através da aplicação de campos eléctricos e magnéticos com diferentes configurações, intensidades e frequências. Foram também desenvolvidos os meios electrónicos e o software para a sua automatização. Os equipamentos foram aplicados e testados em condições reais de inspecção.

Os resultados permitem concluir que os equipamentos desenvolvidos são eficazes na aplicação da nova técnica de END, melhorando significativamente os resultados obtidos com o actual Estado da Arte.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio Não Destrutivo (END)

Células Bacterianas (CB)

Microdefeitos

Microfabricação

Equipamento

ABSTRACT

The recent development of a new NDT technique using bacterial cells brought us new prospects at the inspection of new micro-components and micro superficial defects in other applications.

This method is based on the mobility, adhesion, dimension and fluorescence of the bacteria. Preliminary tests showed that the method is feasible and identifies defects with dimensions below 15 microns. However some other tests are needed to evaluate how the parameters have an effect on the technique and to determine the threshold of detectability of defects. This requires dedicated laboratory equipment that allows to explore the various properties of bacteria.

The aim of this work is to devise, design, produce and test laboratory prototypes set to functional requirements and specifics of the new NDT.

Several devices were set for the different steps of the methodology, bringing solution to the needs of mobility and penetration of bacteria in the defects, by applying electric and magnetic fields with different configurations, intensities and frequencies. There were also developed electronic hardware and software for its automation. The equipment were tested in real conditions of inspection.

The results indicate that the developed equipment is effective in implementing the new technique END, significantly improving the results obtained with the current state of the art.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT)

Bacterial Cells (CB)

Microdefect

Microfabrication

Equipment

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	ix
Palavras-chave.....	ix
Abstract	xi
Key-Words	xi
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objectivo	1
1.3. Trabalho Desenvolvido	2
1.4. Resultados	2
1.5. Estrutura da Dissertação.....	2
2. Estado da Arte	5
2.1. Fundamentos Físicos	5
2.1.1. Campo Eléctrico.....	5
2.1.2. Campo Magnético	6
2.2. Equipamento para END por Líquidos Penetrantes (LP)	7
2.3. Equipamento para END por Partículas Magnéticas (PM).....	8
2.4. Capacidades Actuais na Detecção de Microdefeitos.....	9
2.5. Equipamentos Existentes para END com Células Bacterianas	11
2.6. Fundamentos do END com Células Bacterianas.....	13
2.7. Penetração das bactérias nos defeitos.....	14
2.8. Remoção do excesso	15
3. Requisitos do Equipamento para técnica de END por CB	17
4. Concepção, Projeto e Produção do equipamento para END por CB	21
4.1. Equipamento baseado em Campo Magnético	21
4.1.1. Dispositivo com Quatro Solenóides Horizontais para Microscópio	21
4.1.2. Solenóide de Campo Vertical.....	25
4.1.3. Dispositivo com Rotação de Campo Magnético para Microscópio	25
4.1.4. Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.....	28
4.1.5. Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical	35
4.2. Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico.....	41
4.3. Equipamento para Eliminação do Excesso de Células Bacterianas	44
4.4. Adequabilidade dos Dispositivos Produzidos face aos Requisitos Estabelecidos	47

5.	Validação do Equipamento Produzido	49
5.1.	Ensaio realizado com Equipamento dedicado à aplicação de Campos Magnéticos	49
5.1.1.	Ensaio Realizado com o Dispositivo com Quatro Solenóides Horizontais para Microscópio.....	49
5.1.2.	Ensaio Realizado com Solenóide de Campo Vertical	50
5.1.3.	Ensaio Realizado com o Dispositivo com Rotação de Campo Magnético para Microscópio.....	50
5.1.4.	Ensaio Realizado com o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical	52
5.1.5.	Ensaio Realizado com o Equipamento Automatizado com Rotação de Campo Magnético Horizontal e Vertical	55
5.2.	Ensaio Realizado com Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico.....	56
6.	Conclusões e Propostas de Desenvolvimento Futuro.....	59
6.1.	Conclusão.....	59
6.2.	Propostas de Desenvolvimento Futuro.....	60
	Referências Bibliográficas	61
	Anexos.....	I
	Anexo 1- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo Automatizado para Campos Magnéticos Horizontal e Vertical.....	III
	Anexo 2- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no plano Horizontal e Vertical	XIII
	Anexo 3- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo dedicado à aplicação de Campo Eléctrico	XXV
	Anexo 4- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo com quatro Solenóides para Microscópio	XXXI
	Anexo 5- Folha de desenho em SolidWorks do Solenóide de Campo Vertical.....	XXXV
	Anexo 6- Esquema do circuito de alimentação e controlo do Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.....	XXXIX
	Anexo 7- Esquema de ligação das portas digitais da placa <i>6008 National Instruments</i> à placa <i>Astrosyn G210</i> para excitação dos solenóides.....	XLIII
	Anexo 8- Esquema de ligação do <i>flatcable</i> entre a placa da <i>National Instruments</i> , a placa <i>Astrosyn G210</i> e a ficha de 20 pinos	XLVII
	Anexo 9- Esquema do circuito de alimentação e controlo do Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical.....	LI

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Campo Eléctrico uniforme	6
Figura 2.2 - Equipamento estacionário para LP [4]	8
Figura 2.3- Montagem com solenóides horizontais a) e um solenóide vertical b) [1]	11
Figura 2.4- Montagem com placas de campo eléctrico a) e de campo eléctrico com solenóide vertical b) [1].....	12
Figura 2.5 – Sistema de limpeza intrusivo [1].....	13
Figura 2.6- Metodologia de teste [1].....	14
Figura 3.1- Esquemas de rotação no plano horizontal a) e vertical b)	20
Figura 4.1- Equipamento com 4 solenóides para microscópio.....	22
Figura 4.2- <i>Layout</i> de utilização do dispositivo de 4 solenóides.....	22
Figura 4.3- Esquema de Excitação de dispositivo com quatro solenóides.....	23
Figura 4.4- Esquema de linhas de campo no Dispositivo com Quatro Solenóides para Microscópio.....	24
Figura 4.5- Solenóide	25
Figura 4.6- Estator de motor passo a passo	26
Figura 4.7- Sequência de Excitação a) Step 1, b) Step 2.....	27
Figura 4.8- Modelo de <i>SolidWorks</i> do dispositivo com 2 solenóides	28
Figura 4.9- Modelo <i>SolidWorks</i> do conjunto de transporte da peça.....	29
Figura 4.10- Vista de pormenor do modelo <i>SolidWorks</i> a) e das guias para actuação de fins de curso b).....	29
Figura 4.11- Circuito a) vista de topo b) verso da placa	31
Figura 4.12- Esquema do circuito do Dispositivo Automatizado para Campo Magnético horizontal e Vertical.....	31
Figura 4.13 – Esquema das ligações entre a placa <i>6008 National Instruments</i> e a placa <i>Astrosyn G210</i>	32
Figura 4.14- Ligação do <i>flatcable</i> entre as placas e a ficha de 20 pinos	33
Figura 4.15- Painel Frontal de <i>LabView</i> para dispositivo de dois solenóides	33
Figura 4.16- Esquema exemplificativo das duas posições de ensaio; a) campo vertical “ <i>Home</i> ”;	34
b) campo horizontal “ <i>Home Inverso</i> ”	34
Figura 4.17- Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical	34
Figura 4.18- Modelo de <i>SolidWorks</i> do dispositivo automatizado com rotação de <i>B</i> nos planos Horizontal e Vertical	35

Figura 4.19- Sequência de movimento e excitação do dispositivo automatizado com rotação de Campo Magnético	36
Figura 4.20- Pormenor do suporte oscilante e do apoio em acrílico modelados em <i>SolidWorks</i> 37	
Figura 4.21- Pormenor da engrenagem sem-fim.....	38
Figura 4.22- Modelo em <i>SolidWorks</i> do conjunto de movimento linear	39
Figura 4.23- Pormenor de fins de curso de rotação; a) posição “ <i>Home CC2</i> ”, b) posição “ <i>Home Inverso CC2</i> ”	39
Figura 4.24- Esquema do circuito do Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical	40
Figura 4.25- Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical	41
Figura 4.26- Modelo de <i>SolidWorks</i> do dispositivo para aplicação de Campo Eléctrico	42
Figura 4.27 - Modelo em <i>SolidWorks</i> de fixação dos dois suportes	43
Figura 4.28- Esquema de posicionamento no dispositivo para aplicação de Campo Eléctrico a) Vertical, b) Horizontal.....	43
Figura 4.29- Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.....	44
Figura 4.30- Modelo em <i>SolidWorks</i> do Equipamento para aplicação de luz UV	45
Figura 4.31- Regulação angular da luz UV	45
Figura 4.32-Dispositivo de luz UV para eliminação do excesso de células bacterianas[23]	46
Figura 5.1- Gerador e Amplificador de sinais.....	50
Figura 5.2- <i>Layout</i> para Ensaios com o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical	52
Figura 5.3- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana na peça sem Campo Magnético.....	53
Figura 5.4- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana na peça com Campo Magnético.....	53
Figura 5.5- Ensaio em superfície electroerodida com Campo Magnético Horizontal	54
Figura 5.6- Ensaio em superfície electroerodida com Campo Magnético Vertical.....	54
Figura 5.7 – Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical durante ensaio de defeitos de electroerosão	54
Figura 5.8- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana em alumínio	55
Figura 5.9- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana em aço.....	56
Figura 5.10- <i>Layout</i> para Ensaios com Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico57	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Requisitos do equipamento para END por CB	18
Tabela 4.1- Cotas de Atravancamento de dispositivo automatizado para Campo Magnético Vertical e Horizontal	35
Tabela 4.2- Cotas de Atravancamento de dispositivo automatizado com Rotação de Campo Magnético Vertical e Horizontal	40
Tabela 4.3- Cotas de Atravancamento de dispositivo dedicado à aplicação de Campo Eléctrico	43
Tabela 4.4- Adequabilidade do Equipamento Produzido.....	48
Tabela 5.1- Frequência e trajectória obtida	51
Tabela 5.2- Resultados dos ensaios realizados com Campo Eléctrico	58

NOMENCLATURA

\vec{E}	Campo Eléctrico
ρ	Densidade
\vec{F}_a	Força de atrito
σ	Tensão Superficial
i	Intensidade de corrente eléctrica
μ	Permeabilidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os Ensaio Não Destrutivos (END) consistem na aplicação de metodologias e técnicas de ensaio de modo a analisar materiais, peças ou equipamentos, de forma a detectar possíveis defeitos existentes, sem que daí resulte alguma alteração nas propriedades do material ou no desempenho da peça final [1].

O recente aparecimento de novas tecnologias de produção e de novos materiais - dos quais a microfabricação é exemplo, uma vez que tem tido um grande desenvolvimento quer científico, quer industrial - não tem sido acompanhado pelo aparecimento de novas técnicas de Ensaio Não Destrutivos. Consequentemente, torna-se difícil actualmente detectar defeitos submilimétricos com fiabilidade usando as técnicas convencionais de END.

Dado que estes defeitos se podem tornar prejudiciais no desempenho dos componentes, torna-se necessário desenvolver métodos para um eficaz controlo de qualidade.

Na microfabricação os defeitos apresentam uma dimensão sem paralelo com os defeitos produzidos por outras tecnologias de produção. Defeitos típicos de componentes micro fabricados são rugosidades e micro fissuras superficiais com dimensões da ordem dos 5-10 μm . Estes defeitos surgem em componentes fabricados por processos substractivos, replicativos ou aditivos. Outros defeitos característicos são as calotes esféricas de falta de material à superfície, que resultam do desprendimento de partículas da ordem dos 5 μm durante o processo de micro injeção de pós.

Para a aplicação da nova metodologia de END baseada em Células Bacterianas para a detecção de micro defeitos, é necessária a concepção de equipamento que a permita aplicar e também de equipamento que permita a sua validação.

1.2. Objectivo

O objectivo principal deste trabalho é desenvolver, projectar, produzir e aplicar diversos protótipos funcionais de equipamento para a detecção de defeitos através de células bacterianas, visando nomeadamente, a inspecção não destrutiva de componentes microfabricados.

1.3. Trabalho Desenvolvido

Com o intuito de responder ao objectivo estabelecido para esta dissertação, foram projectados e produzidos dispositivos que permitem a aplicação da nova técnica de END.

Após a definição dos requisitos do equipamento, utilizou-se um *software* de CAD (Computer-Aided Design)- *SolidWorks*- para o projectar. Posteriormente produziram-se os componentes necessários por diversos processos de maquinação, bem como os meios electrónicos e o software para a sua automatização.

Finalmente foram realizados ensaios- em condições reais de inspecção- que permitiram verificar e validar a aplicação do equipamento desenvolvido para esta nova metodologia de Ensaios Não Destrutivos por Células Bacterianas.

1.4. Resultados

O equipamento produzido revelou, pelos ensaios realizados em laboratório, ser essencial ao sucesso desta nova metodologia e à continuação do seu desenvolvimento.

Verificaram-se resultados significativamente melhores nos ensaios realizados com os dispositivos desenvolvidos, quando comparados com ensaios em que estes não foram utilizados, tendo-se conseguido detectar defeitos superficiais em aço inox de aproximadamente 10 μ m.

1.5. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo o primeiro a Introdução e o último a Conclusão.

O primeiro capítulo introduz o tema da dissertação e apresenta os objectivos estabelecidos para este trabalho, sendo descrita de uma forma sucinta as principais etapas do mesmo.

No segundo capítulo é caracterizado o Estado de Arte dos equipamentos existentes para esta metodologia de END por CB, sendo feita uma analogia entre esta e as metodologias de Líquidos Penetrantes e por Partículas Magnéticas.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação dos requisitos estabelecidos que o equipamento dedicado a esta nova técnica tem de cumprir.

Os métodos de projecto e concepção dos vários dispositivos são apresentados no capítulo 4, descrevendo-se as soluções encontradas para uma maior eficiência dos ensaios a realizar nestes, como a automatização de ciclos.

No quinto capítulo são descritos os ensaios realizados para validação do equipamento concebido, bem como são apresentados alguns resultados que comprovam a importância dos dispositivos.

Finalmente, no capítulo seis é apresentado um resumo do trabalho desenvolvido, juntamente, as conclusões sobre os resultados obtidos e as propostas para futuro desenvolvimento.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Fundamentos Físicos

Dado que o equipamento desenvolvido se baseia em princípios físicos de campos eléctricos e magnéticos, faz-se neste capítulo uma breve revisão destes conceitos.

2.1.1. Campo Eléctrico

Partículas carregadas electricamente provocam forças de interacção entre si, deste modo, duas partículas com carga de igual sinal repelem-se e duas cargas de sinais opostos atraem-se [2]. A força electrostática entre duas partículas de cargas q_1 e q_2 distanciadas de r é calculada pela Lei de Coulomb, segundo a expressão:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (Eq. 1) \quad [2]$$

Onde K é a constante electrostática de valor $8,99 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$.

Caso existam várias partículas carregadas, calcula-se a força electrostática total \vec{F} como sendo a soma vectorial das forças geradas pelos pares de cargas.

O campo eléctrico é um campo vectorial, com sentido e direcção da força electrostática, que actua sobre uma carga e é calculado por:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (Eq. 2) \quad [2]$$

Michael Faraday introduziu a ideia de campo eléctrico e de linhas de campo, sendo estas definidas como tangentes ao vector campo em cada ponto e indicam o sentido da força eléctrica sobre uma carga de teste $q_0(+)$ colocada no campo [2]. Em qualquer ponto, o campo eléctrico é dado pela recta tangente à linha de campo eléctrico; quanto mais próximas se encontram as linhas de campo, mais forte é o campo. Um campo eléctrico uniforme é aquele que possui em todos os seus pontos a mesma direcção, mesmo sentido e intensidade, sendo estabelecido entre duas placas paralelas condutoras carregadas com o mesmo valor absoluto mas de sinais opostos, como esquematizado na Figura 2.1.

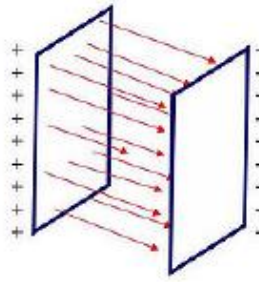


Figura 2.1-Campo Eléctrico uniforme

2.1.2. Campo Magnético

Um campo magnético, \vec{B} , pode ser definido como uma perturbação do espaço tal que uma força \vec{F}_B actua sobre uma partícula de teste com carga q e que se move através do campo com velocidade \vec{v} e é dado pela equação:

$$\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{Eq. 3}) \quad [2]$$

Um campo magnético pode ser gerado através de um electroímã utilizando-se uma bobina de fio enrolada em torno de um núcleo de ferro, fazendo-se passar por esta bobina uma corrente eléctrica, sendo a intensidade do campo magnético dependente da intensidade da corrente eléctrica. As linhas de campo magnético saem do pólo norte e dirigem-se para o pólo sul do electroímã. Este é o princípio de funcionamento de um solenóide; por simplificação da Lei de Ampère pode obter-se o campo magnético de um solenóide pela equação:

$$B = \mu I n \quad (\text{Eq. 4}) \quad [2]$$

Onde I [A] é a intensidade da corrente, μ [H.m^{-1}] é a permeabilidade do meio e n [-] o número de espiras[2].

2.2. Equipamento para END por Líquidos Penetrantes (LP)

Uma vez que a técnica de END através de CB tem alguma analogia com os métodos de Líquidos Penetrantes e Partículas Magnéticas, faz-se uma breve revisão destes métodos.

A aplicação da técnica de LP é composta por seis etapas [3]:

1. Limpeza da superfície – assegura a remoção de contaminantes, resultantes das condições de fabrico ou de uso da peça, ou mesmo aplicados intencionalmente como tintas ou lubrificantes.
2. Aplicação do penetrante – consiste em aplicar o LP sobre a superfície a inspecionar por imersão, pintura ou spray. Dois tipos de LP podem ser aplicados, um penetrante colorido ou um fluorescente.
3. Remoção do excesso do penetrante – Após o tempo de penetração, o excesso de penetrante é removido da superfície com produtos adequados ao tipo de líquido penetrante, assegurando-se que durante este processo não se retira o penetrante dos defeitos.
4. Aplicação do revelador – O revelador aumenta a nitidez das indicações dadas pelo penetrante.
5. Interpretação dos resultados obtidos – Após a aplicação do revelador os resultados obtidos são analisados e interpretados.
6. Limpeza após ensaio – Esta última etapa consiste na limpeza de todos os resíduos de produtos que possam prejudicar a futura utilização da peça.

Actualmente existem variados tipos de equipamento para aplicação deste ensaio, variando essencialmente em sensibilidade e custo. Em equipamentos de menores dimensões, em que o penetrante, o líquido de limpeza e o revelador são transportados em recipientes pressurizados, são incluídas escovas e panos para limpeza e, se o líquido for fluorescente, é também incluída uma luz negra para inspecção. Estes equipamentos destinam-se a ensaios de campo ou em peças de pequenas dimensões, já que o penetrante é aplicado por spray [4].

Para análise em laboratório existem equipamentos estacionários preparados para a sequência de execução de cada etapa como o mostrado na Figura 2.2 [4].

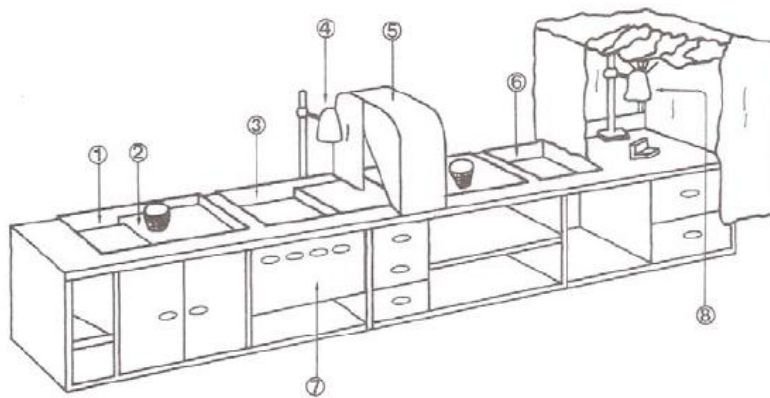


Figura 2.2 - Equipamento estacionário para LP [4]

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1-Aplicação do Penetrante | 5-Secagem |
| 2-Drenagem do Penetrante | 6-Revelação |
| 3-Lavagem | 7-Painel de comando |
| 4-Inspeção com Luz UV | 8-Inspeção |

Este sistema requer o manuseamento da peça por um operador, contudo existem equipamentos automáticos controladas por software em que as peças avançam de uma secção para outra sem a intervenção de um operador [4].

Uma variante deste método utilizada para detectar fissuras mais reduzidas consiste em mergulhar a peça em água quente, fazendo com que as fissuras sofram uma ligeira expansão adicional. A peça é depois seca com ar quente para finalmente ser aplicado o penetrante[5].

2.3. Equipamento para END por Partículas Magnéticas (PM)

Este ensaio consiste em depositar partículas magnéticas na peça a inspeccionar, sendo posteriormente aplicado um campo magnético à mesma, caso haja um defeito superficial, ou sub-superficial, as partículas concentrar-se-ão em torno deste devido à variação de polarização. Este fenómeno é semelhante ao que se verifica ao partir um íman; deixa-se de ter um corpo com diferentes polarizações nas extremidades e passa-se a ter dois corpos, ambos com extremidades de polarizações distintas. Deste modo, ao existir uma falha, as partículas são atraídas para o par magnético presente na mesma.

A maior diferença entre os equipamentos para aplicação desta técnica consiste no modo como é criado o campo, podendo este ser aplicado por um íman permanente, que é a

única alternativa caso se trate de um ensaio de campo sem electricidade disponível, ou por uma corrente eléctrica, recorrendo-se a uma bobina, sendo esta a alternativa que permite criar campos de maior intensidade [5].

Estes métodos não permitem variar a direcção dos campos magnéticos aplicados.

2.4. Capacidades Actuais na Detecção de Microdefeitos

Apresentam-se seguidamente alguns métodos existentes para detecção de defeitos em produtos microfabricados,

Thin films são camadas de material com espessuras varáveis de fracções de nanómetro até vários micrómetros, cada vez mais utilizados para diversas aplicações como células fotovoltaicas e produtos com equipamento micro/nano electrónico e o seu desempenho é fortemente afectado por microfissuras originadas na fabricação. Contudo, os métodos de detecção utilizados actualmente não são de fácil aplicação laboratorial e apresentam custos elevados, uma vez que recorrem a microscópios como *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Scanning Tunneling Microscope* (STM) e *Transmission Electron Microscopy* (TEM), tendo sido estudado por Bordoloi et al. [6] um sistema optoelectrónico que permite detectar e medir defeitos superficiais nestes componentes. O *thin film* é inspeccionado horizontalmente, sendo atravessado por um laser, o sinal de tensão eléctrica é observado e analisado, identificando microdefeitos uma vez que nestes a luz é directamente transmitida, alterando a amplitude do sinal lido. Este método é designado pelo autor como um método mais simples de analisar *thin films*, quando comparada com técnicas de SEM e STM, permitindo detectar e medir, por comparação com defeitos padrão, microdefeitos neste material a um menor custo.

Castellani et al. [7] apresentaram um método visual automático não destrutivo para análise de *microgrippers* recorrendo ao efeito piezoeléctrico. Estas ferramentas são utilizadas no manuseamento de objectos cuja dimensão é de uma ordem de grandeza nanométrica, como componentes microfabricados e em análise em SEM, exigindo que a amplitude de abertura tenha uma precisão desta ordem de grandeza. A estrutura é posta em ressonância e a sua vibração é captada por uma micro-câmara; analisando a imagem obtida é possível distinguir defeitos na estrutura dado que a presença destes altera as propriedades elásticas do material, bem como verificar se a massa e espessura estão dentro do intervalo de tolerâncias estabelecidas.

Defeitos típicos de componentes microfabricados são rugosidades e micro fissuras superficiais, sendo o acabamento de superfície conseguido na micro-injecção de metais, pior do que o conseguido na injecção de polímeros ou cerâmicos [8].

A detecção de eventuais falhas em materiais como Aço Rápido M2, Aço Inox 316L e Carboneto de Tungsténio é de elevada importância, tendo em conta os equipamentos onde podem vir a ser aplicados. São disto exemplo fissuras detectadas na fase de decapagem e passivação em juntas soldadas de Aço 316L, nas tubagens de um Reactor Nuclear de Regeneração Rápida [9].

Os defeitos superficiais em ferramentas de Carboneto de Tungsténio estão fortemente relacionados com a sua duração e resistência ao desgaste, pelo que o controlo destes defeitos pode evitar custos acrescidos, sendo tanto mais significativo quanto o material a maquinar, uma vez que é utilizado para maquinar ligas de carbono para a indústria aeroespacial e aeronáutica [10].

Em 2006, Zhang et al. [11] desenvolveram um método de Inspeção Óptica Automática, *Automatic Optical Inspection* (AOI), para detecção de defeitos em brocas de Carboneto de Tungsténio utilizadas para maquinar Placas de Circuitos Impressos, tendo em conta a importância de uma iluminação adequada para obtenção de imagens. Neste método, a peça em análise é iluminada por várias fontes de luz o que permite que sejam captadas imagens de zonas da peça que- com um modo de iluminação tradicional- ficariam cobertas devido à morfologia da peça. Assim, este método permite a avaliação de cada peça, levando a uma maior qualidade e durabilidade das brocas comercializadas ao permitir detectar defeitos superficiais e verificar as dimensões das brocas [11].

Um dos métodos utilizados para analisar a superfície de peças maquinadas por *Electrical Discharge Machinig* (EDM) de Carboneto de Tungsténio recorre também a um microscópio SEM com *Energy Dispersive Spectrometers* (EDS) , concluindo-se que a operação apenas provocou falhas superficiais relacionadas com a intensidade da corrente [12]. Dado que a visualização da peça em SEM, não permite identificar, por si só, diferentes elementos, recorre-se a EDS que permite, através do bombardeamento da peça a analisar com raios-x, identificar num espectro diferentes elementos em imagens provenientes do SEM [13].

Após o estudo dos métodos actualmente existentes para inspeção de microdefeitos, conclui-se que, a evolução dos métodos de fabrico não tem sido acompanhada pelo desenvolvimento de métodos de inspeção. Os métodos utilizados recorrem maioritariamente a equipamentos de SEM, STM, EDM e EDS, equipamentos de elevado custo e de grandes dimensões, inviabilizando um END de campo recorrente a estes. Os métodos utilizados baseados em feixes laser são destinados apenas a *thin films*, não possibilitando a análise de diferentes tipos de materiais.

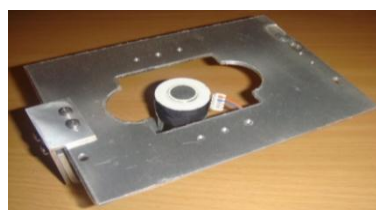
2.5. Equipamentos Existentes para END com Células Bacterianas

Recentemente foram desenvolvidos protótipos por João Borges [1] que mostraram o elevado potencial desta nova técnica de Ensaios Não Destrutivos, necessitando contudo de desenvolvimentos adicionais, principalmente nos dispositivos destinados a criar maior mobilidade nas bactérias por aplicação de campos eléctricos e/ou campos magnéticos.

Na Figura 2.3 a) representa-se uma montagem com dois solenóides montados horizontalmente que se destinam a aplicar um campo magnético ao provete que é colocado entre as hastes. Outro dispositivo, visível na Figura 2.3 b), criado para gerar um campo magnético perpendicular à peça utiliza um solenóide vertical que fica colocado por baixo do provete a analisar.



a)



b)

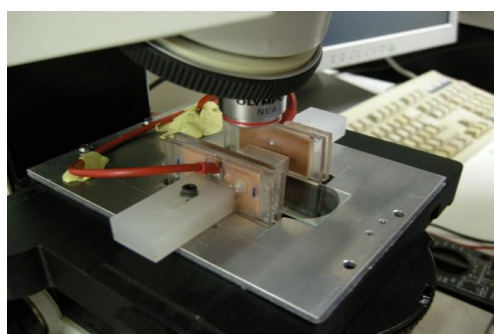
Figura 2.3- Montagem com a) solenóides horizontais e b) um solenóide vertical [1]

Como protótipos, estes dispositivos têm bastantes limitações e problemas de funcionamento e manuseamento. É de destacar a base metálica, que apesar de ser de alumínio, pode interferir na utilização de outros componentes eléctricos periféricos. A dimensão dos solenóides implica uma distância demasiado grande entre ambos o que, apesar do uso de entreferros, diminui a intensidade do campo na peça em análise e aumenta significativamente as cotas de atravancamento do dispositivo, tornando difícil a sua utilização sobre a base de um microscópio. Com a montagem em a) apenas é possível criar um campo horizontal, não permitindo alternância de direcções. O furo aberto na parte central da base foi concebido para possibilitar a deslocação do dispositivo na base de um microscópio, contudo dificulta o apoio e fixação da peça em análise, não garantindo a precisão necessária de posição relativamente ao campo magnético. Os solenóides estão muito afastados do provete e o campo magnético é confinado por varões de aço. Consequentemente, a intensidade e uniformidade do campo junto à amostra não são adequadas para provocar a mobilidade pretendida das células bacterianas.

Como a mobilidade das bactérias no provete também pode ser promovida por acção de um campo eléctrico, também foram criados no âmbito deste trabalho dois modos de o aplicar ao provete, mostrando-se na Figura 2.4 a) um equipamento que permite estabelecer um campo eléctrico mais uniforme e na Figura 2.4 b) o outro dispositivo de campo eléctrico associado a um solenóide vertical e montado num microscópio.



a)



b)

Figura 2.4- Montagem a) com placas de campo eléctrico e b) de campo eléctrico com solenóide vertical [1]

O equipamento mostrado na Figura 2.4 a), destinado a aplicar um campo eléctrico uniforme na peça apenas possibilita sujeitá-la a um campo horizontal, já que não possui nenhum componente de movimentação da peça. Como é necessário o manuseamento da peça, é impossível controlar com exactidão o tempo de exposição da peça ao campo. O dispositivo para aplicação de campo eléctrico na base do microscópio (Figura 2.4b)) utiliza a mesma base de alumínio referida para campos magnéticos, impondo um cuidado excessivo de isolamento perante o elevado valor de tensão eléctrica utilizado para gerar o campo eléctrico (8 KV). O modo de fixação das placas eléctricas permite um ajuste a distância destas à peça, contudo não permite garantir o paralelismo entre as placas dado que é feito apenas por uma ligação aparafusada M3 com um furo rasgado, permitindo a rotação destas. Colocar as placas o mais próximas possível com a peça em análise no meio delas, pode impossibilitar a focagem correcta da lente do microscópio dado que bate na parte superior das mesmas. Assim, para se obter a focagem adequada do microscópio, tem de se afastar as placas, perturbando a uniformidade do campo eléctrico.

Foi também desenvolvido um equipamento (Figura 2.5) para remoção do excesso de bactérias, onde se aplica um jacto de água sobre o provete. Como a limpeza é feita por um jacto

de água, este sistema é intrusivo dado que não se garante que não sejam removidas também as bactérias inseridas no defeito.



Figura 2.5 – Sistema de limpeza intrusivo [1]

No trabalho desenvolvido por João Borges não se verificou o movimento desejado das Células Bacterianas com campos eléctricos ou magnéticos, mesmo variando a intensidade, pelo que foi proposto para desenvolvimento futuro do seu trabalho, a verificação da aplicabilidade de campos magnéticos, bem como o estudo de novos parâmetros a aplicar às placas de campo eléctrico, com o intuito de possibilitar a movimentação das células, o que facilitará a penetração das bactérias nos defeitos [1].

Os dispositivos aqui apresentados são protótipos com reduzidas funcionalidades destinados a uma validação preliminar da metodologia de END por CB, não tendo sido alvo de uma construção pormenorizada e eficaz que a aplicação da metodologia impõe. Desta forma é necessário desenvolver equipamento dedicado para explorar as diversas propriedades das bactérias.

2.6. Fundamentos do END com Células Bacterianas

A técnica de END com Células Bacterianas é uma técnica pioneira que consiste em aplicar as células para a detecção de microdefeitos superficiais que tem demonstrado elevado potencial, a avaliar pelos resultados experimentais de alguns ensaios preliminares já realizados [1].

Os primeiros desenvolvimentos desta técnica foram realizados no âmbito da tese de João Borges [1], tendo sido estabelecida uma metodologia para aplicação da técnica.

Esta metodologia pode ser descrita sucintamente pelas seguintes etapas ilustradas na Figura 2.6:

- Identificação da área a inspeccionar;
- Limpeza Superficial;
- Aplicação das Células Bacterianas;
- Penetração e Aderência;
- Remoção do excesso de bactérias;
- Revelação;
- Inspeção e interpretação;
- Limpeza e esterilização da peça.

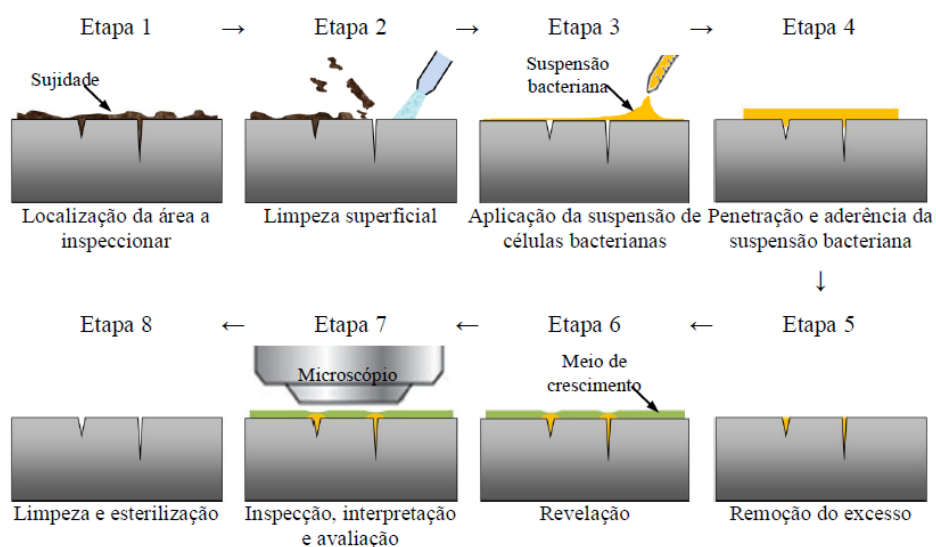


Figura 2.6- Metodologia de teste [1]

De seguida apresenta-se uma breve explicação das etapas para as quais foi concebido e produzido o equipamento alvo desta tese.

2.7. Penetração das bactérias nos defeitos

Durante e após a deposição das células na peça, ocorre a introdução das bactérias nos defeitos. Isto pode conseguir-se deixando a peça em repouso, penetrando as bactérias nos defeitos devido à sua dimensão reduzida e às suas propriedades de mobilidade e aderência, sendo neste caso o tempo e a capilaridade factores determinantes, tratando-se portanto de um método passivo. De outro modo, pode tirar-se partido das propriedades electromagnéticas das

bactérias; após a deposição das células, a peça em análise pode ser sujeita a campos eléctricos e/ou magnéticos que criam agitação das células e consequentemente, promoverão a mobilidade das bactérias e a sua penetração nos defeitos.

2.8. Remoção do excesso

Após a penetração das bactérias nos defeitos, torna-se necessário remover as bactérias que não aderiram aos defeitos de modo a esta poder ser inspeccionada dado que a análise de resultados poderia ser influenciada pelos resíduos depositados na superfície.

Para esta etapa foi concebido um dispositivo que faz incidir sobre a superfície uma luz Ultravioleta germicida. Uma limpeza eficiente, implica retirar todos os resíduos da superfície sem interferir com as células depositadas nos defeitos, para tal o dispositivo desenvolvido permite controlar o ângulo de incidência do feixe na peça.

Por vezes a exposição à luz Ultravioleta pode ser antecedida de uma limpeza com um papel macio, caso haja um elevado excesso de bactérias numa determinada zona da peça.

3. REQUISITOS DO EQUIPAMENTO PARA TÉCNICA DE END POR CB

Tratando-se de uma nova técnica, é necessário criar as condições laboratoriais para a sua aplicação e validação. Atendendo à especificidade da nova metodologia de END, não existe equipamento disponível comercialmente dedicado para a sua validação. Desta forma torna-se necessário desenvolver protótipos funcionais dedicados e com funcionalidades adaptadas aos requisitos da nova metodologia de END baseada em CB.

Numa primeira fase foram identificadas por Diogo Carvalho [14] as grandes questões que devem ser respondidas relativamente à eficácia da metodologia:

- Qual a influência do tipo de bactéria e do tipo de material a inspeccionar?
- Qual a influência dos tempos de penetração?
- Qual o efeito da aplicação de campos eléctricos e magnéticos com diferentes disposições espaciais?
- Qual o efeito da intensidade e frequência dos campos eléctrico e magnético?

O objectivo da criação de equipamento dedicado para END com CB é responder às 4 questões enunciadas anteriormente. Nesse sentido, procedeu-se a uma análise cuidada tendo em vista o levantamento exaustivo dos requisitos funcionais do equipamento. Na tabela 3.1 descrevem-se as várias funcionalidades e atributos que devem caracterizar os equipamentos de END dedicados.

Tabela 3.1- Requisitos do equipamento para END por CB

	Funcionalidade	Comentário
1	Fixação: Permitir uma fixação expedita e eficaz dos provetes com diferentes tamanhos, formas e materiais.	A fixação deve impedir qualquer movimento do provete, quer devido a forças provocadas pelos campos magnéticos e eléctricos ou forças de inércia. A fixação não deve interferir com a correcta aplicação dos campos nem com as células bacterianas.
2	Aplicar campo magnético ou eléctrico paralelo à superfície da peça.	Este tem o propósito de facilitar a mobilidade das células na superfície.
3	Aplicar campo magnético ou eléctrico perpendicular à superfície da peça.	Esta orientação de campo poderá facilitar a penetração das células no interior dos defeitos.
4	Fazer a alternância entre as direcções de campo.	Espera-se que esta alternância facilite a mobilidade e promova a penetração consecutivamente
5	Variar o sentido do campo em torno de toda a peça , quer numa direcção paralela, quer numa direcção perpendicular à superfície.	Estas variações induzirão maiores vibrações e consequentemente movimentos às células depositadas.
6	Controlar a Frequência dos campos.	Variando a Frequência poder-se-á entender qual a que maximiza o movimento das bactérias.
7	Controlar o tempo de exposição da peça a cada direcção de campo.	Este controlo permitirá realizar os ensaios com os parâmetros óptimos.
8	Controlar a Intensidade dos campos eléctricos e magnéticos.	Variando a Intensidade poder-se-á entender qual a que maximiza o movimento das bactérias.
9	Permitir a repetição de diferentes ciclos de excitação das bactérias com diferentes tempos e modalidades.	Permite repetir ciclos, podendo variar-se entre eles os parâmetros de ensaio.

10	Observação ao microscópio: deve ser possível observar e registar no microscópio o comportamento das bactérias enquanto são sujeitas aos diferentes parâmetros e variantes dos ensaios.	Só esta funcionalidade permite compreender melhor e provar a relação entre os parâmetros dos ensaios e os efeitos sobre as bactérias.
11	Automatização: o movimento da peça em análise durante um ciclo deve ser automatizado, não necessitando de manuseamento do operador.	Permite o controlo exacto de todos os parâmetros; tempo de exposição, duração do ciclo, frequência e intensidade de excitação, assegurando a repetibilidade dos ensaios.
12	Portabilidade: Os protótipos devem ser robustos, apresentar dimensões reduzidas e fáceis de transportar.	A portabilidade do equipamento é um requisito importante, permite a realização de ensaios em campo, superando as actuais técnicas como SEM e TEM.
13	Modularidade: os diferentes constituintes dos protótipos devem ser modulares e compatíveis entre si.	Deve ser adoptada uma filosofia de modularidade e compatibilidade entre os vários componentes dos protótipos, tendo em vista evitar redundâncias e reduzir o número de componentes e equipamentos. Isto permitirá aproveitar por exemplo drives electrónicos, código do software, guias e motores de movimentos.
14	GUI: software com uma <i>graphical user interface</i> intuitiva e funcional.	Deve ser possível através do software controlar todos os parâmetros de funcionamento dos equipamentos.
15	Economia: Os equipamentos devem ter um custo de produção e manutenção inferior a 3-4 k€.	Presidem a este critério questões estratégicas de eventual comercialização do equipamento, assim como constrangimentos orçamentais existentes no âmbito do trabalho.
16	Eliminação do excesso de Células Bacterianas	É necessário assegurar a eliminação do excesso de CB da superfície em análise já que este interferiria com a leitura de resultados.

Para melhor compreensão do exposto nos pontos 2, 3 e 5 da tabela 3.1, apresentam-se na Figura 3.1 dois esquemas para os ilustrar. Na figura 3.1 a) observa-se a acção de campo magnético no plano horizontal com rotação segundo z, indicando-se em b) a composição do campo actuante no plano vertical com rotação em torno do eixo y.

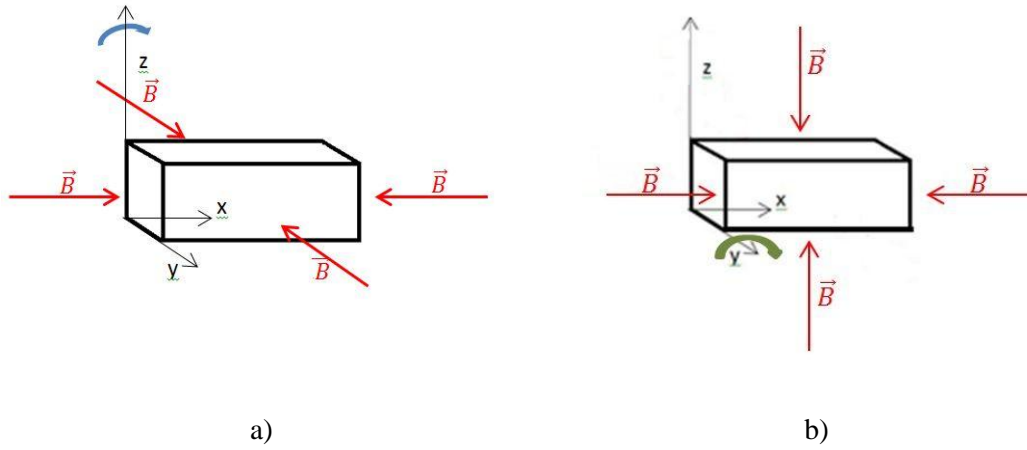


Figura 3.1- Esquemas de rotação no plano a) horizontal e b) vertical

Só com base nestas especificações técnicas foi possível iniciar a fase de concepção e projecto descrita no Capítulo 4.

4. CONCEPÇÃO, PROJETO E PRODUÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA END POR CB

Neste capítulo são apresentados todos os dados relativos aos equipamentos produzidos relativos ao seu projecto, concepção e produção, bem como sobre os sistemas utilizados para a sua automatização.

4.1. Equipamento baseado em Campo Magnético

A variante desta técnica menos estudada por João Borges [1] foi a aplicação de campos magnéticos, pelo que foi desenvolvido equipamento para tirar partido desta propriedade das células bacterianas de modo a promover a sua penetração nos defeitos, cumprindo os requisitos previamente descritos no capítulo 3 desta tese.

4.1.1. Dispositivo com Quatro Solenóides Horizontais para Microscópio

Foram criados equipamentos para comprovar e avaliar a resposta das bactérias quando sujeitas a campo eléctrico e magnético. Estes equipamentos são montados na base do microscópio de modo a que seja possível ver através deste o comportamento das bactérias quando sujeitas ao campo.

O primeiro dispositivo concebido, visível na Figura 4.1, é constituído por quatro solenóides mutuamente perpendiculares, colocando-se a peça a analisar no centro. Os quatro solenóides são fixos por ligações aparafusadas a uma base de acrílico, permitindo estas fixações a regulação da distância destes ao provete.

Os solenóides utilizados são da Serie 133, adquiridos na *RsComponents* [15].

O dispositivo é fixo à base do microscópio de modo a se poder utilizar os parafusos de regulação deste para a mover, facilitando o posicionamento em relação à lente e consequentemente a focagem.

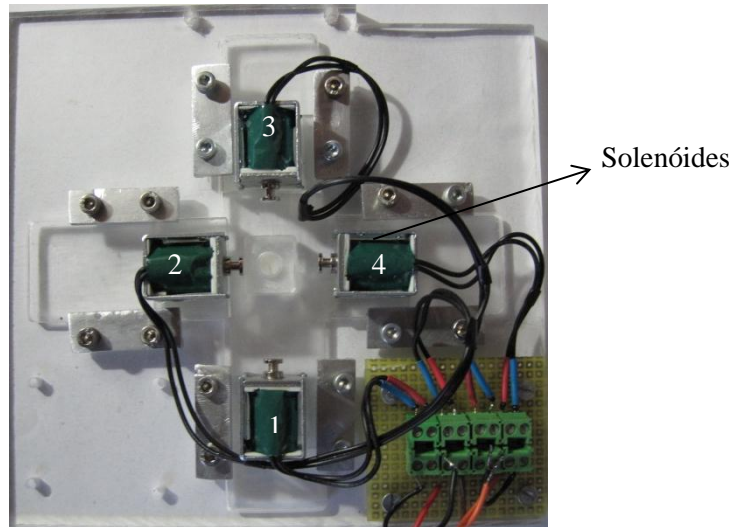


Figura 4.1- Equipamento com 4 solenóides para microscópio

A integração deste dispositivo no microscópio permite- sendo a captação de imagem feita pelo software Image-Pro Plus com uma câmara CCD EvolutionTM MP5.1 da Media Cybernetics, Inc. ligada a um microscópio Olympus CX 40- a análise imediata do movimento das células, bem como o posterior estudo dos resultados obtidos, como observado na Figura 4.2.

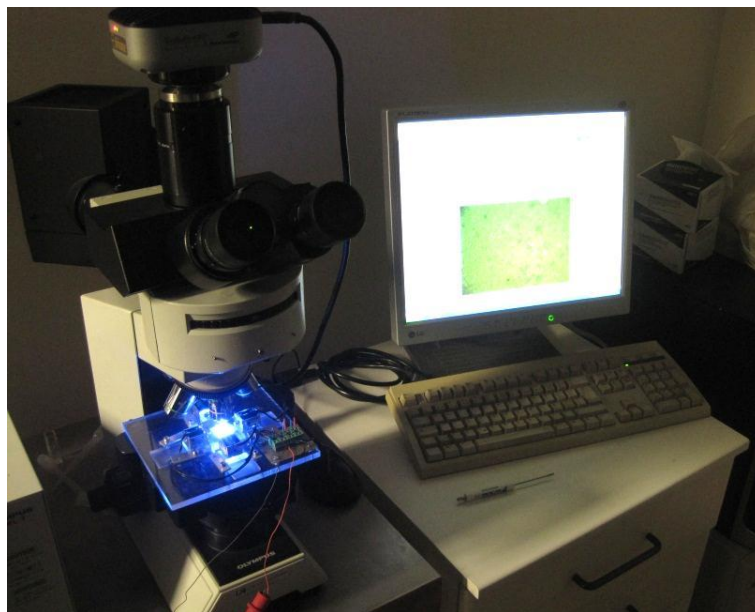


Figura 4.2- *Layout* de utilização do dispositivo de 4 solenóides

O esquema observado na Figura 4.3 mostra as diferentes possibilidades de alimentação dos solenóides, variando a orientação do campo magnético gerado.

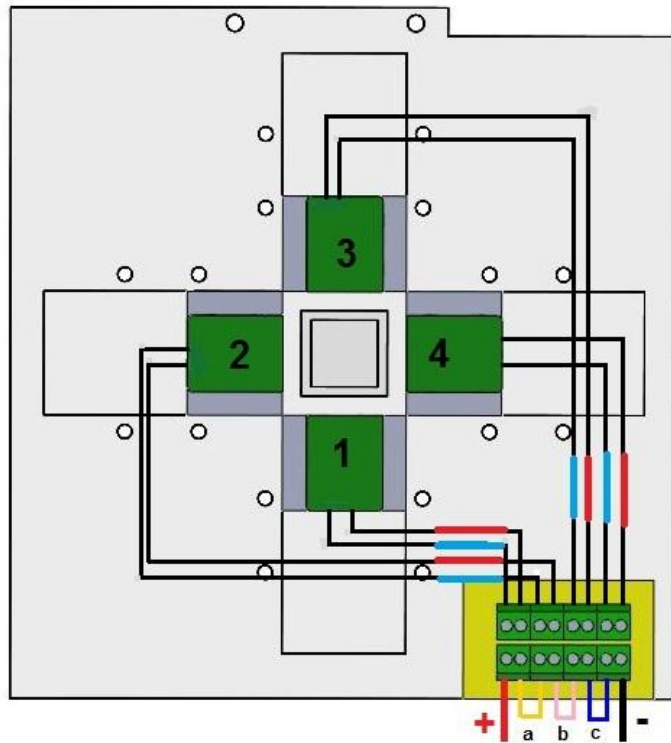


Figura 4.3- Esquema de Excitação de dispositivo com quatro solenóides

Os esquemas representados na Figura 4.4 pretendem ilustrar as diferentes disposições espaciais do Campo Magnético.

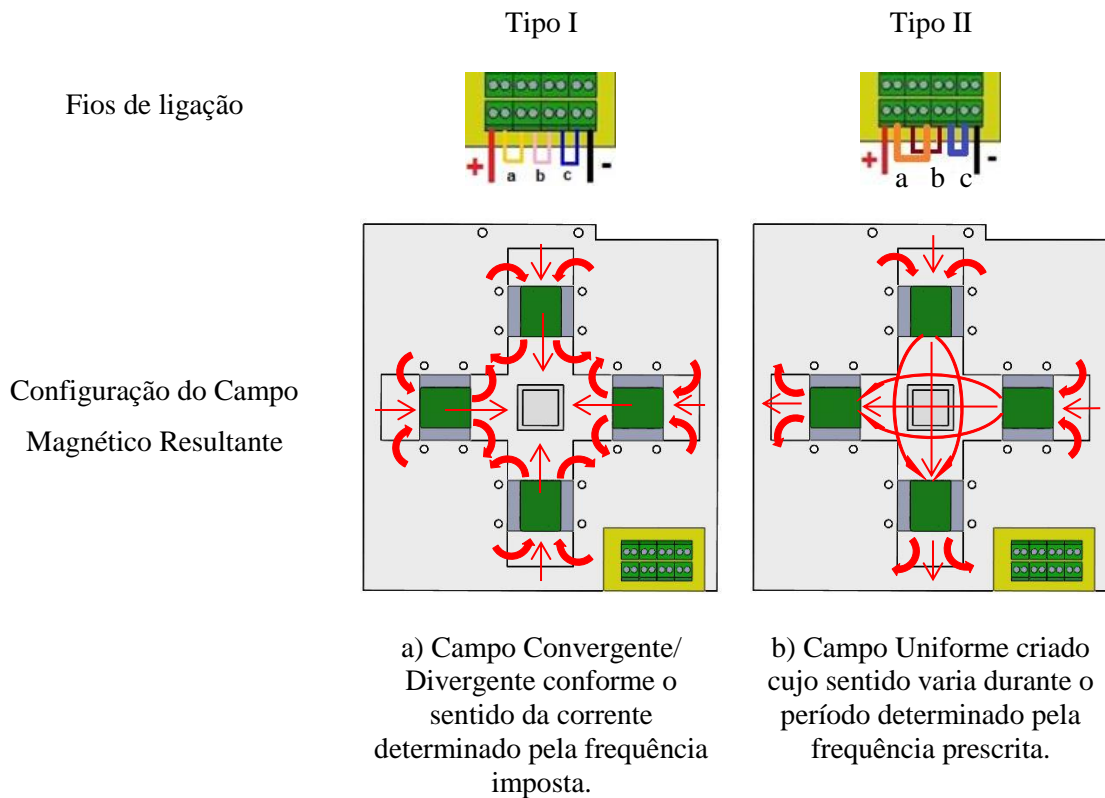


Figura 4.4- Esquema de linhas de campo no Dispositivo com Quatro Solenóides para Microscópio

Os solenóides estão ligados em série, como mostrado na Figura 4.3, com o auxílio de três fios eléctricos representados por “a, b e c”.

Caso se pretenda um campo linear, liga-se em série apenas dois solenóides (1 e 3) ou (2 e 4). Para criar uma polaridade contrária nos solenóides, de modo a que se atraiam, deve inverter-se a ordem de alimentação destes, isto é, deve ligar-se no primeiro “azul, encarnado” e no seguinte “encarnado, azul”.

A base deste equipamento é em acrílico com 6 mm de espessura destinada a ser montada na base do microscópio, para tal, foram abertos dois furos passantes que permitem a fixação desta à base do microscópio de modo a poderem ser utilizados os parafusos de regulação deste para a mover.

Para ser possível a regulação independente da distância de cada um dos solenóides ao centro da base, esta foi maquinada numa *3D Plotter*, tendo-se aberto quatro rasgos, formando uma cruz, como se observa na Figura 4.1.

Para permitir este ajuste na posição dos solenóides foram maquinadas oito peças em alumínio que permitem fazer o aperto das bases deslizantes dos solenóides à base de acrílico. Após o ajuste da distância pretendida, os solenóides são fixos por aperto de ligações aparafusadas.

4.1.2. Solenóide de Campo Vertical

Construiu-se um solenóide móvel, para ser possível colocá-lo quer na horizontal, quer em posição vertical.

Para a realização do solenóide mostrado na Figura 4.5, enrolou-se fio de cobre em onze espiras em torno de uma peça de aço com uma permeabilidade de $8.75 \times 10^{-4} \text{ Hm}^{-1}$, maquinada no torno, com entalhes nos topos para evitar o efeito indesejado de correntes de *Foucault* [16]. A resistência eléctrica medida deste solenóide é de 0.5Ω .

Pode então calcular-se o campo gerado pelo solenóide através da equação 4.

Onde I [A] é a intensidade da corrente, μ [Hm^{-1}] é a permeabilidade do meio e n [-] o número de espiras [2].

Este dispositivo aquece consoante a corrente eléctrica que o atravessa devido ao efeito de Joule. Isto é expresso pela equação 5 [17].

$$Q = I^2 \cdot R \text{ (Eq. 5)} \quad [2]$$

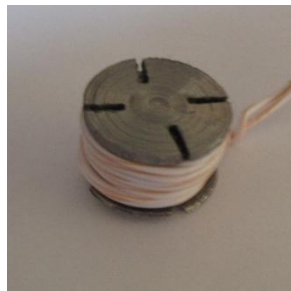


Figura 4.5- Solenóide

4.1.3. Dispositivo com Rotação de Campo Magnético para Microscópio

O princípio de funcionamento deste dispositivo é o mesmo do apresentado em 4.1.1, permitindo contudo um maior número de direcções do campo gerado e uma variação mais rápida entre estas; crê-se que esta alternância de direcções imprime maior mobilidade às células, favorecendo que penetrem nos defeitos. Para tal, utilizou-se um estator de um motor passo a passo bipolar, incluindo os enrolamentos e as ligações eléctricas, uma vez que no interior deste é gerado um campo magnético cuja disposição espacial roda em torno do eixo de axissimetria do motor, correspondente ao seu eixo. Desta forma, impondo os sinais eléctricos ao estator, como se o motor estivesse em funcionamento, consegue-se o efeito desejado.

Este dispositivo tem também uma base em acrílico, furada de modo a permitir a sua fixação ao mecanismo de movimentação da mesa do microscópio como mostrado na Figura 4.6, sendo movimentada pelos parafusos de regulação deste para que seja possível analisar os resultados simultaneamente com o decorrer do ensaio, permitindo também a aquisição de imagens para posterior análise. Sobre esta base foi fixo, por uma ligação aparafusada M4, um estator de um motor passo a passo. O estator foi escolhido de modo ao seu diâmetro interno permitir a focagem da lente, isto é, o seu diâmetro interno é superior ao diâmetro externo da lente.

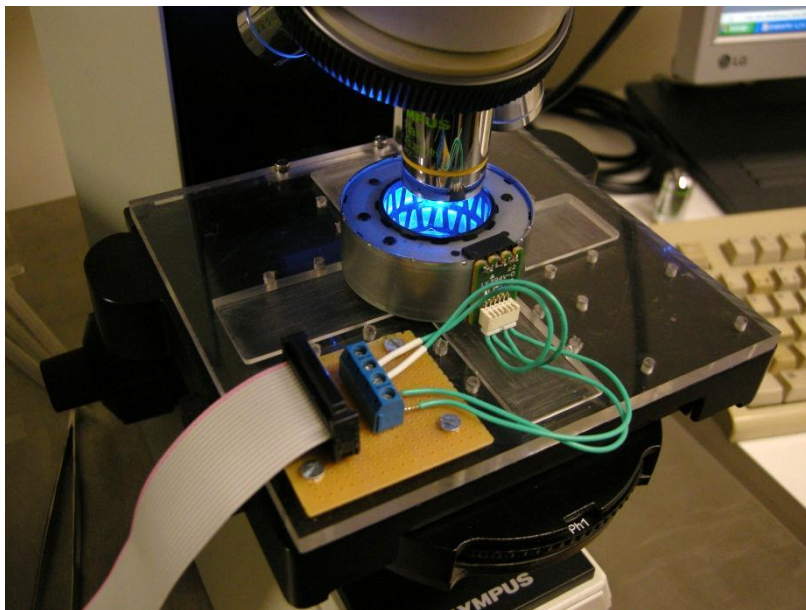


Figura 4.6- Estator de motor passo a passo

Na Figura 4.7 representa-se uma sequência do que acontece no estator deste tipo de motores para que melhor se entenda alternância de direcção do campo.

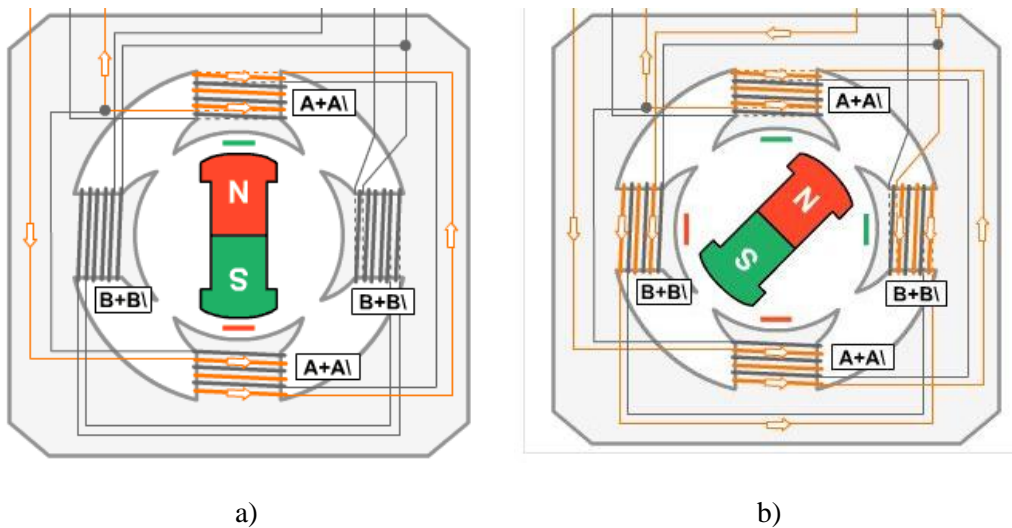


Figura 4.7- Sequência de Excitação a) Step 1, b) Step 2

Na Figura 4.6 pode observar-se a ligação feita para o estator ser excitado com uma placa da *Astrosyn G210* [18] através de um *Virtual Instrument* criado em *LabView* para controlo de motores de passo a passo que permite controlar o tempo de excitação bem como a frequência do sinal. Para a excitação da referida placa, é necessária a utilização de uma fonte variável de tensão, capaz de debitar 24V.

A colocação de manga retráctil branca em dois dos fios permite distinguir as duas fases deste estator.

4.1.4. Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical

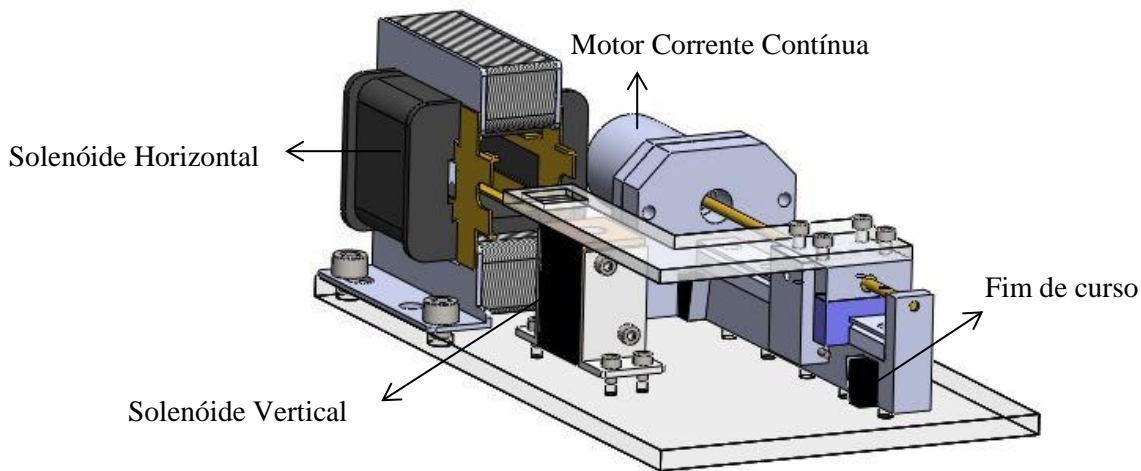


Figura 4.8- Modelo de *SolidWorks* do dispositivo com 2 solenóides

Este equipamento (Figura 4.8) destina-se à aplicação de campos magnéticos em duas direcções distintas consecutivamente, para tal foi montando um solenóide de modo a emitir linhas de campo vertical e outro para criar um campo horizontal.

Com o campo magnético vertical pretende-se uma melhor penetração em profundidade nos defeitos, destinando-se o outro solenóide a promover a mobilidade das células sobre toda a superfície a analisar.

A peça a analisar é colocada sobre uma placa de acrílico, material escolhido para não interferir no campo magnético, onde foi aberta uma caixa quadrada com uma *3D Plotter*. Esta peça é ligada a um espaçador de alumínio por ligações aparafusadas M3. O espaçador, acoplado por quatro ligações aparafusadas M3, a um carro de rolamento linear com um barramento de 120 mm da *NSK*, adquirido através da *RsComponents* [15], permite o movimento linear do conjunto.

A transmissão do movimento do motor ao espaçador é feita através de um veio roscado com um casquilho de latão roscado no interior, sendo feito o acoplamento deste ao espaçador por aperto de um parafuso sextavado M3. Isto permite, em caso de necessidade, fazer o movimento manualmente, sendo apenas necessário desapertar este parafuso, permitindo que o espaçador se movimente independentemente do varão. Contudo, esta opção não permite um controlo exacto dos tempos em cada solenóide. Este conjunto de transporte da peça pode ser observado na Figura 4.9

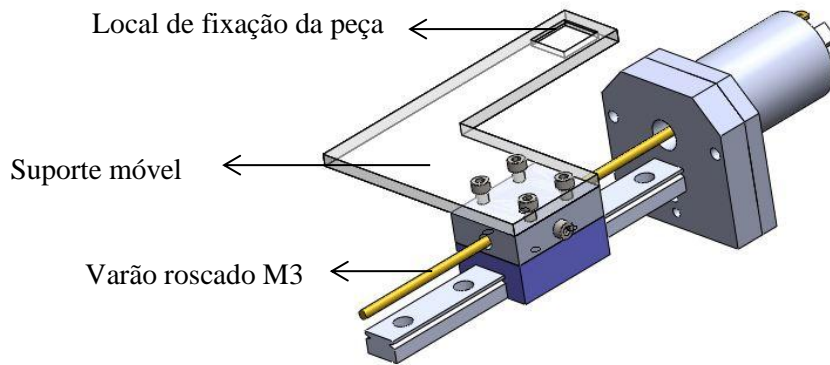
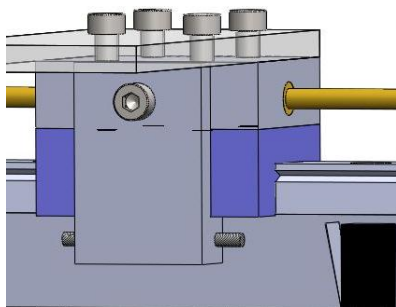


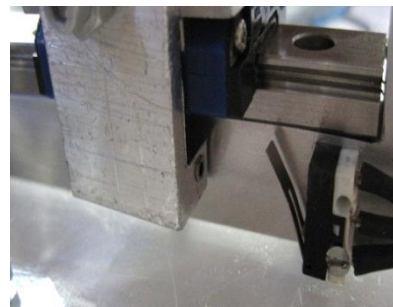
Figura 4.9- Modelo *SolidWorks* do conjunto de transporte da peça

O barramento está ligado a um suporte por ligações aparafusadas M3, tendo sido este suporte maquinado a partir de um bloco de alumínio por fresagem, abrindo-se posteriormente furos para fixação e outro para apoio do varão roscado, do lado oposto ao motor.

Dado que se pretende a inclusão de fins de curso eléctricos neste sistema, foi necessário criar o suporte mostrado na Figura 4.10 para as guias que os actuam, para tal foi maquinada uma peça em alumínio com dois furos roscados onde são colocados dois varões roscados M2 que permitem um ajustamento preciso da posição do carro ao actuar os fins de curso. Esta peça é ligada ao espaçador de alumínio, por uma ligação aparafusada M3 de modo ao seu movimento ser sempre solidário com este.



a)



b)

Figura 4.10- Vista de pormenor do modelo *SolidWorks* a) e das guias para actuação de fins de curso b)

Como inicialmente se pensou utilizar um motor passo-a-passo, foi concebido o suporte em alumínio de modo a o fixar ao apoio do barramento por duas ligações aparafusadas M3. Contudo, este foi substituído por um motor de corrente contínua para o movimento ser mais rápido, tendo sido necessário produzir um adaptador para fixação. Neste adaptador, foram abertos os furos necessários à fixação do motor de corrente contínua e ao seu acoplamento ao

suporte anterior. Com este sistema pode voltar a utilizar-se o motor passo-a-passo, bastando para tal retirar o adaptador e fixar o motor ao primeiro suporte.

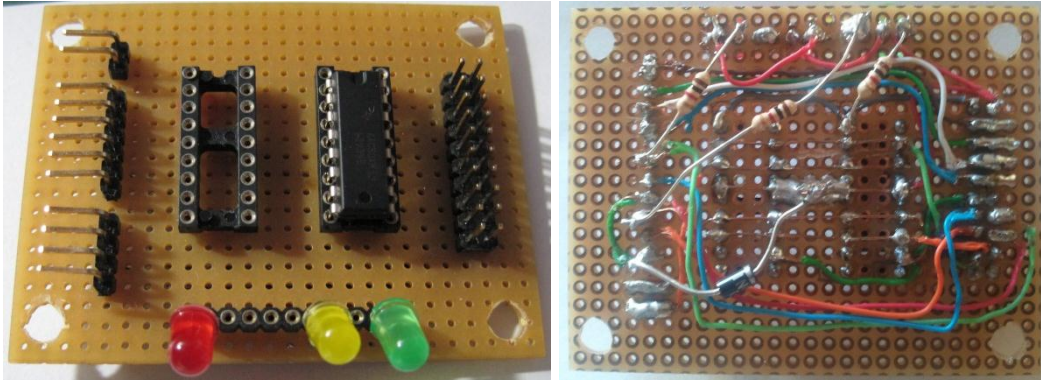
Todo o conjunto foi montado sobre uma base de acrílico rectangular, optou-se por este material com o intuito de reduzir o peso total e para não interferir com os campos gerados pelos solenóides.

Os componentes foram ligados à base por ligações aparafusadas M3, tendo-se apenas optado por M4 para a fixação do solenóide destinado a criar campos horizontais, devido aos furos já existentes na sua base.

Para a fixação do outro solenóide, recorreu-se a dois apoios em alumínio, cortados de um perfil quadrado, onde foram abertos furos para a fixação do solenóide, aproveitando os furos roscados da sua carcaça.

De modo a diminuir a necessidade de manuseamento durante a realização dos ensaios, permitindo o controlo exacto dos tempos de excitação em cada solenóide, bem como a sua frequência de excitação- foi criado para controlo do movimento linear do conjunto- um circuito, presente na Figura 4.11, no qual está integrado um circuito integrado L293, que recebe os sinais enviados pelo VI criado em *LabView*, alimentando os solenóides e o motor, através das portas digitais de uma placa *6008 National Instruments* [19]. A ligação entre a placa e o circuito é feita por um *flatcable*. A excitação dos solenóides é feita por uma placa *Astrosyn G210* [18]. Ao serem actuados, os fins de curso enviam um sinal (*input*) para a placa, permitindo ao *software* controlar o sentido de rotação do motor consoante a posição do sistema móvel. Os esquemas eléctricos efectuados para estas ligações apresentam-se no Anexo 6.

Neste circuito foram incluídos três *led* com o propósito de facilitar a observação do funcionamento deste, o verde destina-se a ver se o circuito está a ser alimentado, os outros dois, encarnado e amarelo, permitem saber qual dos fins de curso está a ser activado, assinalando em que extremidade do barramento se encontra o sistema móvel.



a)

b)

Figura 4.11- Circuito a) vista de topo b) verso da placa

Na Figura 4.12 observa-se o esquema deste circuito.

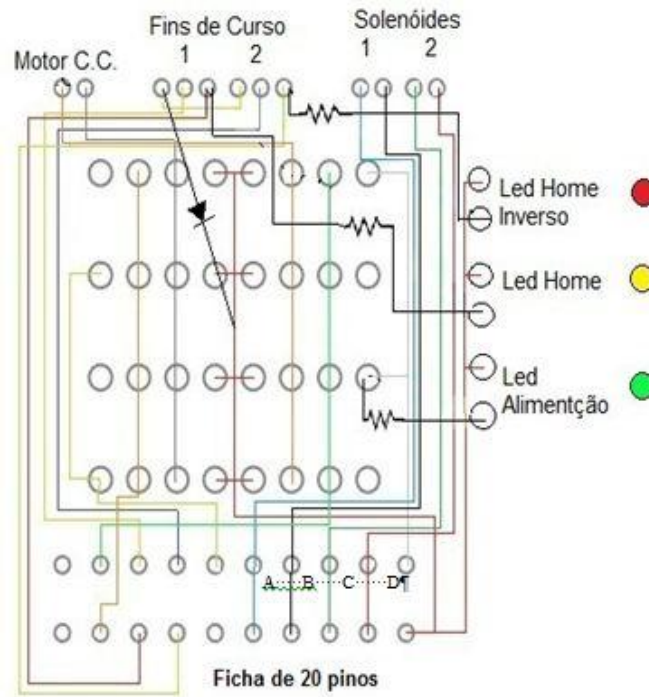


Figura 4.12- Esquema do circuito do Dispositivo Automatizado para Campo Magnético horizontal e Vertical

As resistências representadas nos circuitos de alimentação dos *led* são de 1Kohm.

O esquema da Figura 4.13 apresenta o esquema das ligações entre a placa *6008 National Instruments* e a placa *Astrosyn G210*.

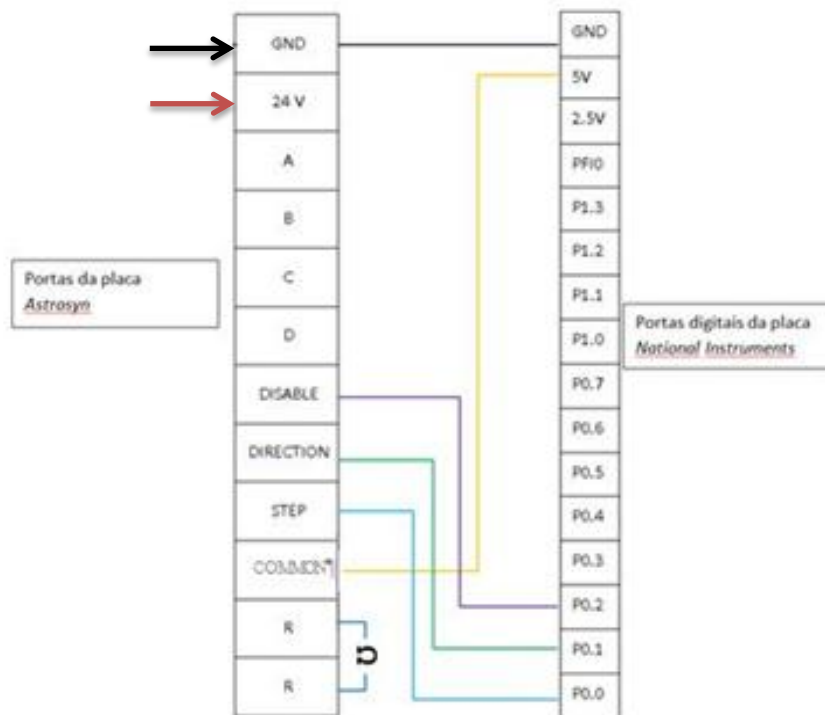


Figura 4.13 – Esquema das ligações entre a placa 6008 National Instruments e a placa AstroSyn G210

As ligações entre as placas e o circuito foram estabelecidas por um *flatcable* ligado a uma ficha de 20 pinos para permitir a sua ligação ao circuito apresentado em 4.11, apresentando-se na Figura 4.14 as ligações estabelecidas por este cabo.

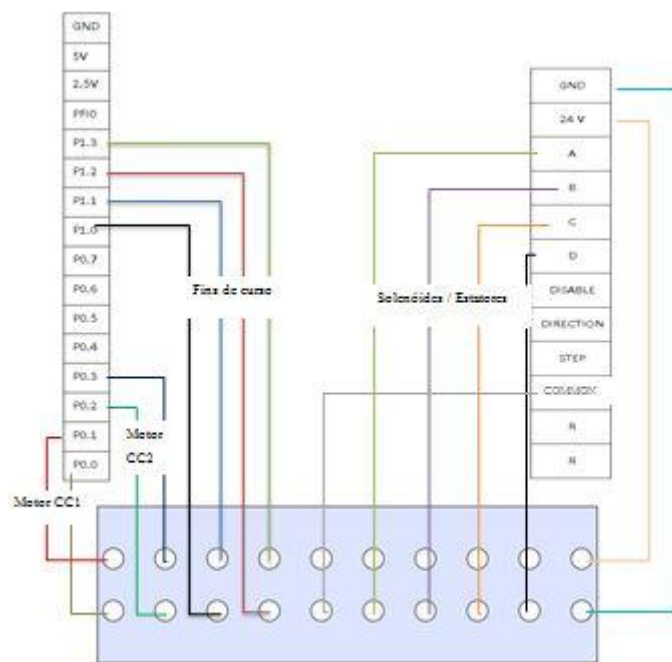


Figura 4.14- Ligação do *flatcable* entre as placas e a ficha de 20 pinos

O painel frontal deste VI, apresentado na Figura 4.15, permite ao utilizador definir os parâmetros de ensaio, frequência e tempo de excitação em cada solenóide, bem como indicar o número de ciclos desejado. Em cada ciclo são cumpridos os parâmetros estabelecidos e é executado o movimento linear entre cada solenóide.

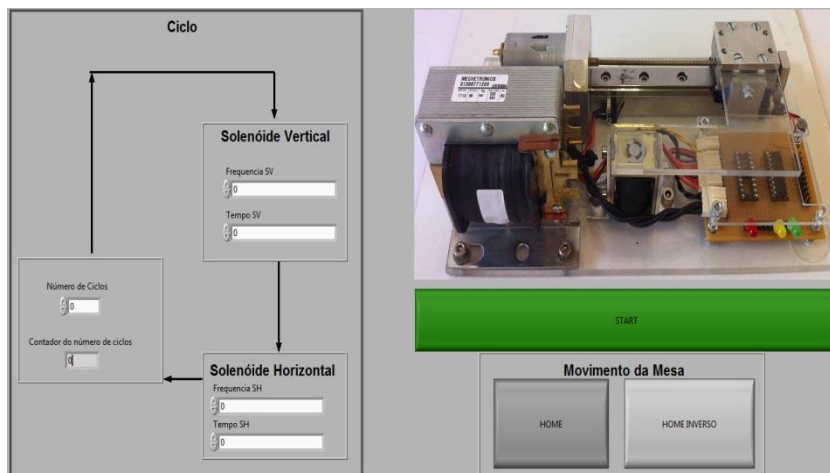


Figura 4.15- Painel Frontal de *LabView* para dispositivo de dois solenóides

É possível através do botão *Home* dar indicação ao sistema para voltar à posição inicial, sobre o solenóide vertical, e com o *Home Inverso* parar a peça dentro do solenóide que produz o campo horizontal. Na Figura 4.16 observa-se o sub-sistema móvel nas duas posições movendo-se a peça do solenóide vertical para o horizontal de a) para b).

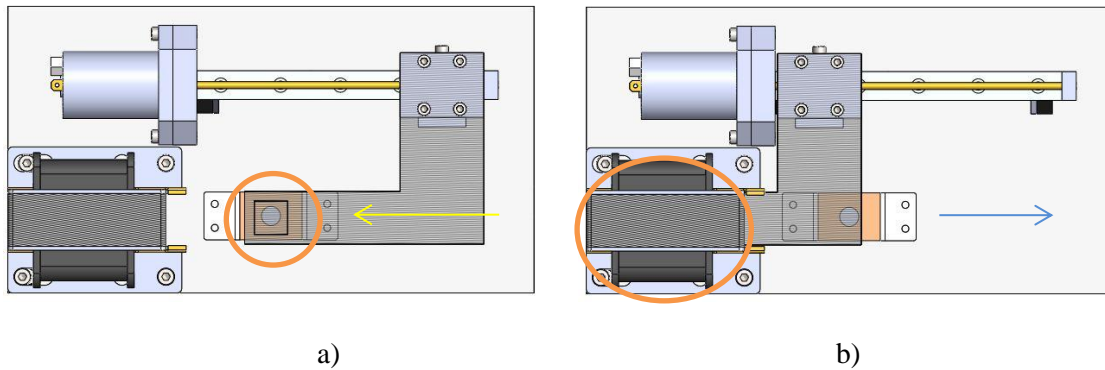


Figura 4.16- Esquema exemplificativo das duas posições de ensaio; a) campo vertical “*Home*”;
b) campo horizontal “*Home Inverso*”

Na Figura 4.17 observa-se o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.

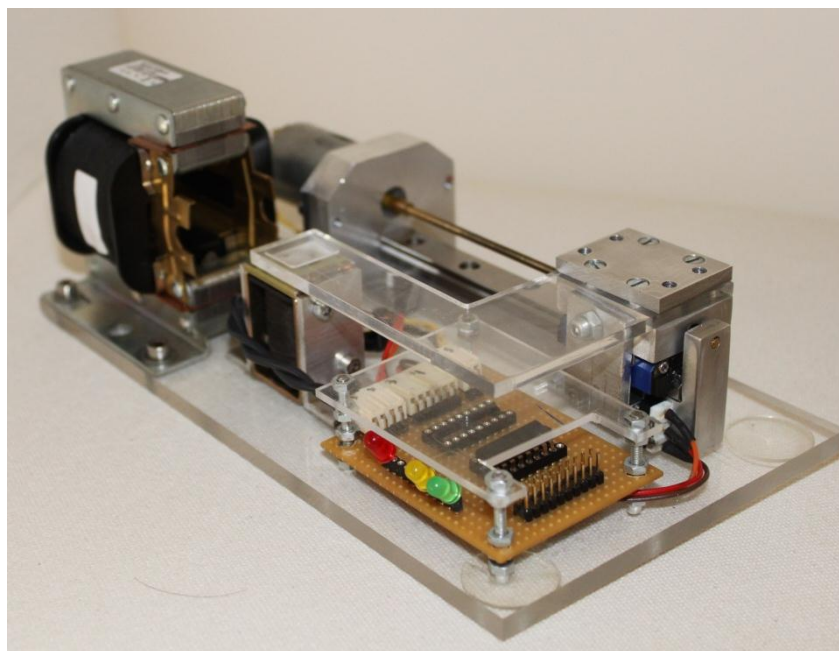


Figura 4.17- Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.

Este dispositivo apresenta as seguintes cotas de atravancamento:

Tabela 4.1- Cotas de Atravancamento de dispositivo automatizado para Campo Magnético Vertical e Horizontal

Direção	Dimensão [mm]
Comprimento	220
Largura	120
Altura	80

A massa deste dispositivo é aproximadamente 1400g.

4.1.5. Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical

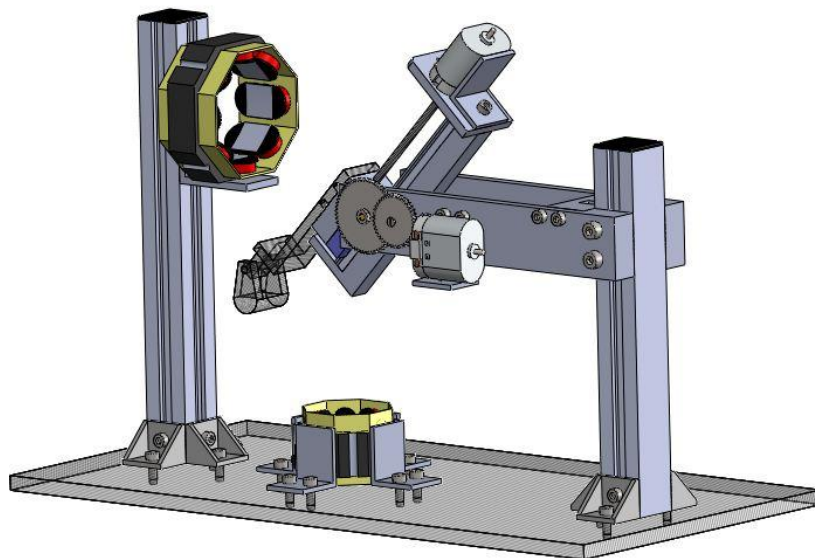


Figura 4.18- Modelo de *SolidWorks* do dispositivo automatizado com rotação de \vec{B} nos planos Horizontal e Vertical

Este equipamento (Figura 4.18) permite a aplicação de campos magnéticos na peça em várias direcções distintas, fazendo-se a alternância entre elas de uma forma rápida, isto porque o campo é gerado por estatores de motores passo a passo, sendo a peça colocada no local correspondente ao rotor; assim a excitação feita é semelhante ao exemplificado na Figura 4.7 deste documento.

Como a peça a analisar se mantém sempre na horizontal, o estator colocado sobre a base é responsável pela alternância de direcções no plano horizontal enquanto o estator perpendicular a este faz a alternância no plano vertical.

Apesar da semelhança com o equipamento descrito em 4.1.4, este permite um maior número de direcções de campo em torno da peça em dois planos distintos enquanto o anterior apenas permite uma componente vertical e outra horizontal. Pretende-se com estas variações conseguir uma mobilidade superior à obtida com o equipamento anterior já que se cria uma maior agitação que se pensa ser benéfica para vencer as forças de inércia e atrito nas células bacterianas. Por outro lado, havendo várias direcções no plano vertical pode vir a obter-se uma penetração mais eficaz do que a verificada apenas com uma componente vertical.

Este dispositivo também é controlado através de um V_i , controlando-se remotamente todo o ciclo de funcionamento. Neste caso já não existe só movimento linear, este é combinado com o movimento de rotação, dado que é necessário alinhar a peça em análise com cada um dos estatores. Assim, partindo da posição de repouso inicial, iniciar-se-á um movimento linear ficando a peça no interior do estator que provoca o campo com direcção perpendicular à superfície em análise, de seguida é realizado um movimento linear de sentido contrário para que seja possível a rotação do braço e o posterior alinhamento com o estator colocado na base do equipamento, após este passo, a peça volta à posição inicial, como exemplificado no esquema da Figura 4.19.

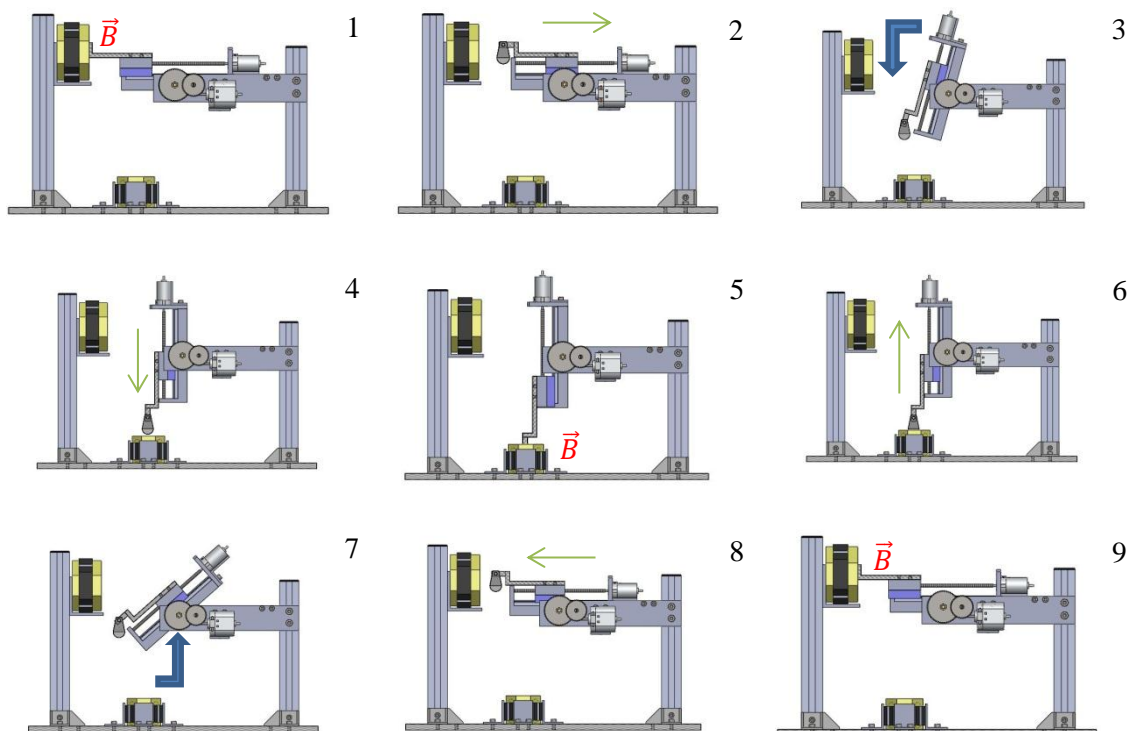


Figura 4.19- Sequência de movimento e excitação do dispositivo automatizado com rotação de Campo Magnético

O estator que produz os campos na direção horizontal está montado sobre a base, fixo por suportes cortados e maquinados em alumínio, por ligações aparafusadas M3, enquanto o outro está fixo a um perfil de alumínio *Bosch* [20] para permitir o seu ajuste em altura, conseguido devido ao tipo de fixação utilizada.

Apesar do movimento de rotação, pretende-se que a peça em análise se desloque sempre paralela à base, pelo que foi criado um suporte oscilante, concebido de modo a o seu centro de massa o manter sempre nessa posição, que pode ser visto em pormenor na Figura 4.20.

A ligação entre este suporte e o carro de rolamento linear da *NSK* [15] é feita por um apoio maquinado em acrílico, com furos para fixação e suporte do eixo de rotação do suporte e outro maquinado em alumínio com 10 mm de espessura.

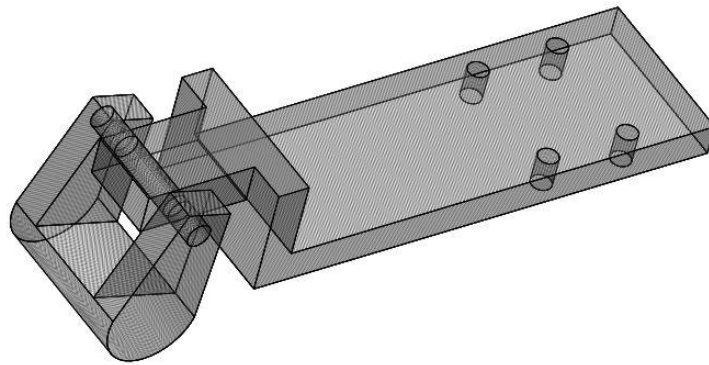


Figura 4.20- Pormenor do suporte oscilante e do apoio em acrílico modelados em *SolidWorks*

Para fazer a rotação, optou-se por um sistema de engrenagem sem-fim por permitir parar o braço de rotação na posição pretendida, sem haver a necessidade de incluir outro componente mecânico para o travar. Na Figura 4.21 pode ver-se este sistema em pormenor.

A relação de transmissão é aumentada utilizando duas rodas dentadas rectas com o intuito de reduzir a velocidade de rotação, já que a velocidade de rotação do motor de corrente contínua é muito elevada para o fim pretendido.

De seguida apresentam-se os cálculos das relações de transmissão entre o parafuso sem-fim e a roda de menor diâmetro e entre esta e a outra roda cilíndrica recta [21].

Cálculo da relação de transmissão entre o parafuso sem-fim e a primeira engrenagem cilíndrica:

ω_p - velocidade de rotação do parafuso sem fim

ω_1 - velocidade de rotação da engrenagem cilíndrica recta de menor diâmetro

ω_2 - velocidade de rotação da engrenagem cilíndrica recta de maior diâmetro

z_1 - número de dentes da roda de menor diâmetro = 42

z_2 - número de dentes da roda de maior diâmetro = 60

n - número de entradas do parafuso sem fim = 1

$$\omega_1 = \frac{\omega_p \times n}{z_1} \Leftrightarrow \frac{\omega_1}{\omega_p} = \frac{n}{z_1} \Leftrightarrow \frac{\omega_1}{\omega_p} = \frac{1}{42} \Leftrightarrow \frac{\omega_1}{\omega_p} \cong 0,024$$

Cálculo da relação de transmissão entre as engrenagens cilíndricas rectas.

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \Leftrightarrow i = \frac{z_2}{z_1} \Leftrightarrow i = \frac{60}{12} \Leftrightarrow i \cong 5$$

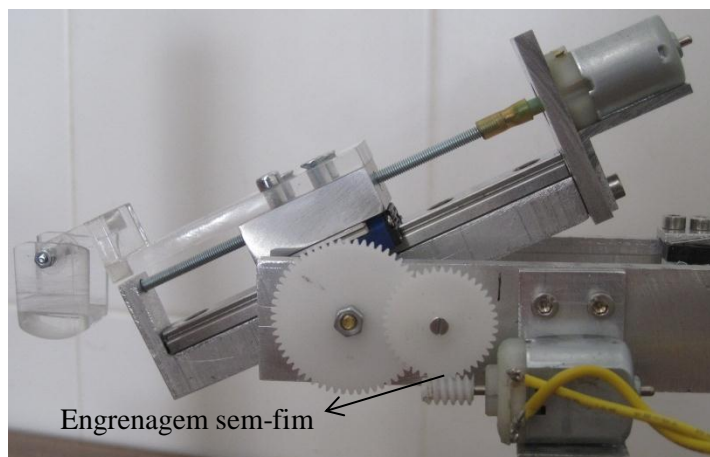


Figura 4.21- Pormenor da engrenagem sem-fim

O apoio do eixo de rotação é feito em dois rolamentos de esferas com diâmetro interno de 3 mm e 7 mm de diâmetro exterior, do fabricante *SKF* [22], adquiridos na *RsComponents* [15]. Estes rolamentos são acoplados por aperto a duas peças maquinadas em alumínio que são ligadas a um perfil *Bosch* [20], de secção 40x40 mm, por ligações aparafusadas M4.

A fixação do motor de corrente contínua responsável pela rotação é feita num suporte de alumínio, cortado de um perfil quadrado e ligado por duas ligações aparafusadas M3 a uma das peças onde é suportado o eixo de rotação.

Os perfis são fixos à base de acrílico por três acessórios triangulares, comercializados para fixar componentes ao perfil, por ligações aparafusadas M4.

O sistema de movimento linear, visível na Figura 4.22, é idêntico ao utilizado no dispositivo constituído por dois solenóides, diferindo apenas por não permitir o movimento manual do carro e por ter um curso menor. Foi também utilizado um motor de corrente contínua ligado por uma manga de borracha a um varão roscado M3 para este movimento.

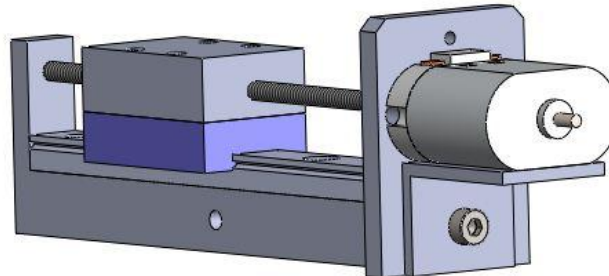


Figura 4.22- Modelo em *SolidWorks* do conjunto de movimento linear

Neste equipamento foram utilizados quatro fins de curso, para controlo do movimento de rotação foram colocados dois de modo a serem accionados nas posições de repouso do mecanismo de rotação, tendo-se maquinado suportes de alumínio para os colocar na posição desejada, como ilustrado na Figura 4.23. O funcionamento dos fins de curso do sistema de movimento linear é semelhante ao do dispositivo com dois solenóides, permitindo identificar em que extremidade do barramento se encontra o carro, enviando um *input* ao *Vi* desenvolvido.

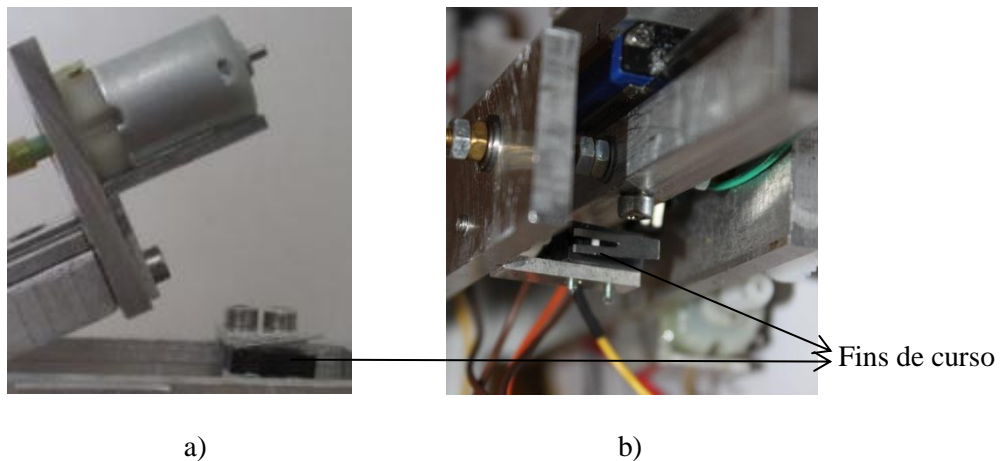


Figura 4.23- Pormenor de fins de curso de rotação; a) posição “*Home CC2*”, b) posição “*Home Inverso CC2*”

Na Figura 4.24 observa-se o circuito efectuado para controlo deste dispositivo; este difere do criado para o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical por ser necessário alimentar mais um motor de corrente contínua.

As ligações entre as placas e o *flatcable* são as mesmas utilizadas para o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical, apresentadas nas Figuras 4.13 e 4.14, com esta opção os dispositivos respeitam o requisito de modularidade com o intuito de simplificar a alternância entre uso de dispositivos.

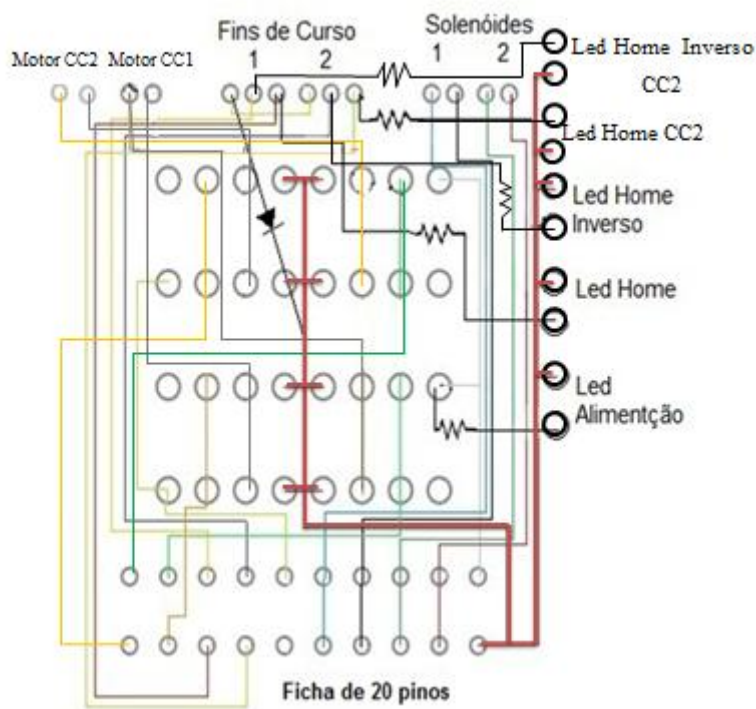


Figura 4.24- Esquema do circuito do Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical

As resistências representadas nos circuitos de alimentação dos *led* são de 1Kohm.

Este dispositivo apresenta as seguintes cotas de atravancamento:

Tabela 4.2- Cotas de Atravancamento de dispositivo automatizado com Rotação de Campo Magnético Vertical e Horizontal

Direcção	Dimensão [mm]
Comprimento	300
Largura	150
Altura	175

A massa deste dispositivo é aproximadamente 1100g.

Na Figura 4.25 mostra-se Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical.

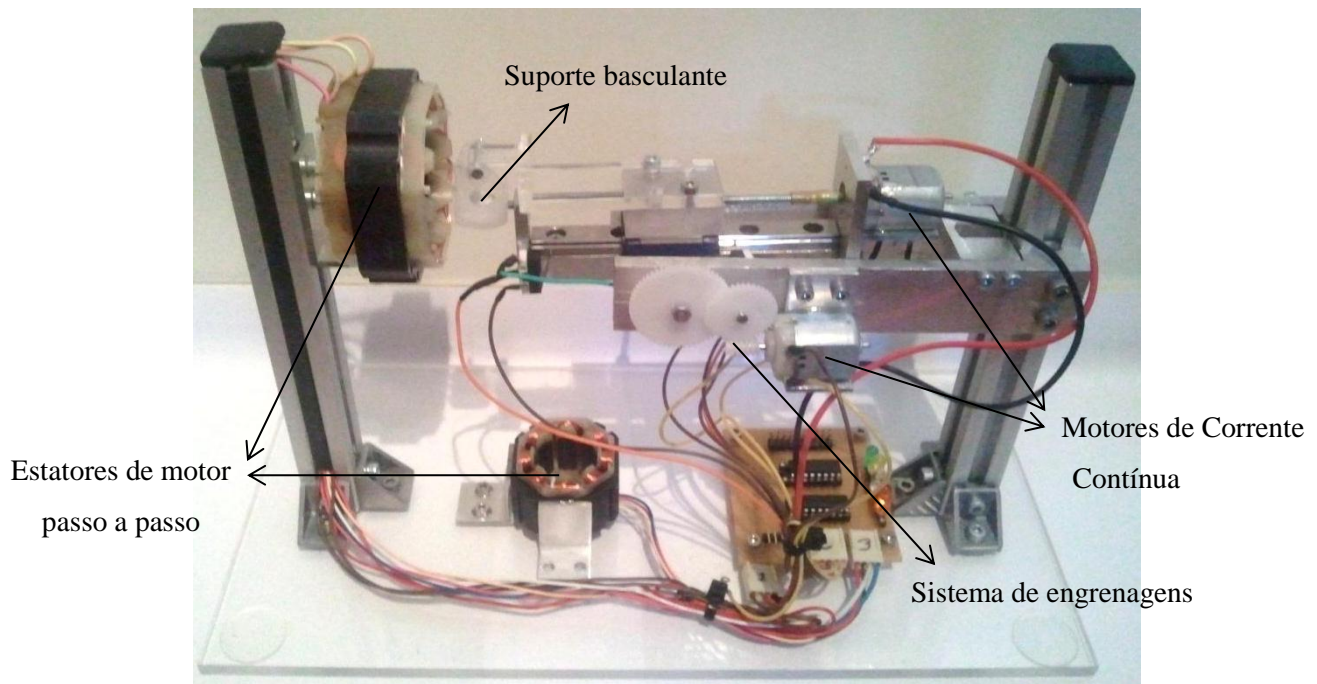


Figura 4.25- Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical

4.2. Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico

João Borges não conseguiu, com os parâmetros utilizados no seu trabalho, obter os efeitos desejados [1]. Isto levou à necessidade de projecto e produção de equipamento que, por aplicação de campos eléctricos, cumpra os requisitos expressos no capítulo 3.

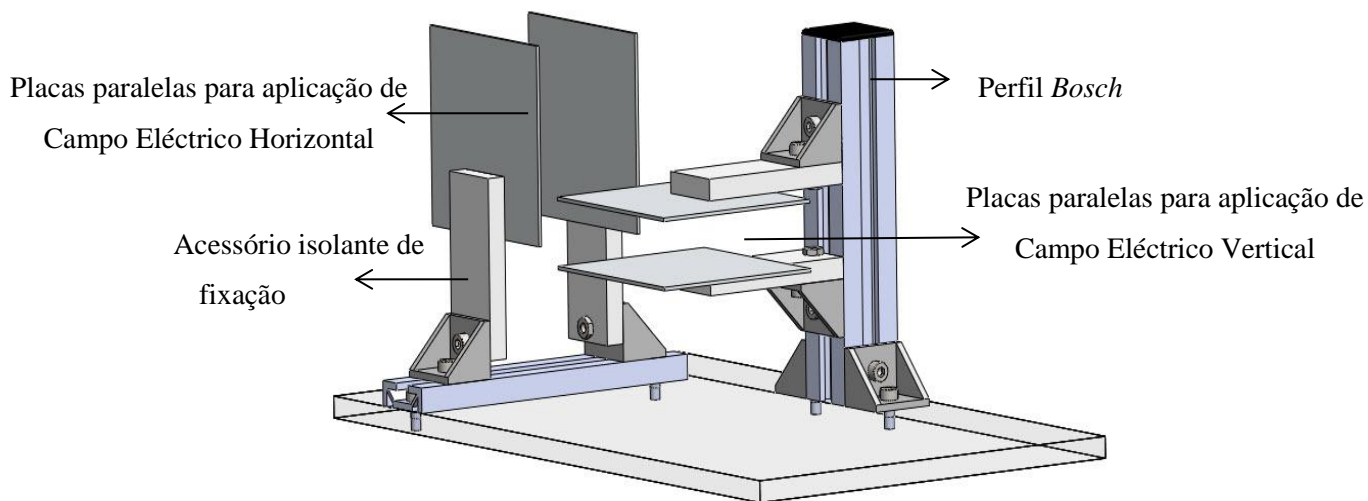


Figura 4.26- Modelo de *SolidWorks* do dispositivo para aplicação de Campo Eléctrico

O dispositivo mostrado na Figura 4.26 destina-se a aplicar campos eléctricos na peça em análise em duas direcções perpendiculares para melhorar a mobilidade e fomentar a penetração das bactérias nos defeitos, pelo que é constituído por dois pares de placas. A fixação das placas é feita através de peças de acrílico a perfil *Bosch* [20], permitindo um ajuste da distância destas à peça de modo a esta poder ser posicionada na zona de campo mais uniforme.

Dadas as semelhanças verificadas com o equipamento para aplicação de dois campos magnéticos; apenas é necessário um movimento linear entre os dois pares de placas e controlar com exactidão o tempo que a peça está sujeita a cada campo, optou-se por conceber um dispositivo que permitisse utilizar o já existente para o referido ensaio de campos magnéticos. Esta opção permite simplificar bastante a realização dos ensaios já que apenas será necessário utilizar um V_i para controlar os dois ensaios. Assim, as bases destes dispositivos foram concebidas de modo a serem de fácil acoplamento, sendo a espessura das duas iguais a 6mm. Para facilitar o ajuste das duas bases, incluiu-se uma pequena régua para fazer de batente.

Neste dispositivo a peça é colocada num apoio de acrílico semelhante ao utilizado no equipamento com dois solenóides. A fixação deste apoio é feita a um espaçador de alumínio colocado sobre o suporte de acrílico do equipamento com dois solenóides, como pode ser observado na Figura 4.27.

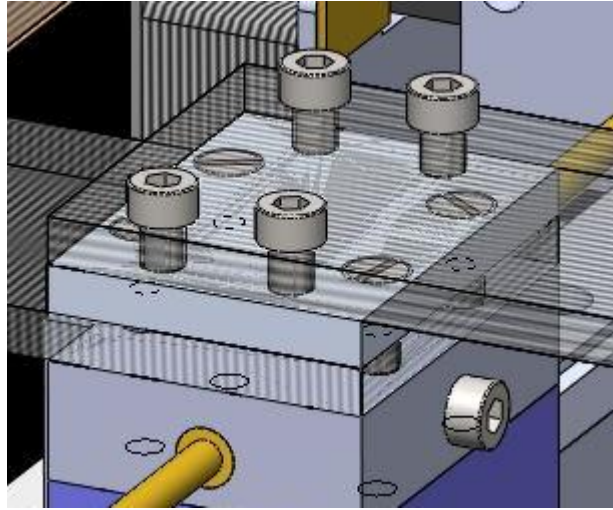


Figura 4.27 - Modelo em *SolidWorks* de fixação dos dois suportes

A sequência de movimento deste dispositivo é semelhante à do dispositivo automatizado para campo magnético horizontal e vertical, como pode ser observado no esquema da Figura 4.28 onde é mostrado o movimento entre os pares de placas.

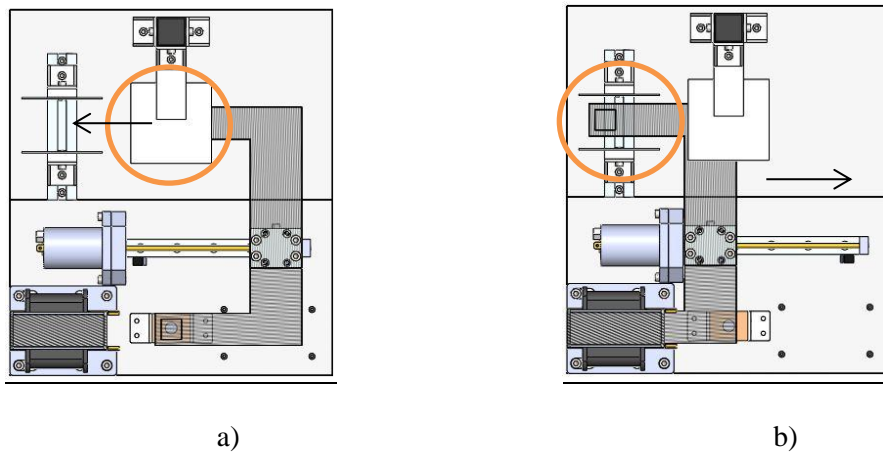


Figura 4.28- Esquema de posicionamento no dispositivo para aplicação de Campo Eléctrico a) Vertical, b) Horizontal

Tabela 4.3- Cotas de Atravancamento de dispositivo dedicado à aplicação de Campo Eléctrico

Direcção	Dimensão [mm]
Comprimento	220
Largura	250
Altura	120

A massa deste dispositivo é aproximadamente 1950g. Estes valores incluem o Equipamento Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical, necessário ao funcionamento deste dispositivo.

Na Figura 4.29 observa-se o Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico com o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.

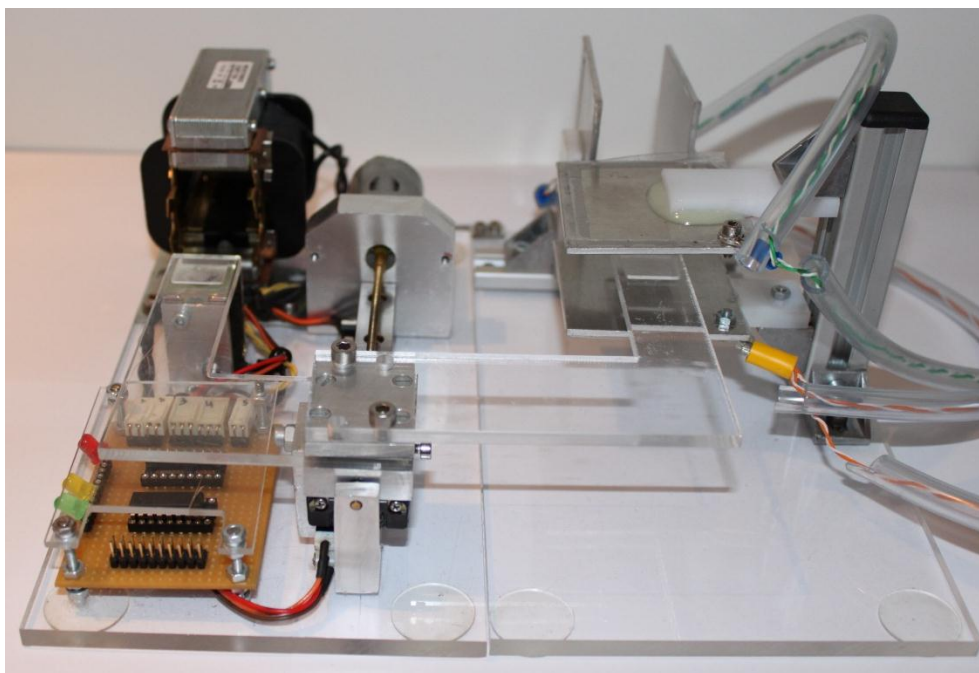


Figura 4.29- Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical

4.3. Equipamento para Eliminação do Excesso de Células Bacterianas

Após a penetração das bactérias nos defeitos, importa eliminar o excesso de células da superfície da peça dado que este interferiria com a análise da superfície.

Foi produzido um método não intrusivo, isto é, um modo de eliminar simplesmente as bactérias na superfície da peça, sem interferir com as que já penetraram nos defeitos. Este método consiste na utilização de uma luz Ultravioleta com comprimento de onda germicida, compreendido entre 200 e 280 nm (UVC), com a referência 8W G5 da *Osram* [23].

Concebeu-se uma máscara de modo a focar o feixe emitindo. Deste modo, conseguindo-se um feixe focado, consegue ter-se a precisão necessária para limpar a superfície

da peça sem interferir com as células depositadas no interior dos defeitos. Na Figura 4.30 pode ver-se o modelo em *SolidWorks* deste dispositivo.

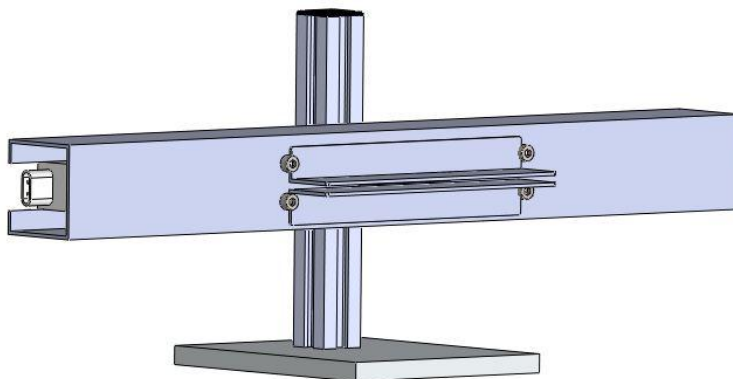


Figura 4.30- Modelo em SolidWorks do Equipamento para aplicação de luz UV

Esta precisão na eliminação do excesso de células bacterianas é também conseguida através da regulação angular da luz relativamente à superfície da peça em análise, como é ilustrado na Figura 4.31.

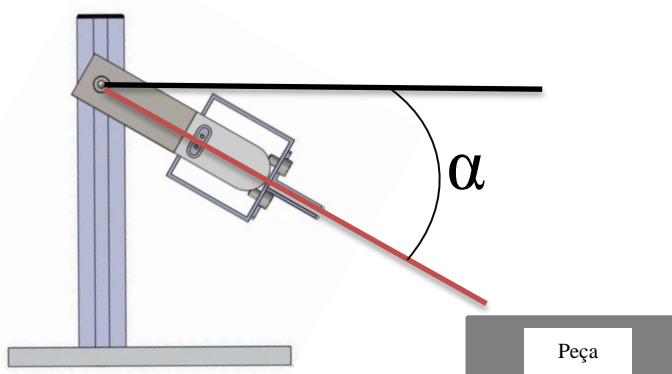


Figura 4.31- Regulação angular da luz UV

Para este dispositivo maquinou-se uma base em alumínio, à qual se fixou uma secção de perfil *Bosch* [20] onde é ligado, por uma ligação aparafusada M4, um suporte que permite variar o ângulo de incidência da luz UV [23].

A máscara concebida com o propósito de focar a luz foi cortada de um perfil de aço de secção quadrada, tendo sido fixas a esta, por ligações aparafusadas M4- permitindo um ajuste

em altura- duas peças com o intuito de restringir e focar o feixe emitido que podem ser observadas na Figura 4.32.

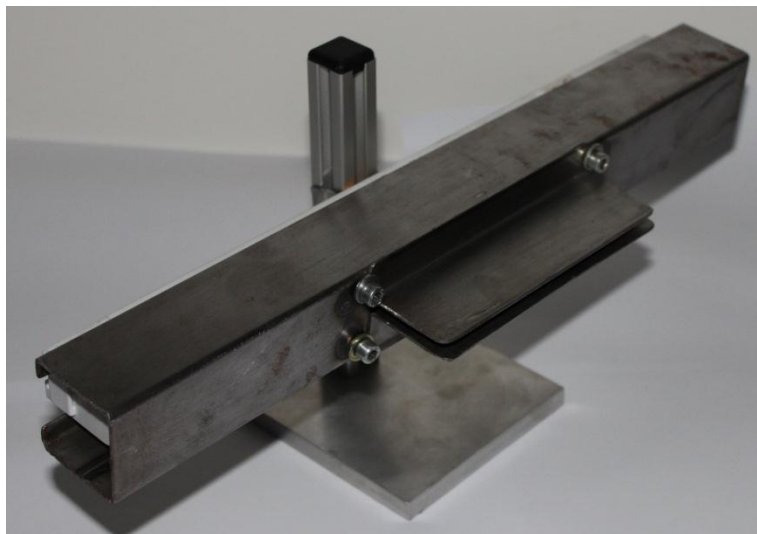


Figura 4.32-Dispositivo de luz UV para eliminação do excesso de células bacterianas[23]

4.4. Adequabilidade dos Dispositivos Produzidos face aos Requisitos Estabelecidos

Neste subcapítulo apresenta-se uma tabela (Tabela 4.4) em que se pretende comprovar que os equipamentos produzidos respondem aos requisitos estabelecidos no capítulo 3 desta dissertação.

Tabela 4.4- Adequabilidade do Equipamento Produzido

Requisitos /Equipamento	1 Fixação	2 Campo paralelo	3 Campo perpendicular	4 Alternância	5 Variar o sentido do campo	6 Controlar a Frequência	7 Tempo de exposição	8 Controlar a Intensidade	9 Repetição ciclos	10 Observação ao microscópio	11 Automatização	12 Portabilidade	13 Modularidade	14 GUI	15 Economia	16 Eliminação
Quatro Solenóides	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
Solenóide	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
Rotação Horizontal de Campo Magnético	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	-
Campo Magnético Horizontal e Vertical	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Rotação Horizontal e Vertical de Campo Magnético	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Campo Eléctrico	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Luz UV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓

5. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO PRODUZIDO

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos relativos à utilização do equipamento apresentado no capítulo 4 em ensaios laboratoriais, bem como os equipamentos comerciais necessários à realização dos ensaios.

São também apresentados os resultados mais relevantes dos ensaios realizados, que comprovam a relevância do equipamento para os resultados desta nova técnica.

5.1. Ensaios realizados com Equipamento dedicado à aplicação de Campos Magnéticos

Nos primeiros ensaios realizados sujeitaram-se as peças a campos magnéticos horizontais, tendo havido a necessidade de ajustar vários parâmetros e compreender melhor a interacção deste tipo de campo com as células bacterianas.

Após esta fase, realizaram-se ensaios com diversos tempos de exposição e direcções de campo, sendo apresentados neste capítulo aqueles cujos resultados melhor ilustram a importância dos dispositivos no sucesso da técnica.

5.1.1. Ensaios Realizados com o Dispositivo com Quatro Solenóides Horizontais para Microscópio

Tendo sido a sua excitação dos Solenóides feita inicialmente directamente por uma fonte de tensão a 12V, tendo-se este método revelado ineficiente, optou-se por os excitar com uma placa *Astrosyn* G210 [18], para excitação de motores passo-a-passo, controlada por um Vi desenvolvido para este tipo de motores, contudo esta variante também não deu os resultados pretendidos.

Finalmente optou-se por utilizar um gerador e um amplificador de sinais *Ling Dynamic Systems* [24], visíveis na Figura 5.1, com o propósito de fazer variar o tipo e a frequência da onda e ampliar este sinal para perceber qual o que promove uma maior mobilidade das células.



Figura 5.1- Gerador e Amplificador de sinais

Com esta opção de excitação do dispositivo conseguiu verificar-se atracção das células pelo campo magnético. Contudo, este equipamento apenas permite variar a direcção do campo gerado alterando as ligações de alimentação dos solenóides, o que inviabiliza a criação da agitação pretendida, alterando-se só a orientação das células.

5.1.2. Ensaios Realizados com Solenóide de Campo Vertical

Nos ensaios realizados com o solenóide de pequenas dimensões produzido, este foi excitado pelo amplificador de sinais *LDS* [24], tendo-se conseguido verificar movimentos das células bacterianas quando o solenóide é aproximado da suspensão bacteriana.

5.1.3. Ensaios Realizados com o Dispositivo com Rotação de Campo Magnético para Microscópio

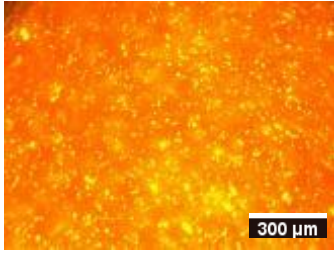
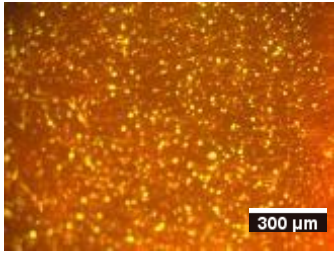
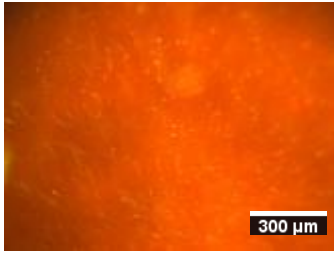
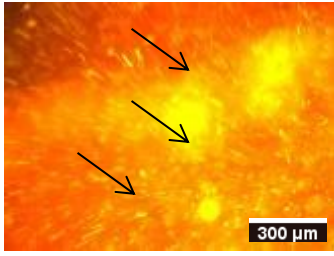
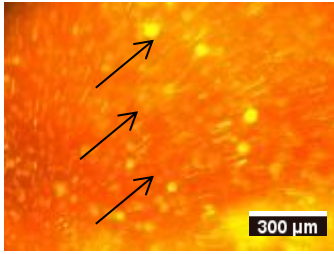
Nos primeiros testes realizados com este dispositivo utilizou-se a bactéria *Staphylococcus aureus*. Foram captadas imagens com ampliação de 150 vezes, durante 10 segundos; com esta captação consegue registar-se o movimento das bactérias, observando-se a trajectória por estas descrita.

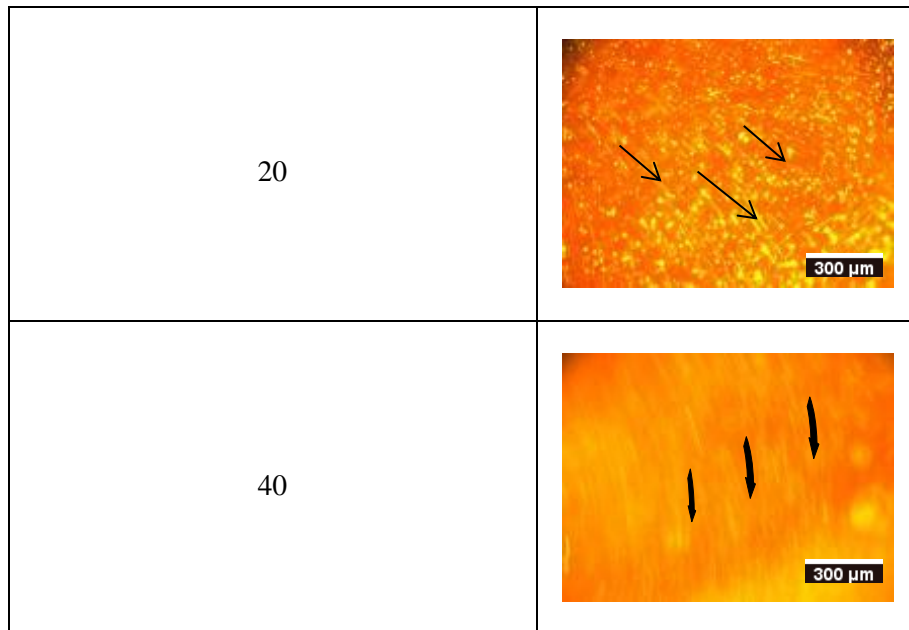
Para melhor se compreender a atracção das células e concluir qual a frequência que melhores resultados dá, foram realizados sucessivos ensaios a diferentes frequências que se apresentam na Tabela 5.1.

Pensou-se que o movimento aumentaria com a frequência de excitação até um determinado limite em que só se causaria vibração das células, contudo os ensaios realizados

com frequências superiores a 40Hz provocaram um aquecimento excessivo das células, secando-as, não sendo possível verificar esta premissa. Pelo que apenas se apresentam os ensaios realizados com frequência de 0 a 40 Hz.

Tabela 5.1- Frequência e trajectória obtida

Frequência [Hz]	Trajectória
0	
0,5	
1	
5	
10	



5.1.4. Ensaio Realizados com o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical

Na realização dos ensaios com melhores resultados neste equipamento utilizou-se a bactéria *Staphylococcus aureus*. Na Figura 5.2 observa-se o *layout* necessário à realização destes ensaios, destacando-se o dispositivo com dois solenóides e o *Vi* criado em *LabView* para o controlar.

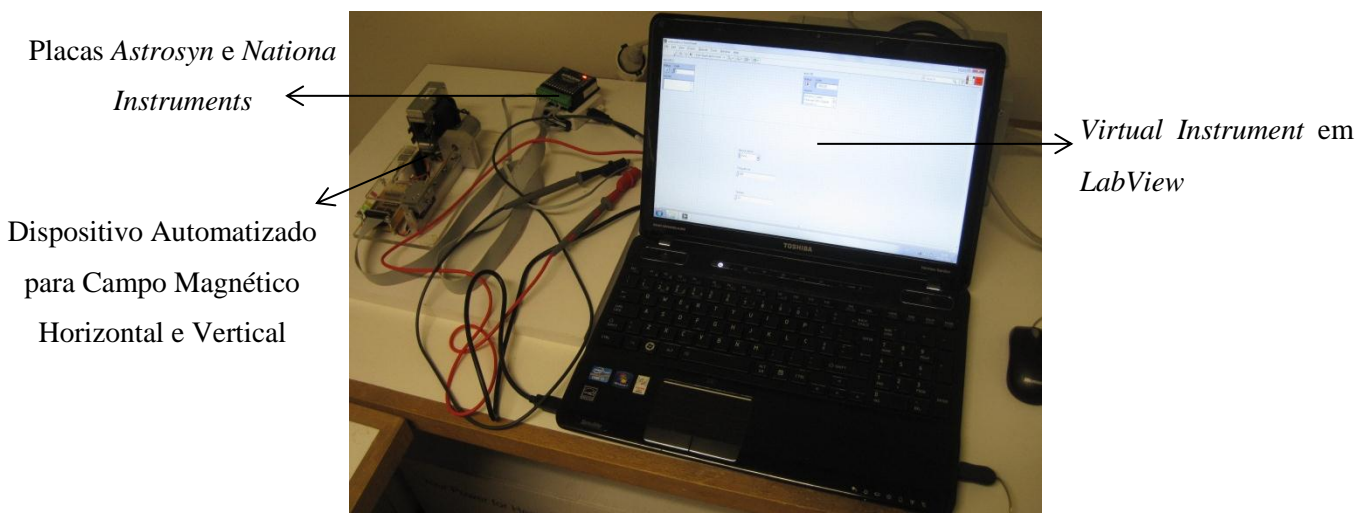


Figura 5.2- *Layout* para Ensaio com o Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical

Para comparação de resultados na detecção de defeitos, com e sem utilização de campos magnéticos horizontais, foram realizados ensaios na mesma peça de alumínio com

defeitos criados por indentação por Diogo Carvalho, com a mesma bactéria. Em ambos os ensaios a limpeza do excesso sobre a superfície foi realizada com lenço para limpeza de lentes e 1 minuto de luz Ultravioleta com um ângulo rasante. Assim, a única variável é a interação do campo já que todos os outros parâmetros são comuns.

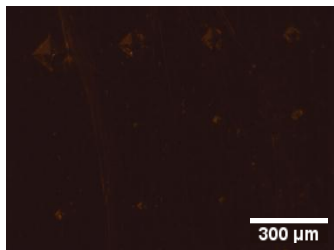


Figura 5.3- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana na peça sem Campo Magnético

Por observação da Figura 5.3, conclui-se que não houve um depósito preferencial das células bacterianas nos defeitos, dado que se observa apenas uma reduzida quantidade de bactérias nos defeitos de maiores dimensões.

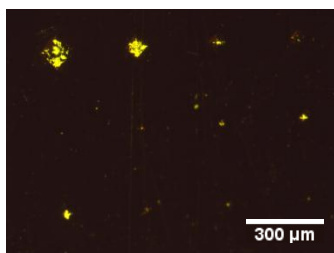


Figura 5.4- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana na peça com Campo Magnético

Observando a Figura 5.4, pode concluir-se que, sujeitando a peça a um campo magnético horizontal durante quatro minutos, alimentando o solenóide com uma frequência de 2 KHz, é possível identificar a totalidade dos defeitos criados por indentação. Isto deve-se ao facto de as bactérias se terem alojado nos defeitos e, após a limpeza do excesso de células bacterianas da superfície com um lenço para limpeza de lentes e um minuto de luz Ultravioleta com um ângulo rasante estas se manterem no interior dos mesmos. As imagens 5.3 e 5.4 foram captadas com uma ampliação de 150 vezes.

Os ensaios realizados com campo magnético na direcção vertical revelaram-se mais eficientes na superfície rugosa criada por eletroerosão, em alumínio por Diogo Carvalho, como pode ser comprovado por comparação nas Figuras 5.5 e 5.6.

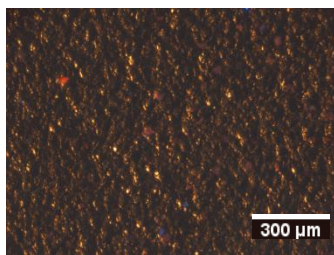


Figura 5.5- Ensaio em superfície eletroerodida com Campo Magnético Horizontal

A Figura 5.5 resulta de um ensaio realizado numa superfície eletroerodida em alumínio, com quatro minutos de deposição e campo magnético horizontal, tendo a eliminação do excesso sido feita com um lenço para limpeza de lentes e um minuto de luz Ultravioleta, não se conseguindo identificar células nas zonas de maior profundidade do perfil de rugosidade.

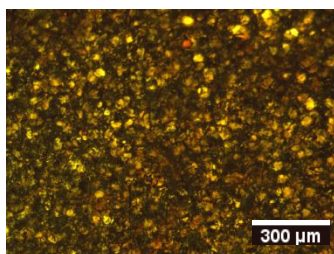


Figura 5.6- Ensaio em superfície electroerodida com Campo Magnético Vertical

Quando comparada com a Figura 5.5, a Figura 5.6 mostra uma penetração de células muito superior nas zonas de maior profundidade, este resultado deve-se a ter-se sujeitado a peça a um Campo Magnético Vertical, mantendo-se todos os outros parâmetros inalterados.

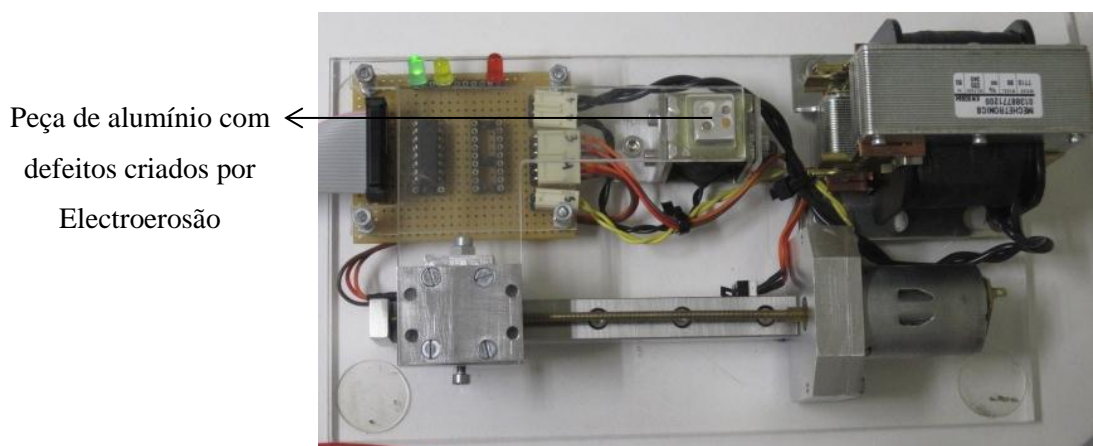


Figura 5.7 – Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical durante ensaio de defeitos de eletroerosão

Na Figura 5.7 vê-se a peça de alumínio com defeitos criados por eletroerosão durante um ensaio com campo magnético vertical.

Constata-se que o campo magnético vertical favorece a penetração das células em profundidade, facilitando a detecção de defeitos mais profundos.

Pode concluir-se que a combinação das duas direcções de campo será a que melhores resultados terá uma vez que se promove a mobilidade da suspensão bacteriana sobre a superfície com o campo horizontal e a penetração em profundidade por acção do campo vertical.

5.1.5. Ensaio Realizados com o Equipamento Automatizado com Rotação de Campo Magnético Horizontal e Vertical

Por análise da Figura 5.8 pode concluir-se que a realização de ensaios neste dispositivo permite identificar os defeitos criados por indentação em alumínio.

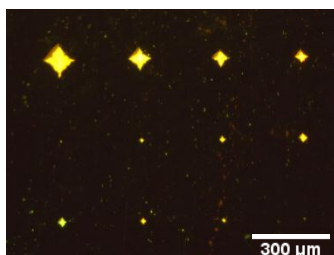


Figura 5.8- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana em alumínio

Esta imagem foi obtida após um ensaio de quatro minutos neste dispositivo, com bactérias *Staphylococcus hominis* com uma ampliação de 100 vezes.

Na figura 5.9 observa-se o resultado de um ensaio realizado com os mesmos parâmetros em aço.

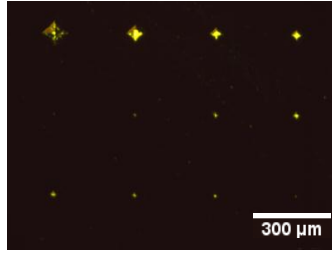


Figura 5.9- Imagem obtida em microscópio da suspensão bacteriana em aço

Analisando as Figura 5.8 e 5.9 conclui-se que os ensaios realizados neste equipamento permitem identificar todas as dimensões dos defeitos criados. Contudo, apenas foi possível criar campo magnético na direcção vertical devido à reduzida dimensão do estator existente para gerar campo na direcção horizontal, que dificulta a entrada do suporte oscilante neste.

5.2. Ensaios Realizados com Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico

Após os testes realizados com Campos Magnéticos, testaram-se os efeitos dos Campos Eléctricos nas células bacterianas.

A alimentação eléctrica das placas foi feita por uma fonte variável de alta tensão- uma vez que se pretende uma tensão na ordem dos 8 KV para estabelecer o campo eléctrico entre as placas- pelo que as ligações foram feitas em cabo eléctrico isolado com mangueira de borracha.

Por motivos de segurança, o movimento da peça não deve ser feito manualmente no decorrer dos ensaios, devido à tensão existente entre as placas. Contudo, é possível mover a peça manualmente entre ensaios, já que a fixação da base móvel é feita no mesmo apoio que a do Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical.

Na Figura 5.10 observa-se a disposição do equipamento necessário à realização destes ensaios.

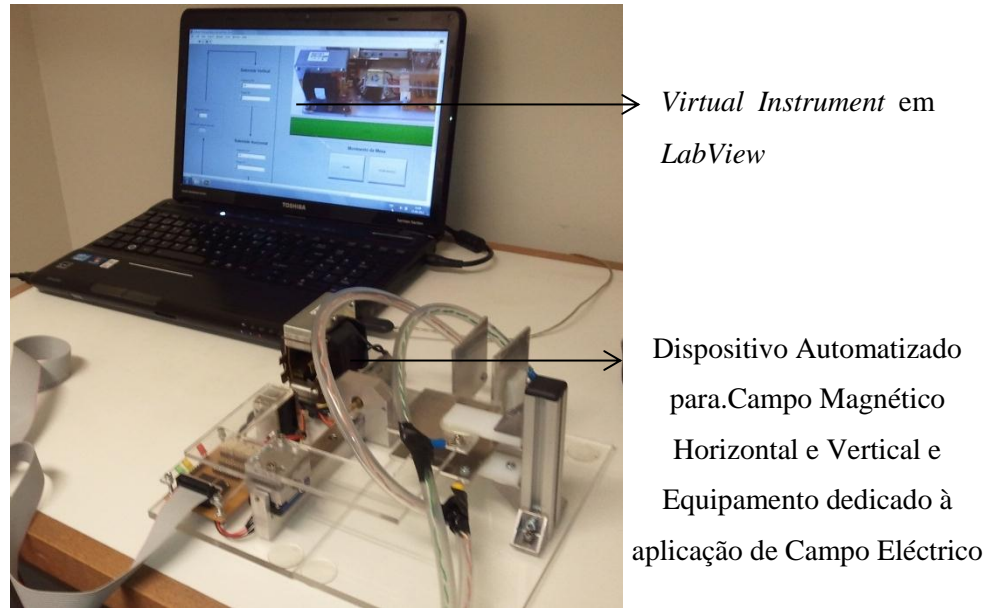
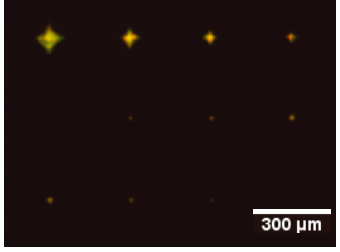
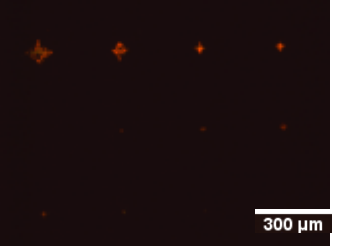
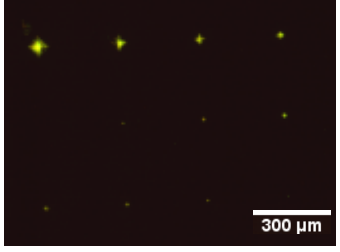
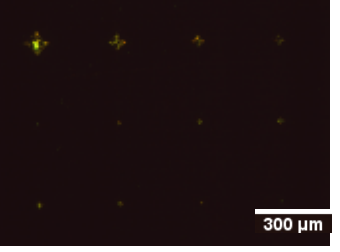
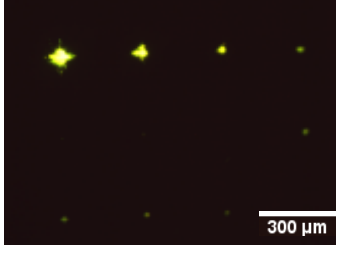
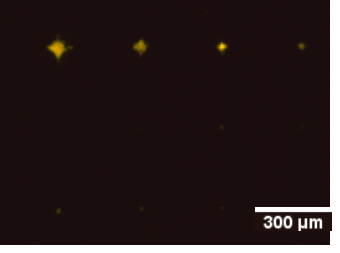


Figura 5.10- *Layout* para Ensaios com Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico

Apresentam-se na Tabela 5.2 resultados desta variante da técnica em diferentes materiais e com bactérias *Rhodococcus Erythropolis* de carga positiva e negativa, comprovando-se que o recurso a campos eléctricos beneficia a penetração das bactérias nos defeitos, tendo sido estes resultados provenientes da combinação de campo eléctrico horizontal e vertical.

Em todos os ensaios realizados o excesso de suspensão bacteriana foi removido da superfície da peça com um lenço para limpeza de lentes e um minuto de luz Ultravioleta.

Tabela 5.2- Resultados dos ensaios realizados com Campo Eléctrico

Material	Células com carga Positiva	Células com carga Negativa
Alumínio		
Aço Inox 304 L		
Cobre		

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

6.1. Conclusões

Nesta dissertação foram desenvolvidos equipamentos para um novo END que, recorrendo a Células Bacterianas, permitem detectar defeitos superficiais de dimensões bastante reduzidas.

Foram realizados ensaios com campos magnéticos em diferentes direcções, concluindo-se que uma orientação horizontal destes facilita a mobilidade das células bacterianas sobre a superfície, contribuindo a direcção vertical do campo para uma melhor penetração em profundidade nos defeitos. Verificou-se que a mobilidade e penetração das células são beneficiadas por variações de direcção e intensidade de campo. Assim, o equipamento desenvolvido permite fazer esta alternância de modo sistemático, controlando-se a frequência e os tempos de excitação.

O comportamento verificado nas células quando sujeitas a campos eléctricos é semelhante ao observado na aplicação de campos magnéticos, concluindo-se também que uma direcção paralela do campo relativamente à superfície fomenta a mobilidade das células e uma orientação perpendicular do campo permite a penetração das bactérias no interior dos defeitos.

O material em que se detectaram defeitos de menores dimensões foi o aço inoxidável 304L, em que se detectaram defeitos de 9,6 μm tanto no Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e Vertical, como com o Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico.

O Equipamento dedicado à aplicação de Campo Eléctrico foi o que permitiu obter melhores resultados em cobre tendo sido detectados defeitos de 12,7 μm .

Com o intuito de comprovar a utilidade dos dispositivos concebidos, foram realizados ensaios sem a aplicação de qualquer campo, tendo os resultados destes ensaios sido bastante piores, não se conseguindo assegurar a deposição de células sobre toda a superfície em análise, nem a sua penetração nos defeitos.

Pelos resultados obtidos com os equipamentos produzidos, conclui-se que os requisitos previamente estabelecidos foram cumpridos.

A eliminação do excesso de bactérias da superfície, após a adesão destas aos defeitos é feita com uma luz Ultravioleta de comprimento de onda germicida, compreendido entre 200 e 280 nm (UVC) [23], tendo sido desenvolvido um suporte para ajustar a sua altura e regular o ângulo de incidência do feixe na superfície da peça. Com a realização dos ensaios, conclui-se que a eliminação do excesso de células bacterianas mais eficiente, sem interferir com as células depositadas nos defeitos, deve ser feita com ângulo rasante.

6.2. Propostas de Desenvolvimento Futuro

Após a realização deste trabalho, torna-se necessário sugerir melhoramentos aos dispositivos produzidos, bem como sugerir outros que os complementem.

Propõe-se como desenvolvimento futuro desta dissertação, a concepção de um dispositivo para aplicação de campos eléctricos em microscópio que permita a variação da direcção da aplicação destes.

Sugere-se também a substituição do estator de motor passo a passo colocado na base Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no Plano Horizontal e Vertical por um de maior diâmetro interno para uma mais fácil realização dos ensaios.

Para a etapa final, de limpeza e esterilização da peça pode ser desenvolvido um modo de limpeza intrusivo por jacto de água. Seria benéfico ter a possibilidade de regulação do ângulo de incidência do jacto na peça, bem como ser possível a regulação da pressão da água de modo a adequar este dispositivo ao tipo de defeitos e de limpeza pretendida.

Quando todos os equipamentos estiverem concluídos, poderá ser criado um kit que os integre, aproveitando a modularidade existente entre eles. Neste kit terá de ser integrado um computador para assegurar o controlo automatizado dos dispositivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

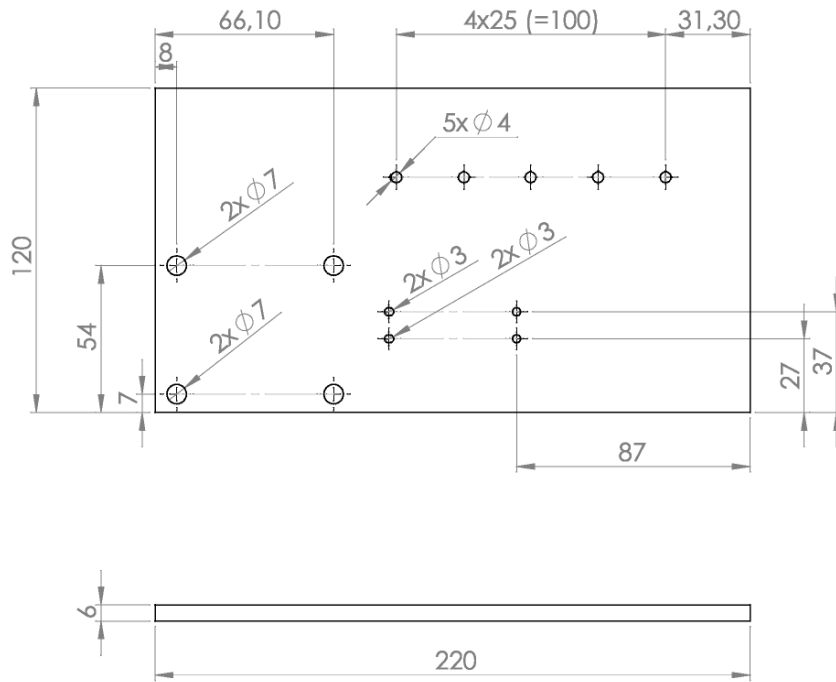
- [1] João P. S. Borges, "Desenvolvimento de Técnicas Baseadas em Filmes de Células Bacterianas para Aplicação em Ensaios Não Destrutivos de Materiais de Engenharia", Faculdade de Ciências e Tecnologia-UNL, Almada, Portugal, 2011.
- [2] David Halliday e Robert Resnick, "Fundamentos de Física 3 – Electromagnetismo" LTC Editora.
- [3] Telmo G. Santos, "Aula P4, Líquidos Penetrantes (LP)", Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2011.
- [4] Charles Heiller, "Handbook Of Nondestructive Evaluation".
- [5] Ravi Prakash, "Non-Destructive Testing Techniques", New Age Science.
- [6] R. K. Bordoli et al "A Simplified Optoelectronic Technique for Detection and Size Measurement of Micro-holes in Thin Films Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications", vol. 5, , pp. 729-731, 2007.
- [7] Marco Castellani., F. Beyeler, "A new non-contact automatic inspection method for micro-structures", Modelling Group, Department of Biology, University of Bergen.
- [8] L. Liu L, B. Y Tay, S. B Tor, Y Murakoshi, R. Maeda., "Effects of thermal debinding on surface roughness in micro powder injection molding," vol. 61, ed. *Materials Letters*, pp. 809-812, 2007.
- [9] K. Sahik, N. Mahendran., V. K Sethi., "Failure analysis of a T-joint of AISI type 316 L stainless steel", vol. 10, ed. *Engineering Failure Analysis*, pp. 113-118, 2003.
- [10] Sanjay Rawat, Helmi Atta, "Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites, *Wear*", vol. 267, pp. 1022-1030, 2009.
- [11] W. J. Zhang., F. Ye, H. Sun, "Automatic Optical Defect Inspection and Dimension Measurement of Drill Bit", *International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, Junho 25-28, 2006.
- [12] Soo H. Lee, Xiaoping Li, "Study of the surface integrity of the machined work-piece in the EDM of Tungsten Carbide", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, pp. 315–321, 2003.
- [13] William R. Herguth, Guy Nadeau, "Applications of Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS) to Practical Tribology Problems", *Herguth Laboratories, Inc.*
- [14] Diogo Carvalho, "Desenvolvimento e Aplicação de Técnicas Inovadoras de Ensaios Não Destrutivos (END) com Células Bacterianas ", Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal, 2012.
- [15] RS Components, disponível em: <http://pt.rs-online.com/web/home.html>
- [16] *Electromagnetismo* vol. V-Campo magnético na presença da matéria, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1975-1976.
- [17] Manuel de M. Silva, "Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos", 4ª ed., 2009.
- [18] Astrosyn, disponível em: <http://www.astrosyn.com/section.php?xSec=56&xPage=1>
- [19] National Instruments, disponível em: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201986>
- [20] Bosch Rexroth, disponível em: https://www.boschrexroth.com/irj/portal/anonymous/eShop?guest_user=anonymousDE&display=catalog&bridgeSelectedCatalog=MTN&bridgePageId=nut10raster40
- [21] C. Moura Branco, J. Martins Ferreira, J. Domingos da Costa, A. Silva Ribeiro, "Projecto de Órgãos de Máquinas", 2ª ed., 2008.
- [22] SKF, disponível em: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=000392&lang=en>
- [23] Osram, disponível em: http://www.osram.com/osram_com/products/lamps/specialty-lamps/ultraviolet-lamps/puritec-hns/index.jsp?productId=ZMP_86446

[24] Ling Dynamic Systems, disponível em: <http://www.lds-group.com/>

ANEXOS

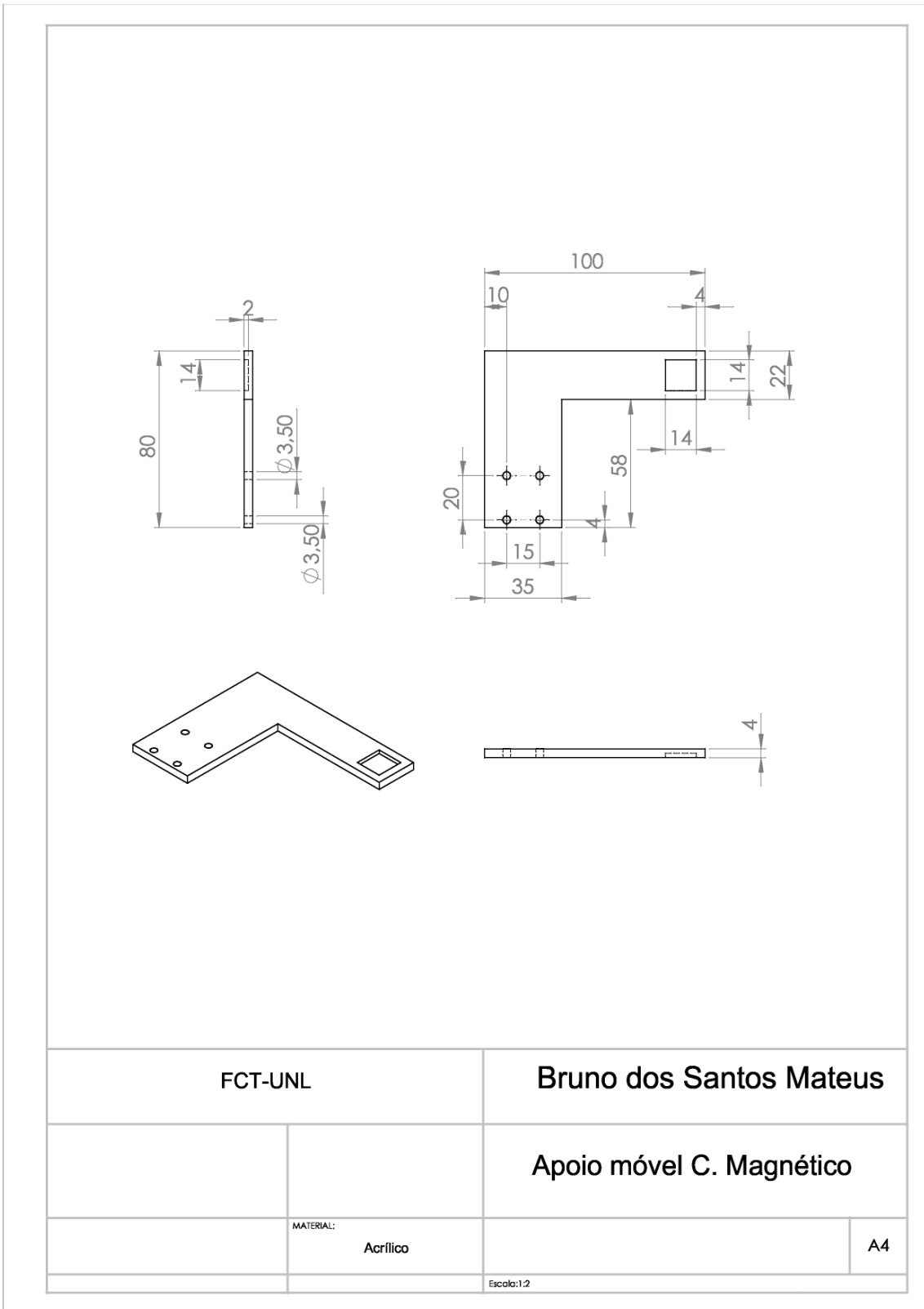
**Anexo 1- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes
de Dispositivo Automatizado para Campos Magnéticos
Horizontal e Vertical**

a)

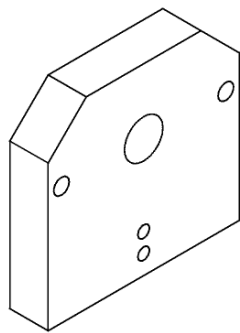
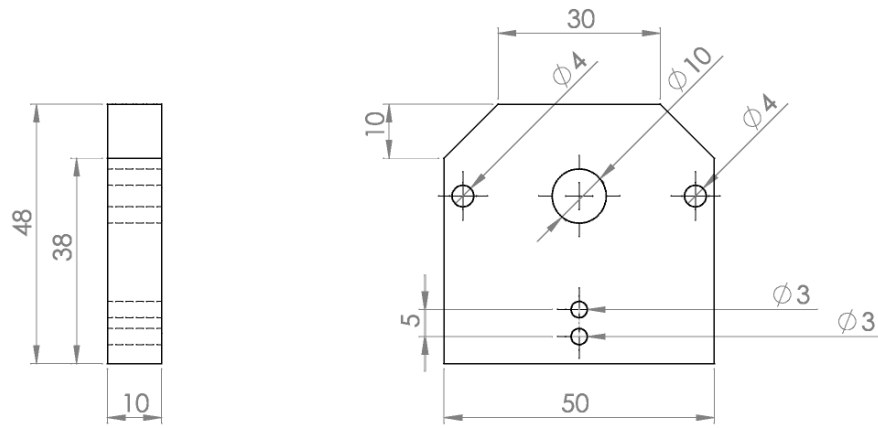


FCT-UNL		Bruno dos Santos Mateus	
		Base Campo Magnético	
	MATERIAL: Acrílico		A4
		Escala:1:5	

b)

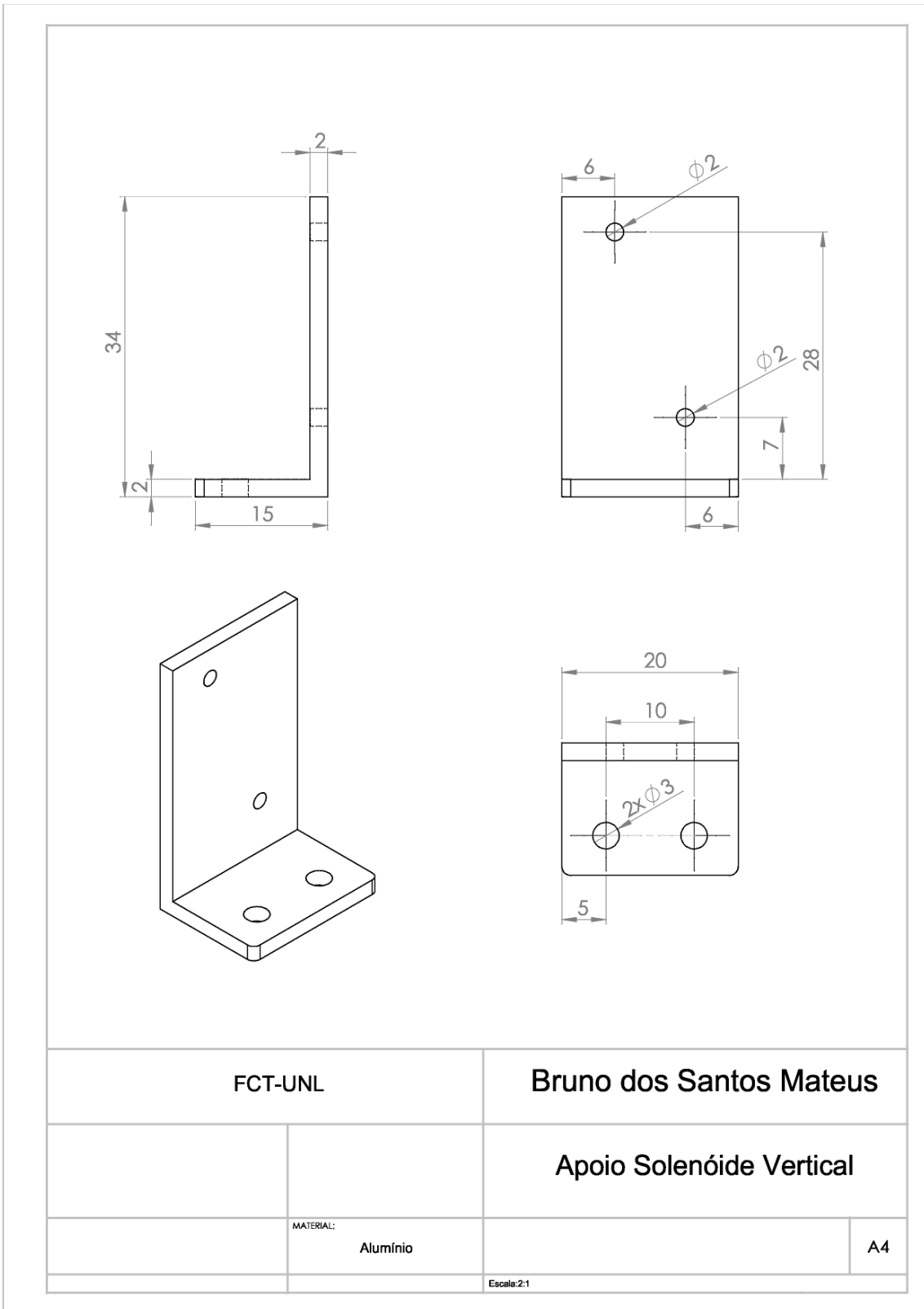


c)

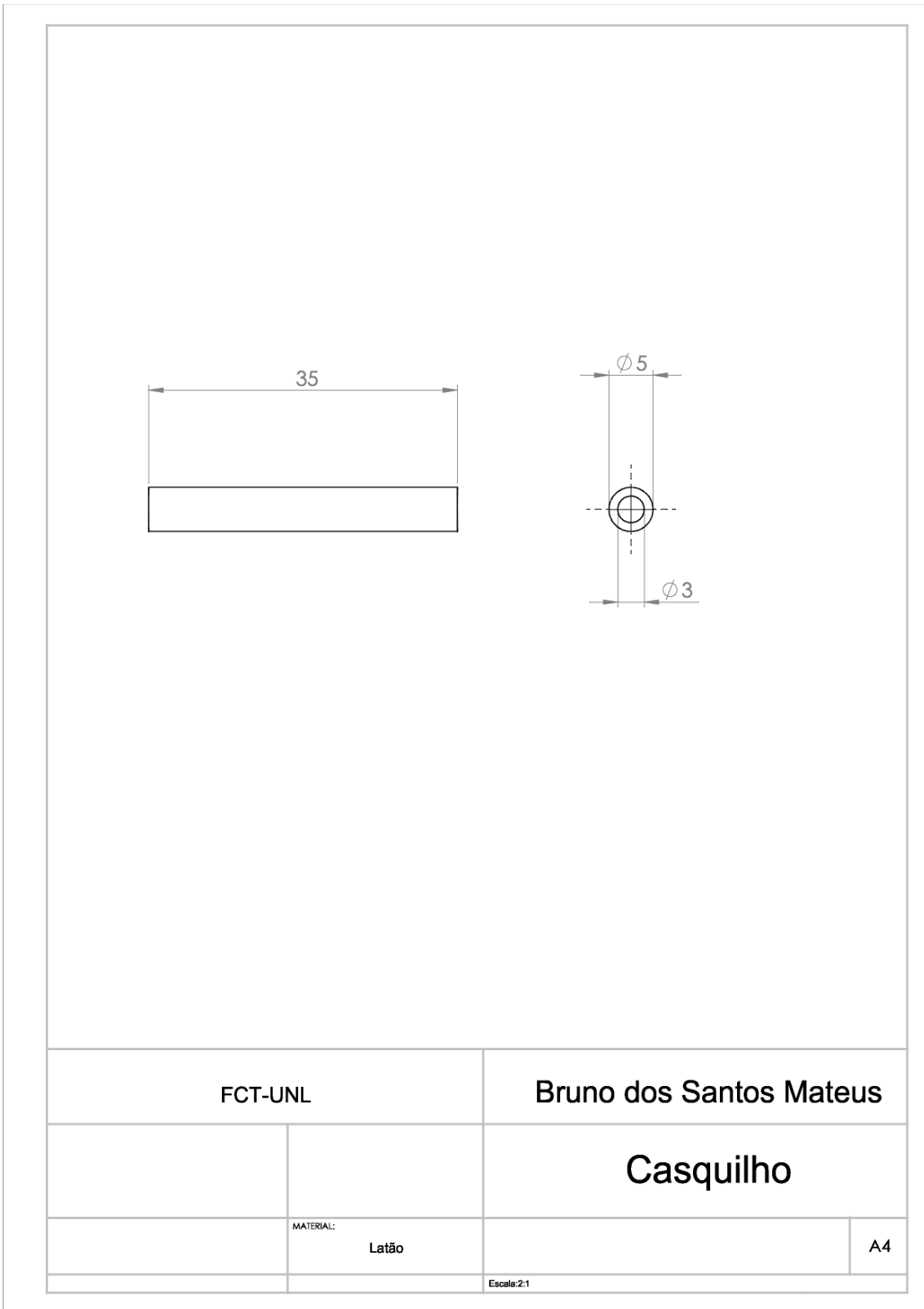


FCT-UNL		Bruno dos Santos Mateus	
		Apoio motor passo a passo	
MATERIAL:			
Alumínio		A4	
Escala: 1:1			

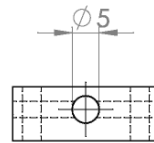
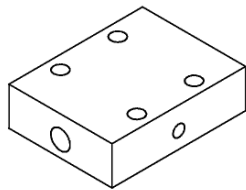
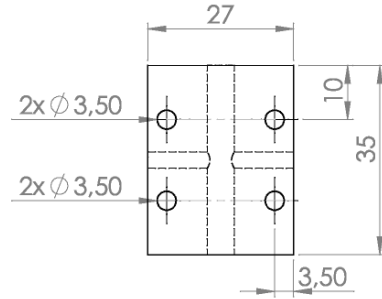
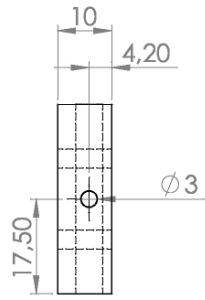
d)



e)

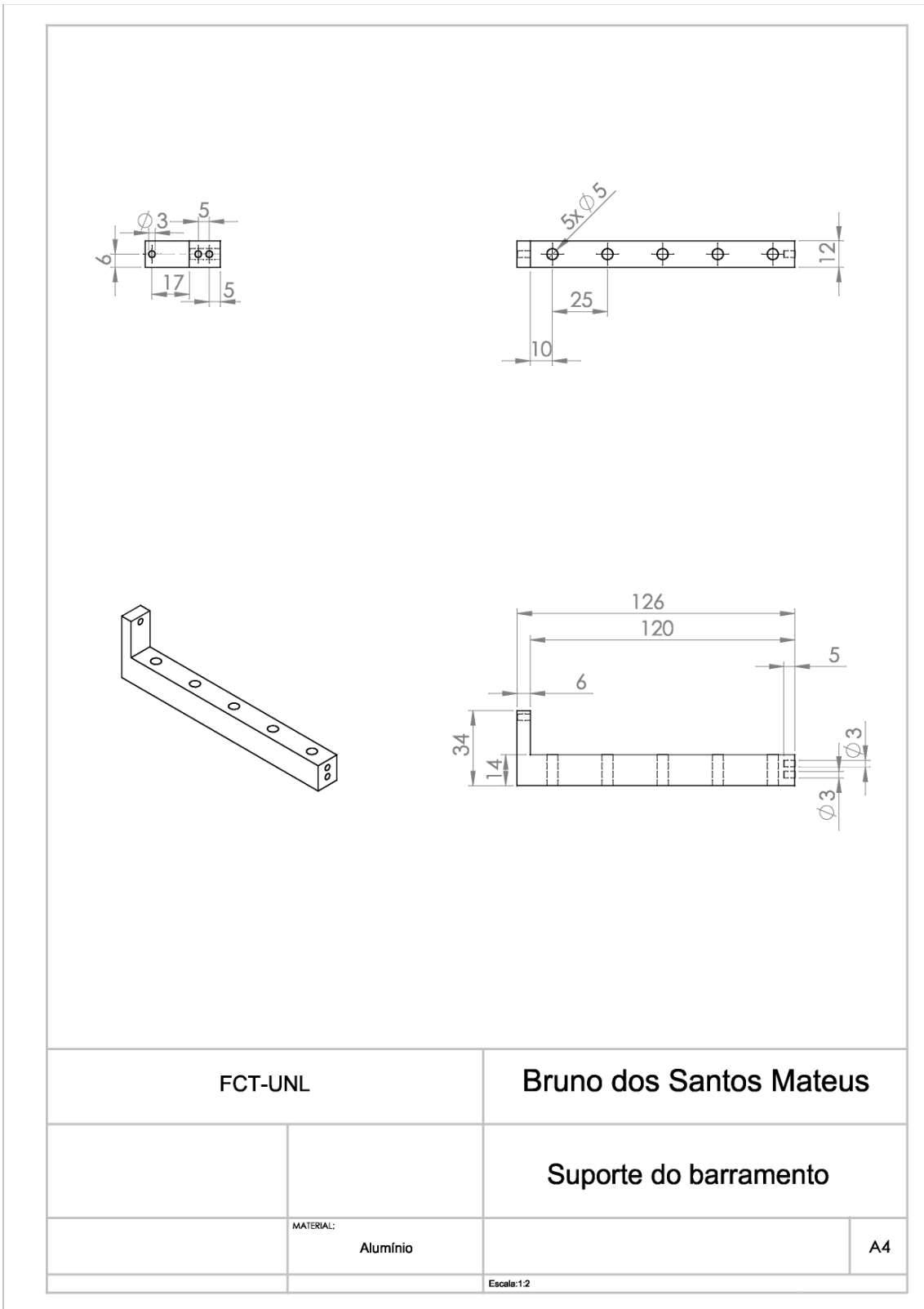


f)



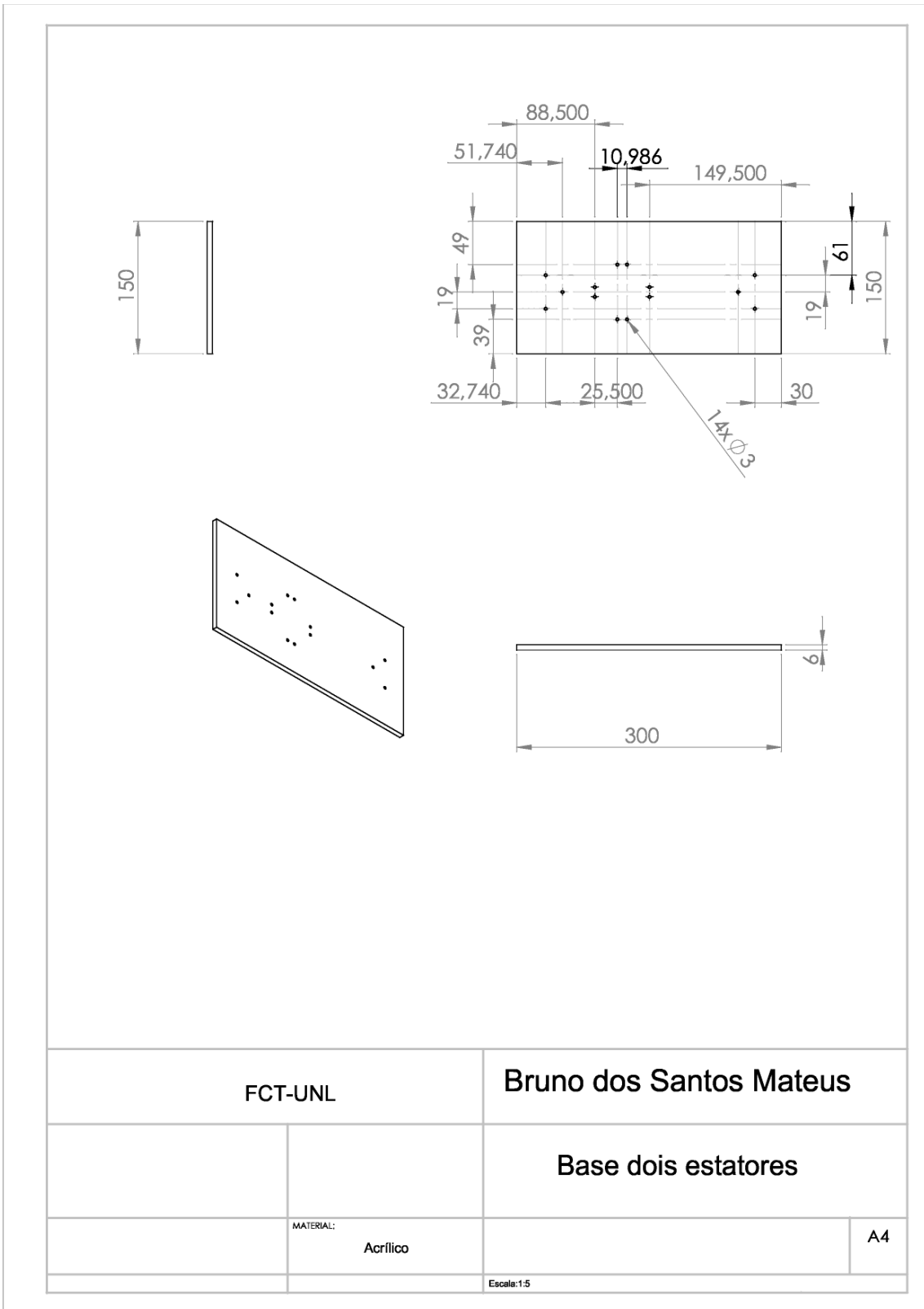
FCT-UNL		Bruno dos Santos Mateus	
		Espaçador de Suporte	
	MATERIAL: Alumínio		A4
Escala:1:1			

g)

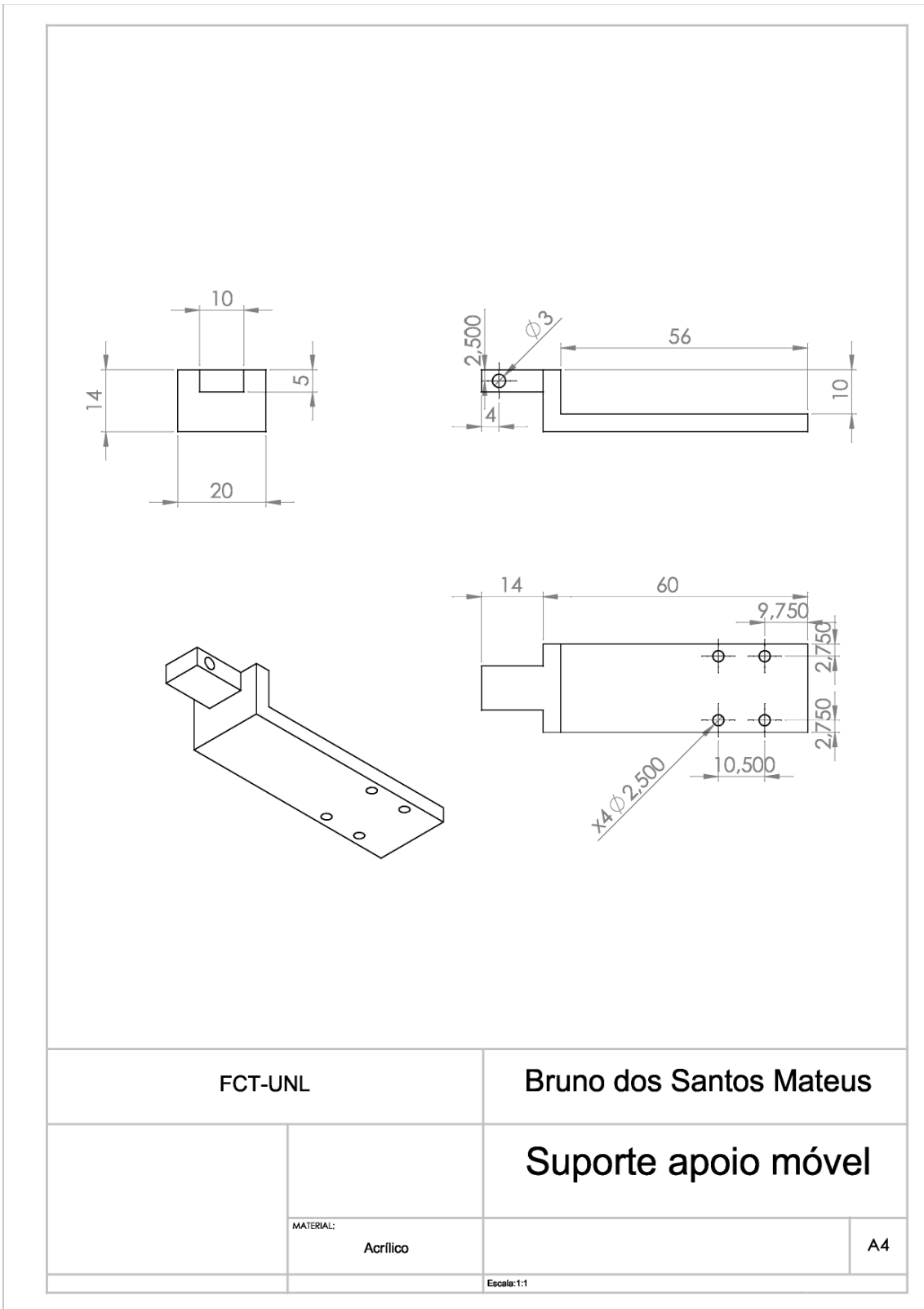


Anexo 2- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético no plano Horizontal e Vertical

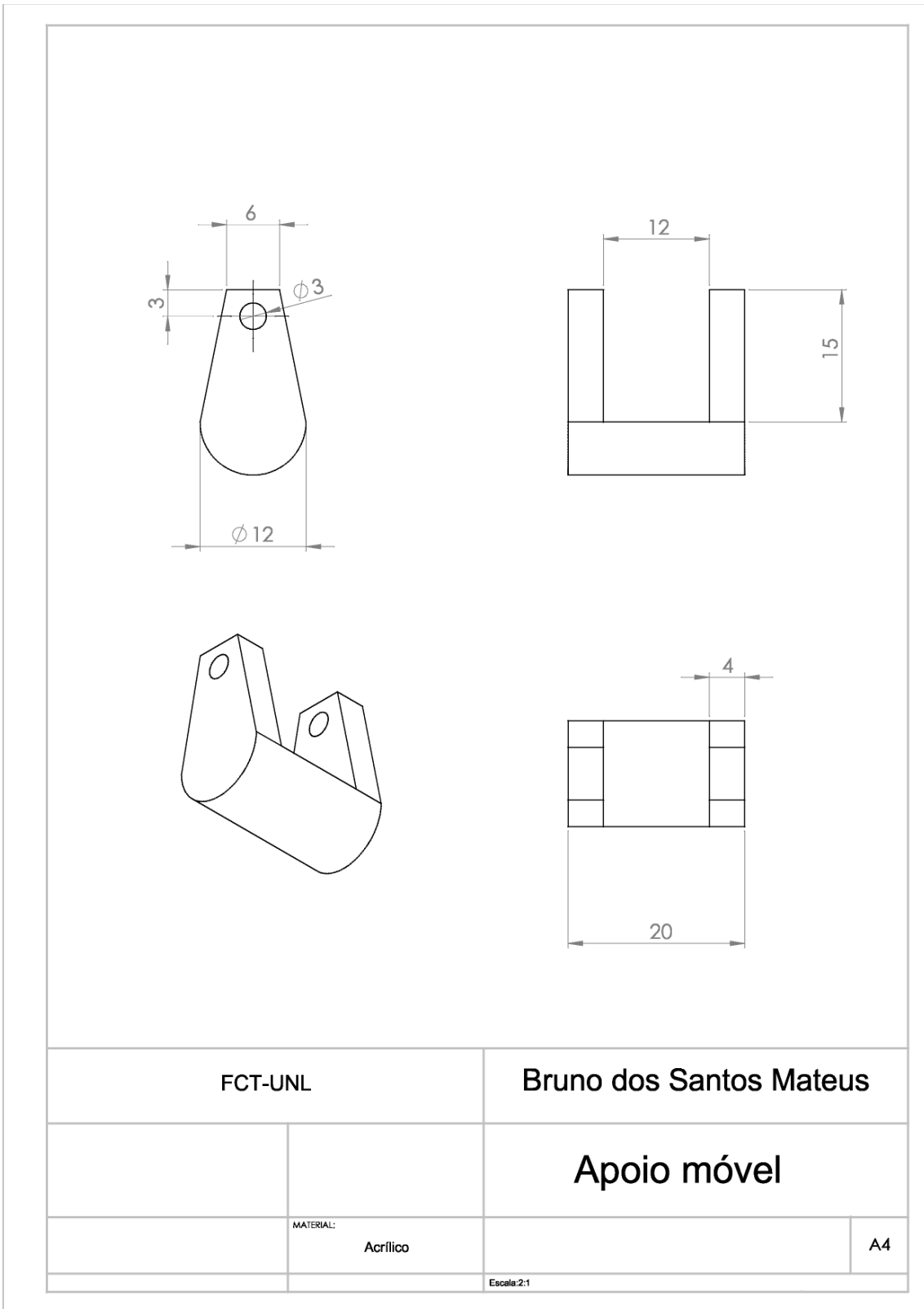
a)



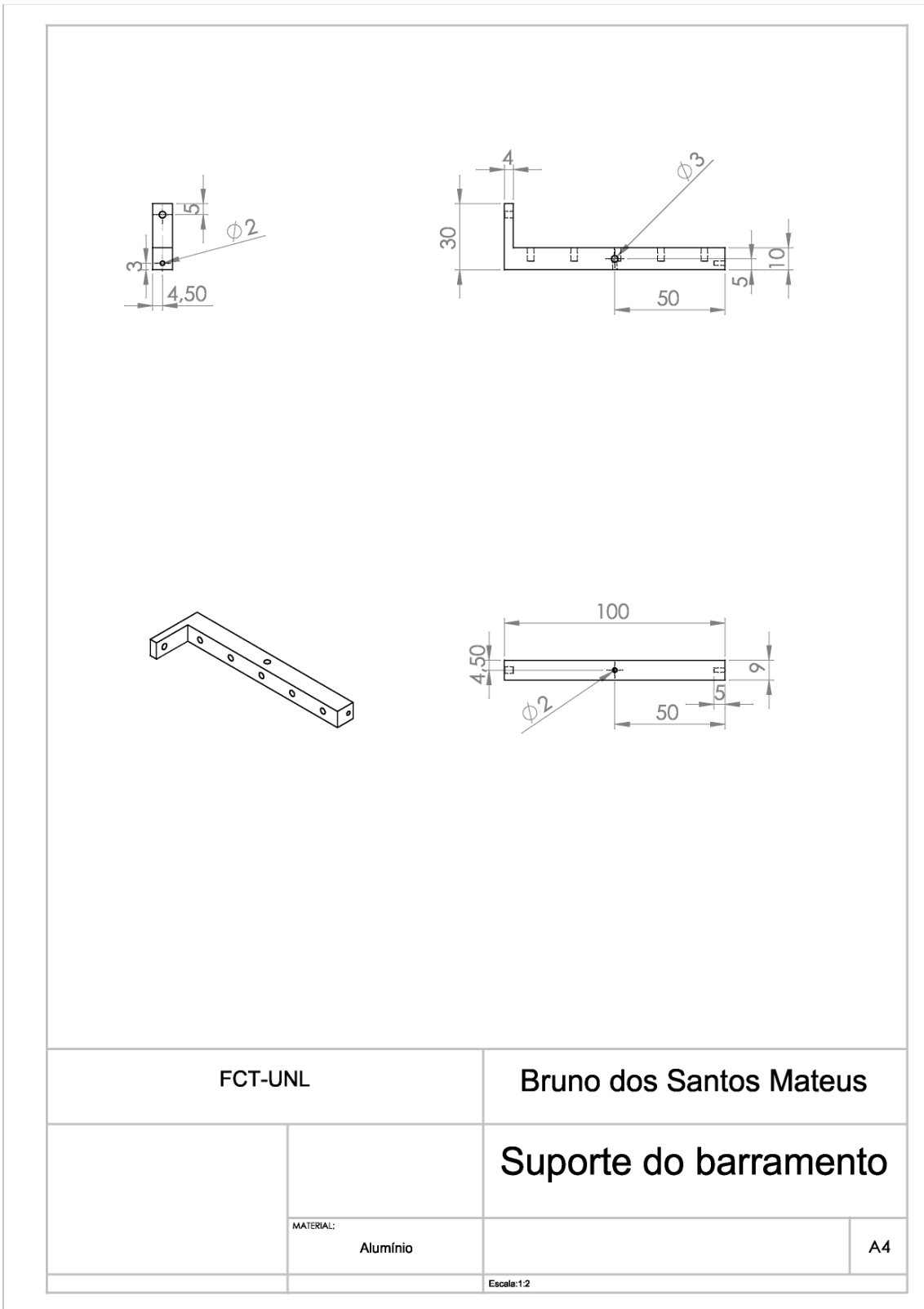
b)



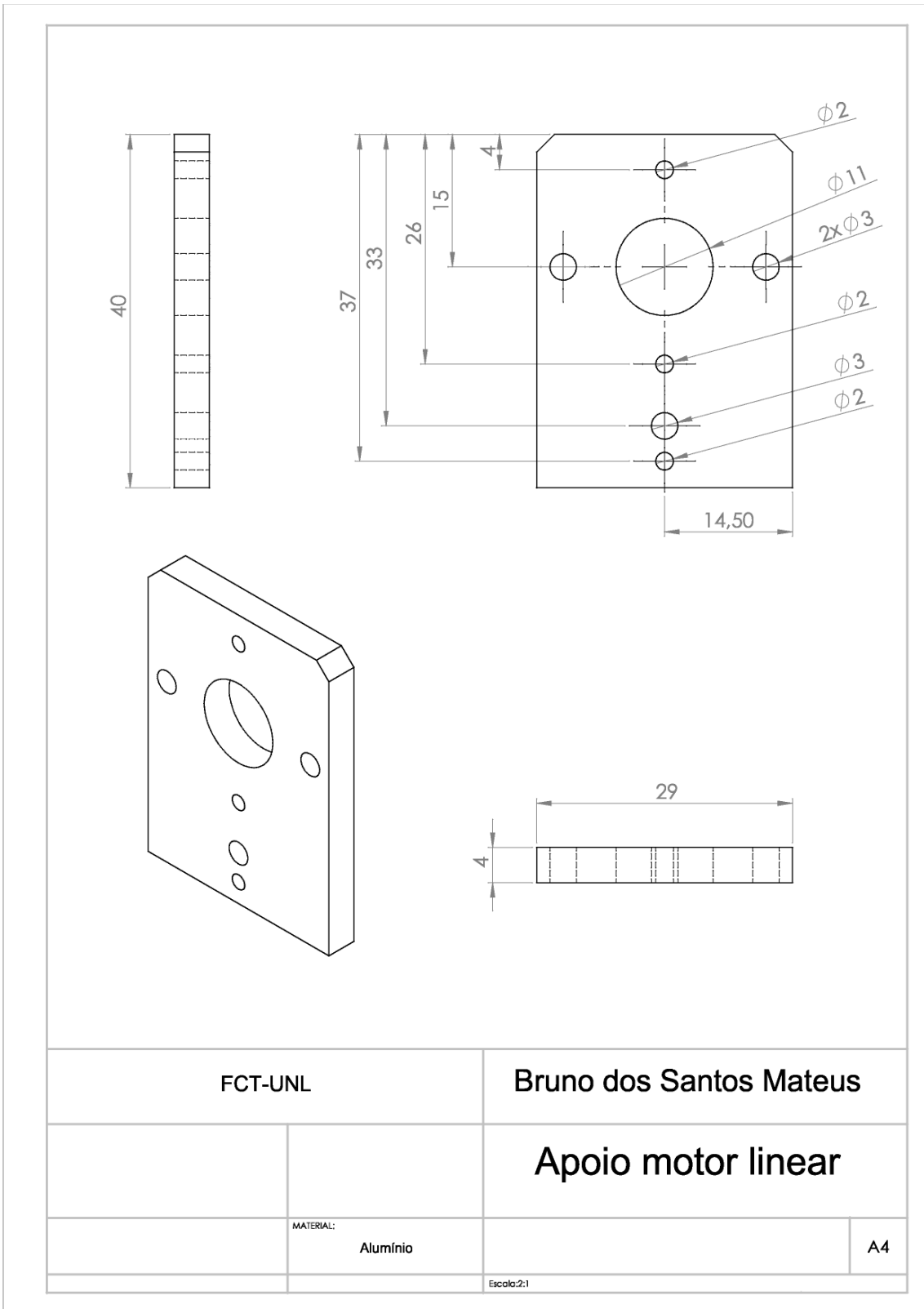
c)



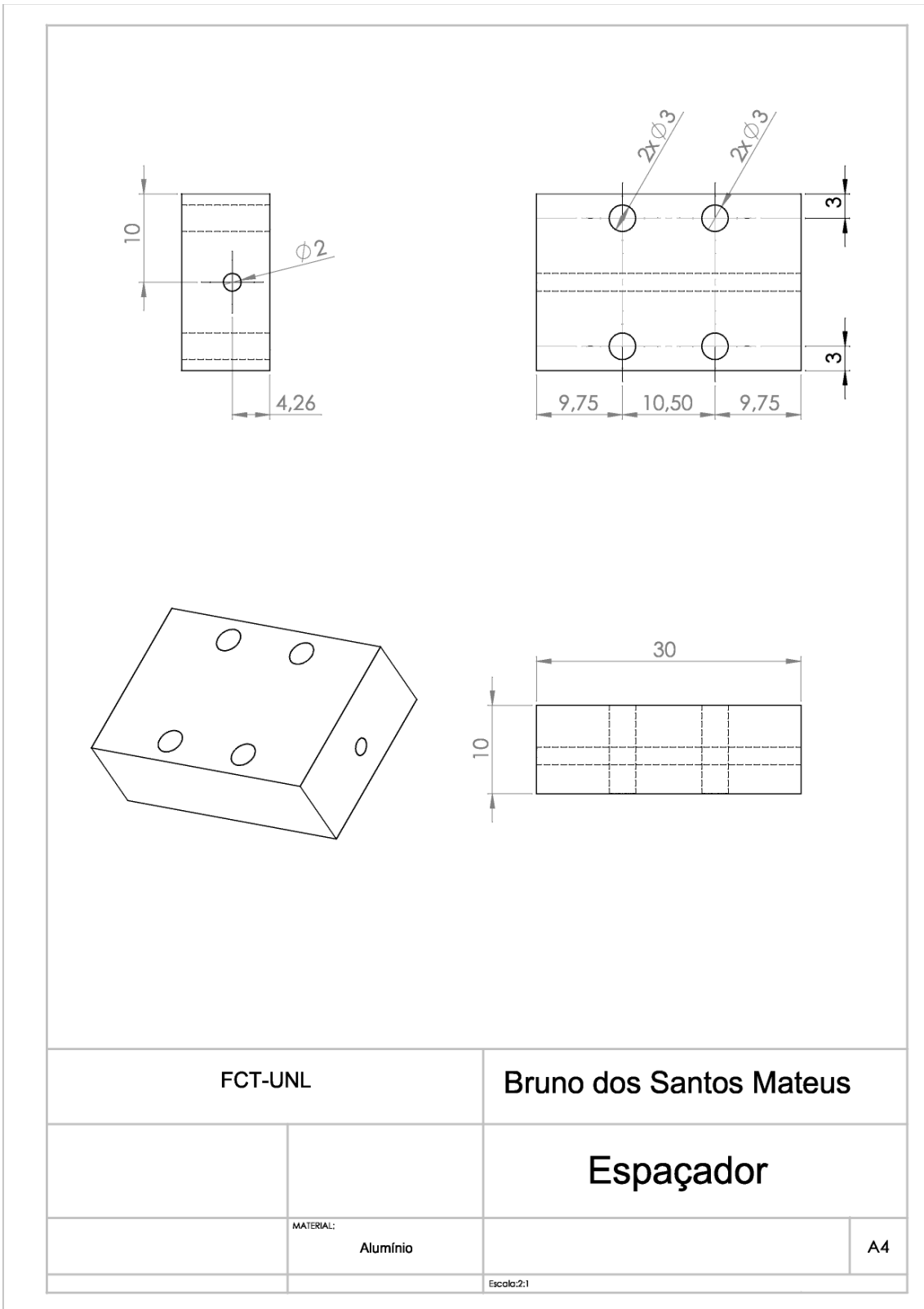
d)



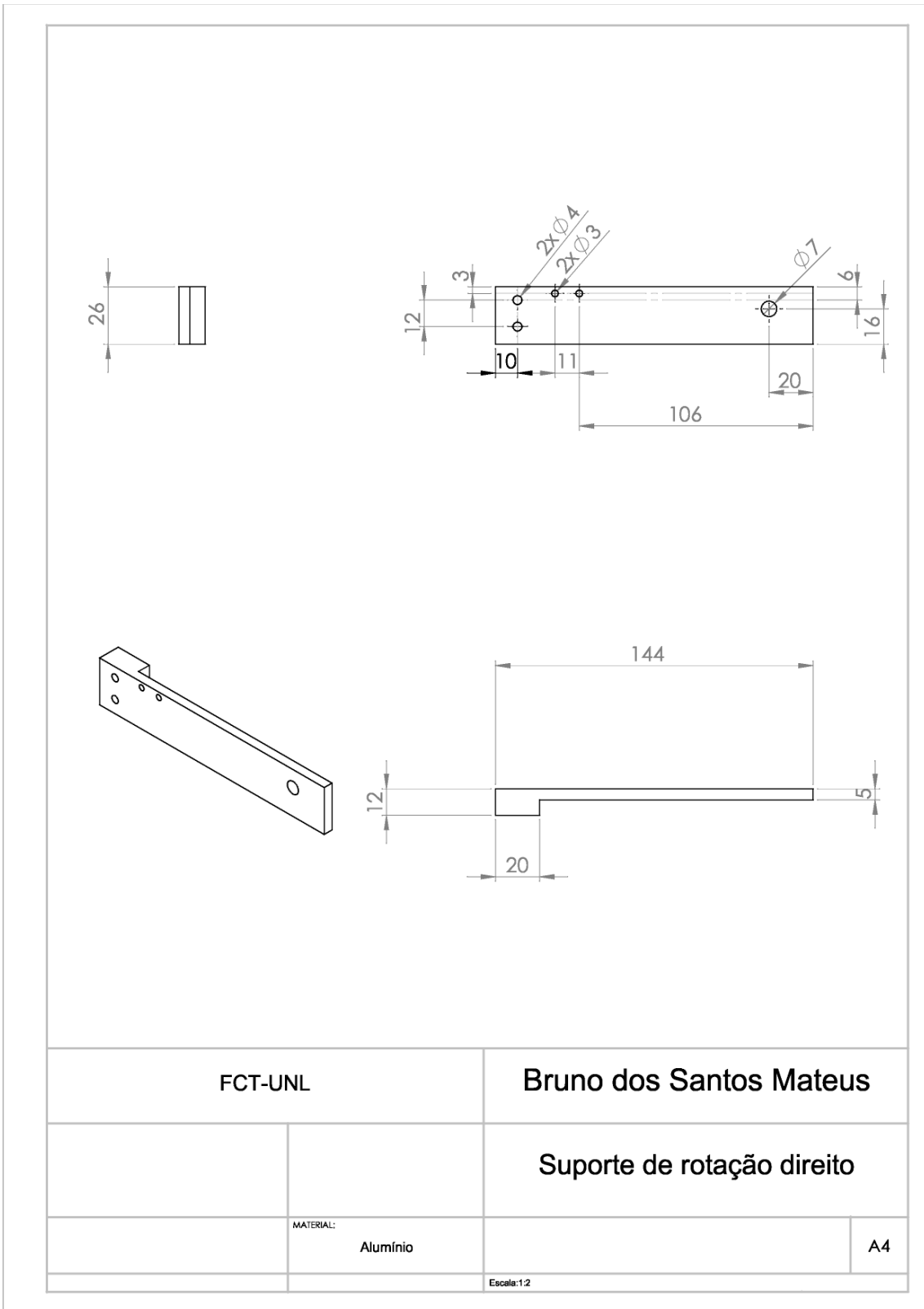
e)



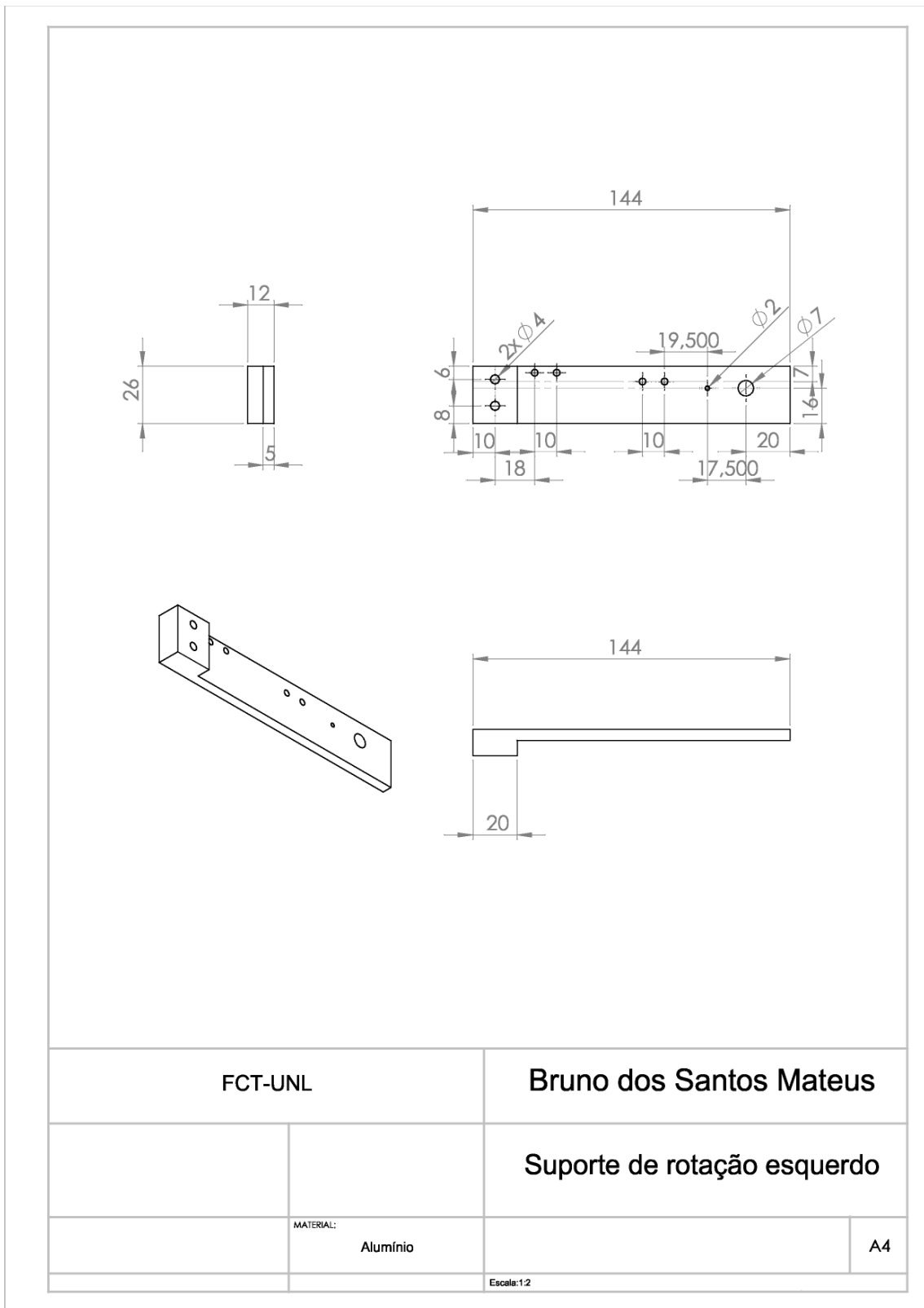
f)



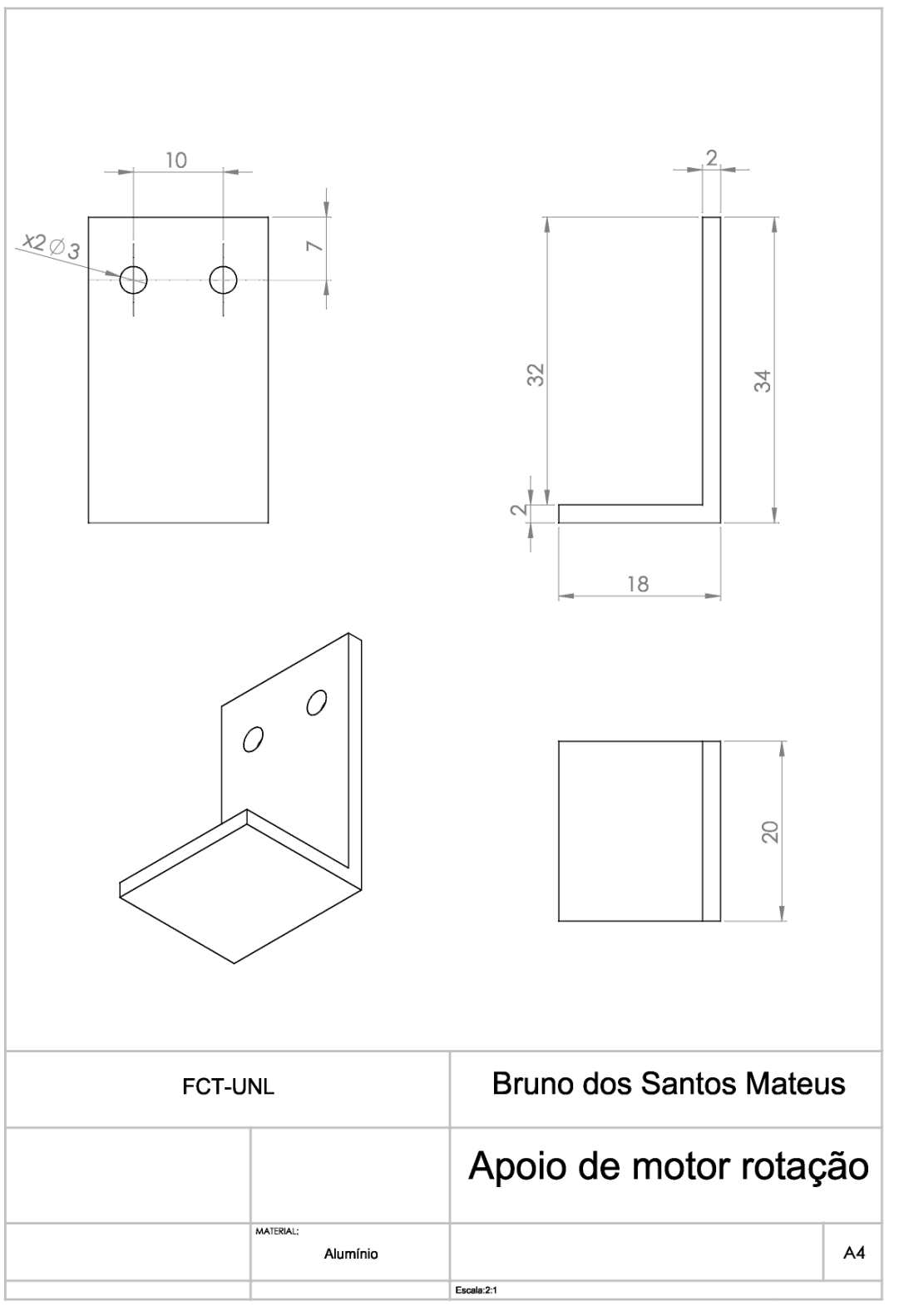
g)



h)

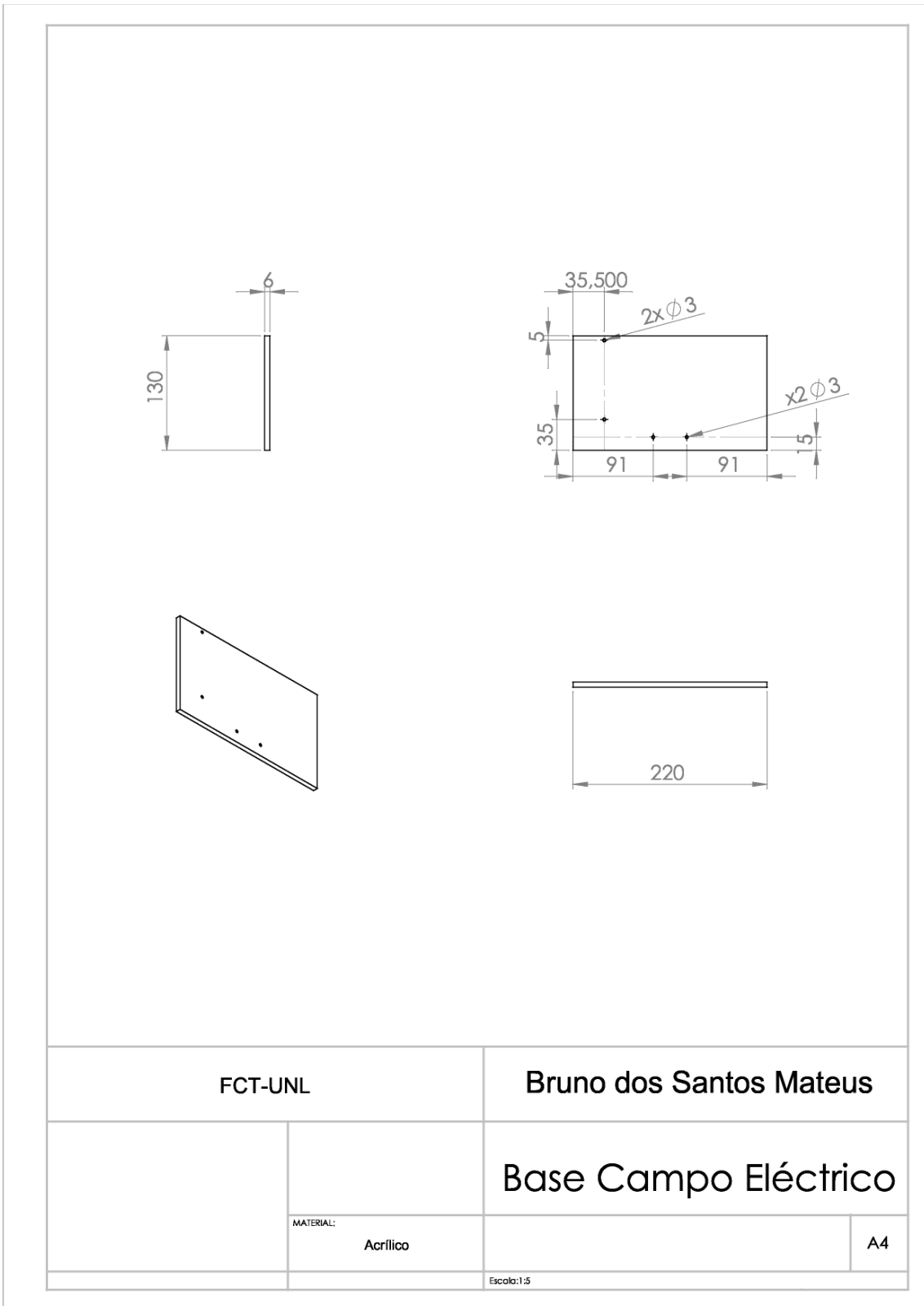


i)

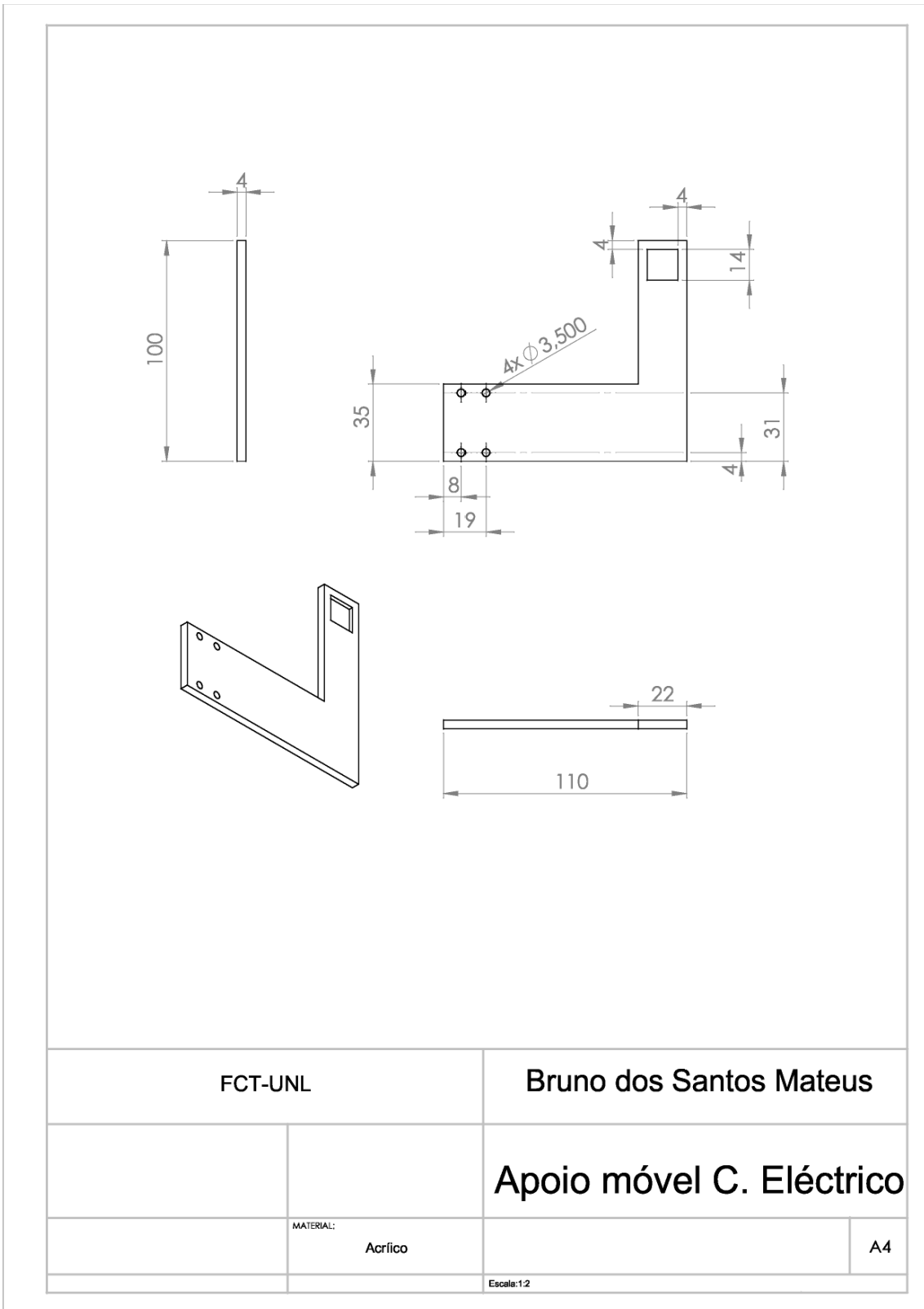


**Anexo 3- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes
de Dispositivo dedicado à aplicação de Campo Eléctrico**

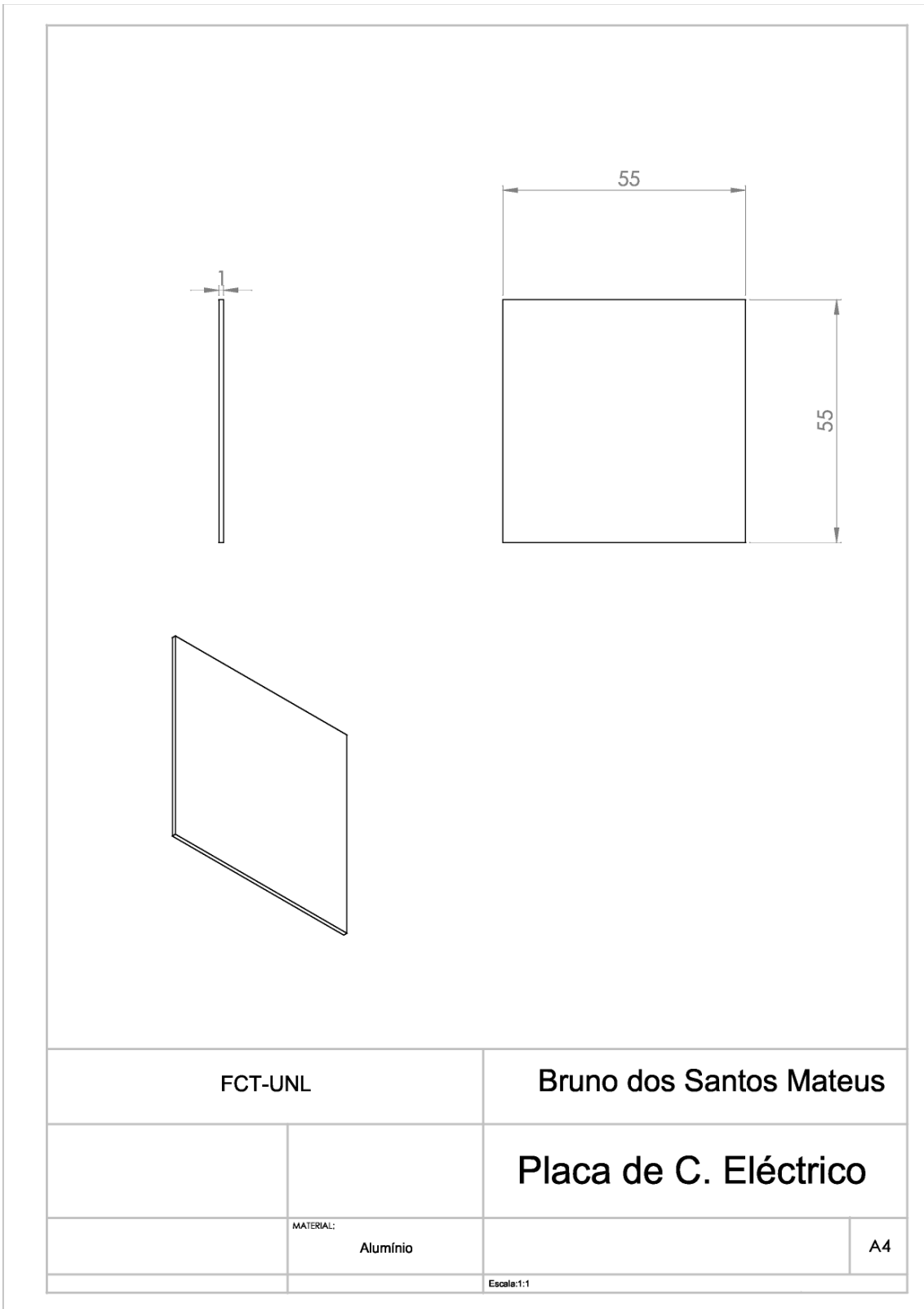
a)



b)

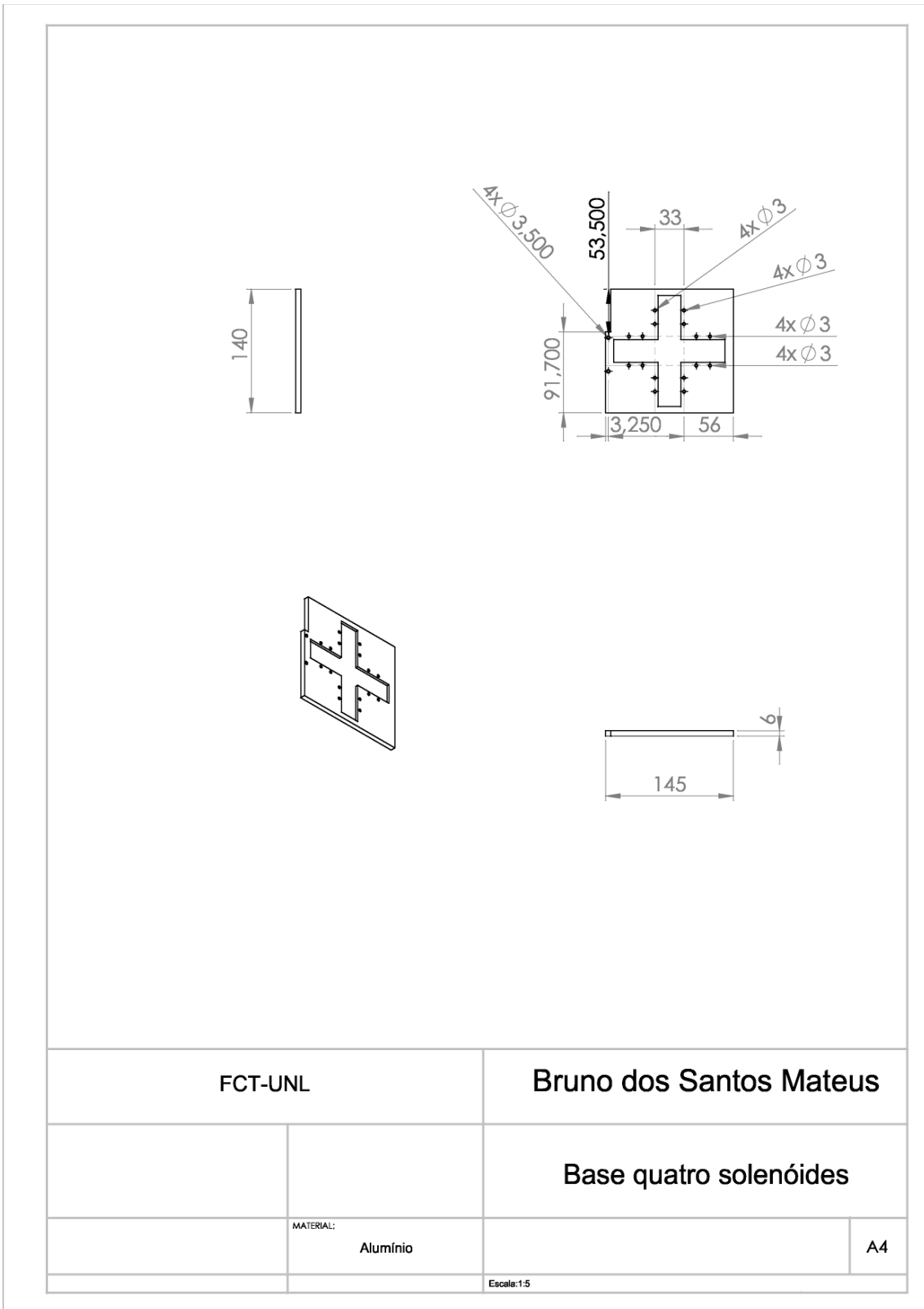


c)



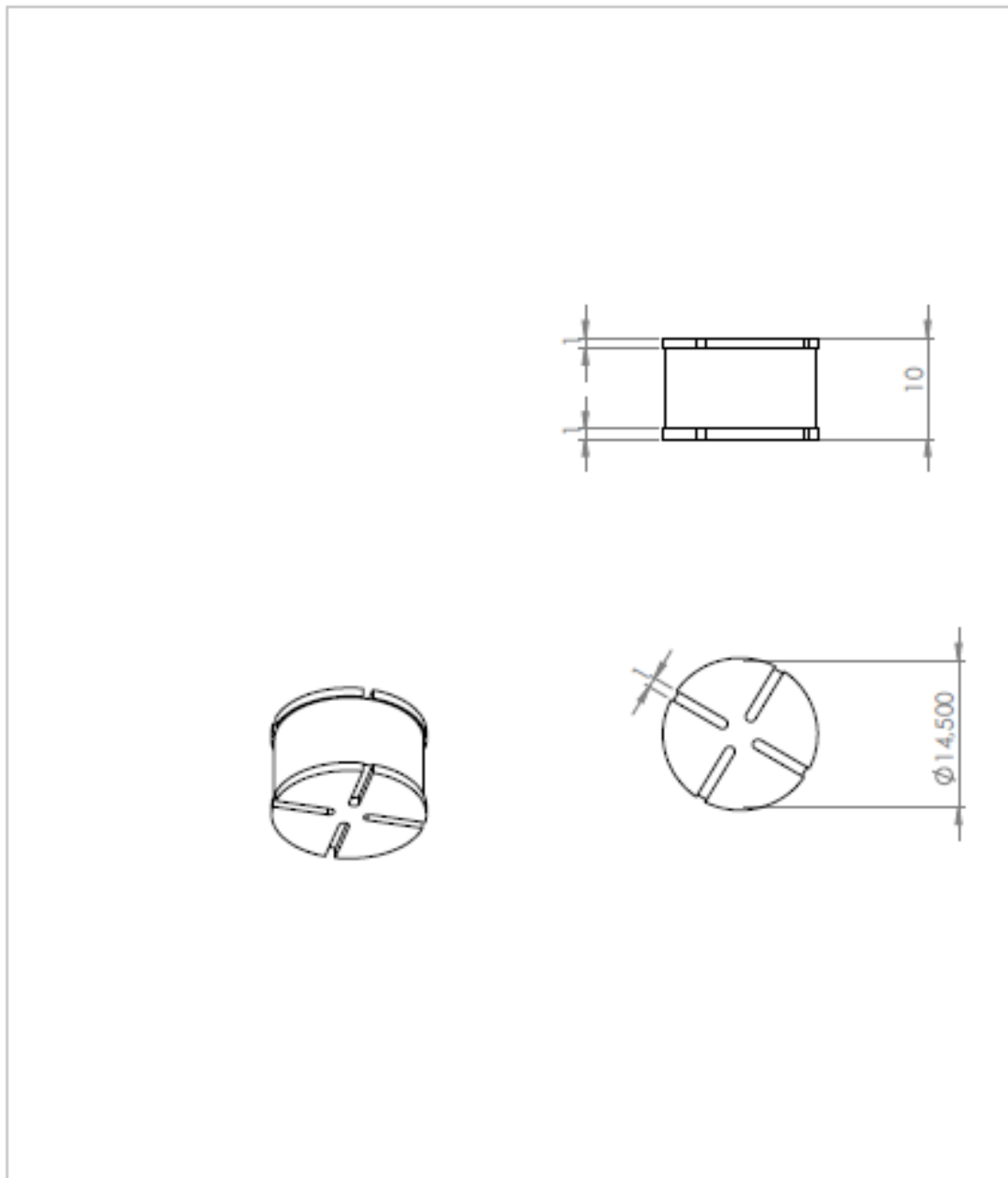
Anexo 4- Folhas de desenho em SolidWorks para componentes de Dispositivo com quatro Solenóides para Microscópio

a)



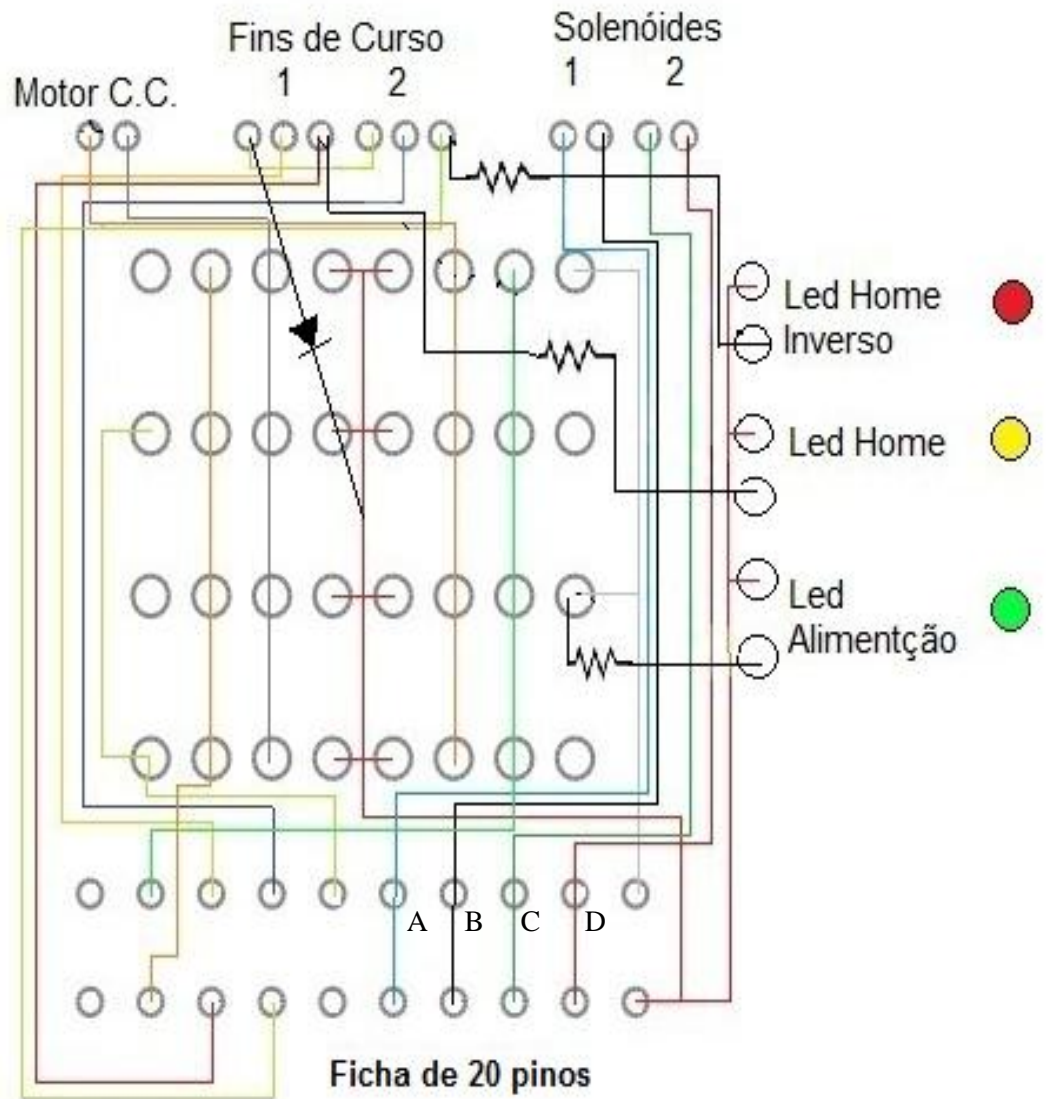
Anexo 5- Folha de desenho em SolidWorks do Solenóide de Campo Vertical

a)



FCT-UNL		Bruno dos Santos Mateus	
		Solenóide	
MATERIAL: Aço			A4
		ESM&C21	

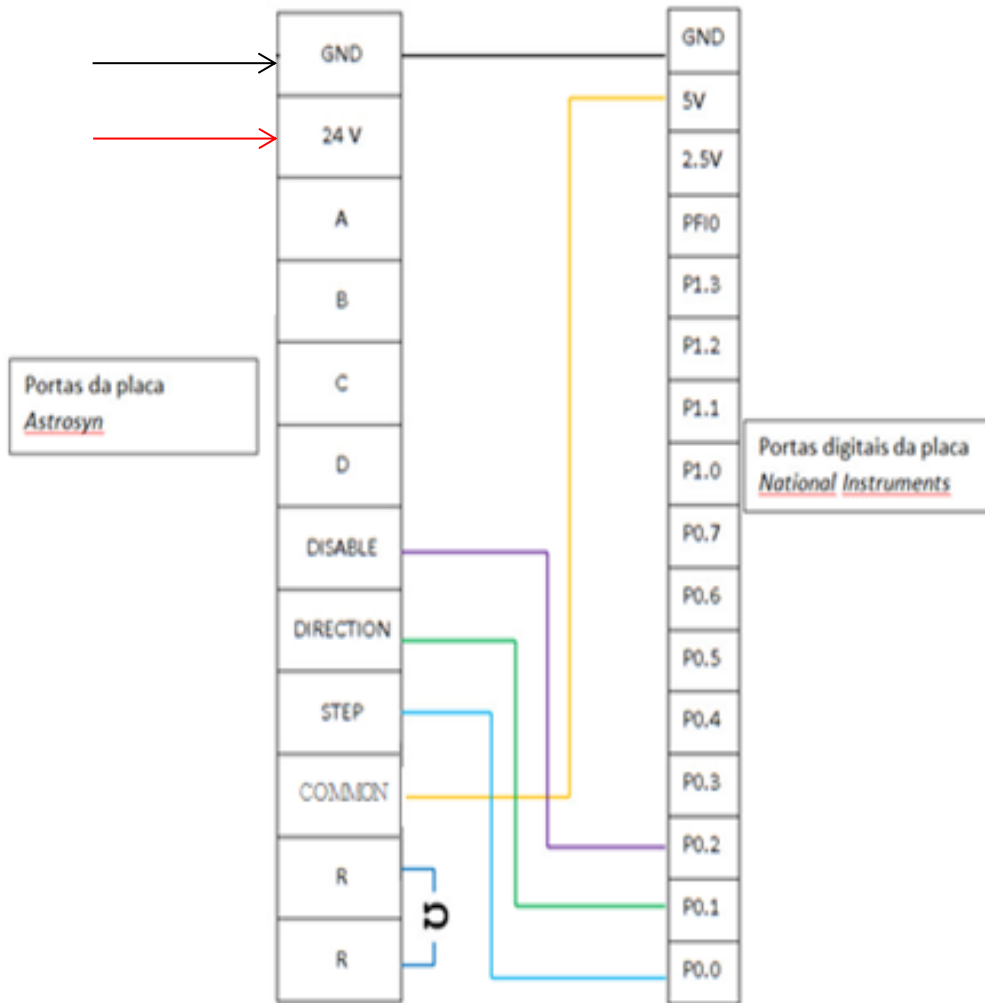
**Anexo 6- Esquema do circuito de alimentação e controlo do
Dispositivo Automatizado para Campo Magnético Horizontal e
Vertical**



As resistências representadas nos circuitos de alimentação dos led são de 1Kohm.

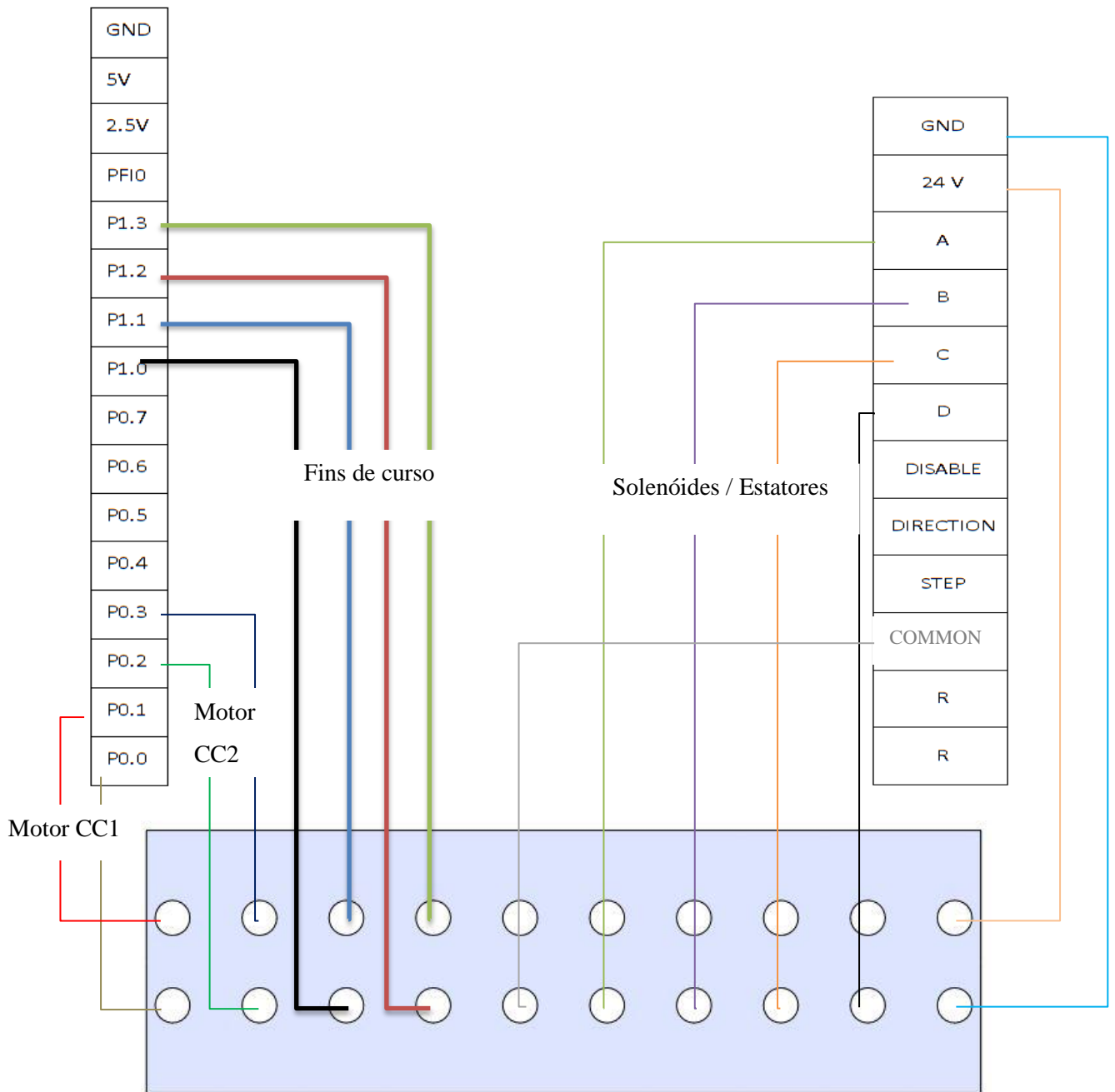
**Anexo 7- Esquema de ligação das portas digitais da placa 6008
National Instrumets à placa *Astrosyn G210* para excitação dos
solenóides**

Este circuito é utilizado em ambos os Dispositivos Automatizados.

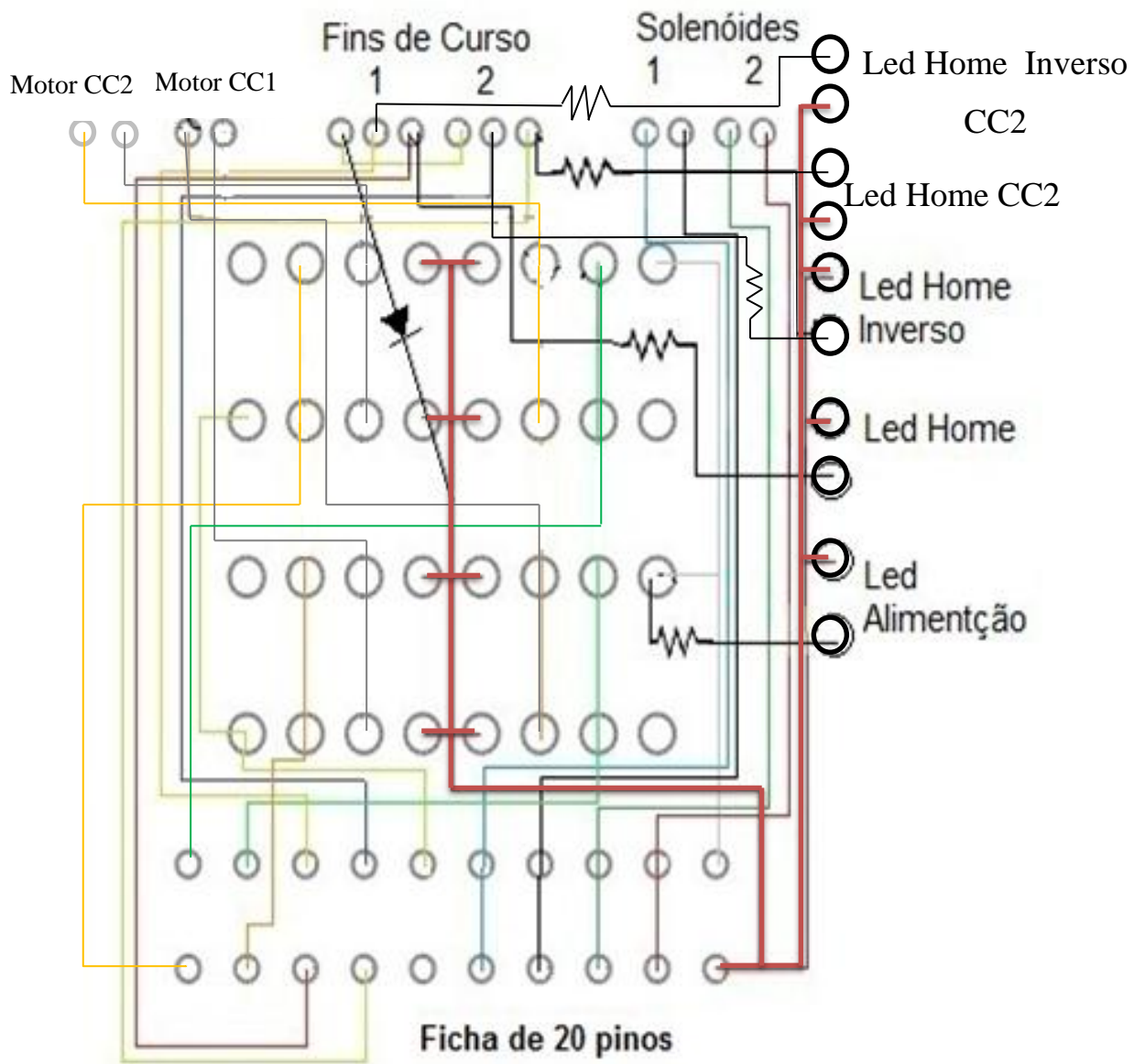


Anexo 8- Esquema de ligação do *flatcable* entre a placa da *National Instruments* , a placa *Astrosyn G210* e a ficha de 20 pinos

Este circuito é utilizado em ambos os Dispositivos Automatizados.



**Anexo 9- Esquema do circuito de alimentação e controlo do
Dispositivo Automatizado com Rotação de Campo Magnético
no Plano Horizontal e Vertical**



As resistências representadas nos circuitos de alimentação dos led são de 1Kohm.

