



Patrick Lourenço Inácio

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Inspeção de Componentes Microfabricados
com Células Bacterianas: Simulação,
Instrumentação e Validação Experimental**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor
Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa.

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida
Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2014

Inspecção de componentes microfabricados com células bacterianas: simulação, instrumentação e validação experimental.

Copyright © 2014 Patrick Lourenço Inácio.

Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm 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

Quero agradecer ao meu orientador, professor Telmo Santos, pela energia e entusiasmo que dedicou à realização deste projecto, pela abertura ao debate de ideias que foram para além dos objectivos da presente tese e ainda pelos conselhos para a minha futura vida profissional

À Doutora Carla Carvalho, que disponibilizou as bactérias e as instalações do seu laboratório no Instituto Superior Técnico de Lisboa, permitindo o desenvolvimento da nova técnica END.

Aos professores e aos técnicos do núcleo de Tecnologia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da FCT que sempre demonstraram disponibilidade e apoio durante toda a tese de mestrado.

Aos colegas de curso que acompanharam-me neste percurso académico, bem como aos colegas do laboratório de Tecnologia Mecânica que demonstraram grande espírito de amizade e muita entreaajuda.

Aos amigos de sempre, que me acompanham desde cedo, agradeço a sua amizade e confiança demonstrada ao longo destes últimos anos.

À minha família, principalmente aos meus pais e irmã, que apesar de distantes não deixaram-me de apoiar, tendo sempre uma palavra encorajadora nos momentos de maior desânimo. Sem eles não seria possível chegar a este ponto.

À Marta, que nestes últimos anos me apoiou, confiou e encorajou, o meu sincero obrigado.

Desejo agradecer também às seguintes entidades:

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

Desenvolvimentos recentes demonstraram que a utilização de células bacterianas constitui uma técnica de Ensaios Não Destrutivos viável para a identificação de micro defeitos superficiais, com dimensões inferiores a 10 μm , em alguns materiais de engenharia. Contudo, os desenvolvimentos são sobretudo de carácter experimental, qualitativo e restritos a poucos materiais, não sendo possível relacionar convenientemente os resultados com os parâmetros dos ensaios, nem explicar as causas desses resultados ou prever os efeitos de parâmetros ainda não testados.

O objectivo deste trabalho é alargar a técnica a um leque mais abrangente de materiais, desenvolver equipamento dedicado complementar ao existente, instrumentar os equipamentos utilizados, e estabelecer as bases para um modelo da mobilidade das bactérias durante a fase de penetração.

Foram utilizadas três estirpes de bactérias em provetes com defeitos artificiais em dez materiais de engenharia, e também em componentes microfabricados com defeitos reais. Foram produzidos e testados dois equipamentos para aplicação de campos magnéticos triaxiais com ímanes permanentes e com solenóides. Procedeu-se à instrumentação de equipamentos para medir a intensidade dos campos magnéticos em função dos parâmetros de inspeção. Estabeleceu-se um modelo analítico expedito, baseado na vibração forçada amortecida, para descrever e prever a dinâmica das bactérias em meio aquoso sujeitas a forças eléctricas ou magnéticas harmónicas. Foi realizada uma simulação numérica caracterizar os campos eléctricos e magnéticos nas condições de ensaio.

Os resultados experimentais mostraram que é possível identificar defeitos artificiais com profundidades de 1,2 μm , 3,2 μm , 2,0 μm e 1,8 μm em AISI 304L, AA1100, cobre, e Ti6Al4V, respectivamente. As imagens de microscópio electrónico de varrimento evidenciaram a presença de bactérias no interior de defeitos com 5 μm nos provetes microfabricados. Os resultados da simulação numérica foram coerentes com a experimentação. Em suma, os diversos resultados permitiram aprofundar o conhecimento processual e fenomenológico da técnica de END baseada em células bacterianas.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios Não Destrutivos

Micro-defeitos

Células Bacterianas

Simulação

Abstract

Recent developments have shown that the use of bacteria cells is a nondestructive testing (NDT) method viable to detect superficial micro defects, smaller than 10 micron, in some engineering materials. However, these developments are essentially at the experimental level, qualitative and only apply to few materials, there is no proper correlation between the results and testing parameters, neither explanation for what causes these results nor way to predict the effects of parameters not yet tested.

The aim of this thesis is to apply this technique to a wider range of materials, develop specific equipment in order to complement the already existent, instrument the equipment used and establish the basis for a model of bacteria movement during the penetration phase.

Three types of bacteria were used in samples of ten different engineering materials with artificial defects and also microfabricated samples with real defects. Two equipments were produced and tested to apply triaxial magnetic fields with permanent magnets and solenoids. The equipment was instrumented with Hall detectors in order to quantify the intensity of the magnetic fields according to the inspection parameters. An expeditious analytic model was established, based on the damping vibration force, to describe and predict the dynamics of the bacteria in aqueous medium when subjected to electric or harmonic magnetic forces. A numeric simulation was created with the purpose of characterizing the electric and magnetic fields in the testing conditions.

The experimental results show that is possible to identify artificial defects with depth of 1,2 μm , 3,2 μm , 2,0 μm and 1,8 μm in AISI 304L, AA1100, copper and Ti6Al4V, respectively. Scanning electron microscopy images reveal the presence of bacteria inside defects of 5 μm in the microfabricated samples. The results of the numeric simulation were consistent with those on experimentation. In sum, the collected data provide further procedural and phenomenological knowledge on NDT method based on bacterial cells.

Key-Words

Non-destructive Testing

Microdefects

Bacterial Cells (CB)

Simulation

ÍNDICE

Índice.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estado da Arte e Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Trabalho Realizado	3
1.4 Resultados e Conclusões	3
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1 Introdução	5
2.2 Ensaio Não Destrutivo (END)	6
2.3 END por Líquidos Penetrantes (LP)	6
2.4 END por Partículas Magnéticas (PM).....	8
2.5 Ensaio Não Destrutivo utilizando células bacterianas	9
2.6 Semelhanças entre Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas e Células Bacterianas.....	10
2.7 Metodologias recentes para a detecção de micro-defeitos	11
2.8 Potenciais aplicações dos END utilizando células bacterianas: biomateriais	12
2.8.1 Titânio	13
2.8.2 Magnésio	13
2.8.3 NiTi	14
2.9 Efeito anti-bacteriano do cobre	14
2.10 Efeito do campo magnético no crescimento do filme de células bacterianas	15
2.11 Revisão de alguns fundamentos do campo magnético	16
2.11.1 Campo magnético permanente	16
2.11.2 Electromagnetismo	18
2.11.3 Força magnética de Translação	21
2.11.4 Efeito Hall	22

2.12	Campo eléctrico.....	23
2.12.1	Potencial do Campo Eléctrico	25
2.12.2	Sensor campo eléctrico.....	25
3.	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1	Introdução	29
3.2	Desenvolvimento de equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial30	
3.2.1	Identificação dos requisitos funcionais	30
3.2.2	Concepção do Equipamento	31
3.2.3	Proposta de equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial31	
3.2.4	Automação do equipamento	36
3.3	Desenvolvimento de equipamento dedicado para aplicação de campo magnético permanente triaxial	37
3.3.1	Identificação dos requisitos funcionais	37
3.3.2	Concepção do equipamento.....	38
3.3.3	Proposta de Equipamento para aplicação de Campo Magnético permanente triaxial 38	
3.3.4	Automação do equipamento	40
3.4	Modificação de equipamento para remoção do excesso de bactérias com Luz ultra violeta 41	
3.4.1	Identificação das principais limitações.....	42
3.4.2	Soluções propostas	42
4.	INSTRUMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO	43
4.1	Introdução	43
4.2	Caracterização das sondas de Efeito Hall.....	44
4.3	Adaptação das sondas de Efeito Hall	45
4.4	Aquisição, leitura e conversão do sinal	47
4.5	Caracterização do campo magnético.....	48
4.5.1	Equipamento com 4 Solenóides	49
4.5.2	Equipamento com rotação do campo magnético.....	52

4.5.3	Equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.....	54
4.5.4	Equipamento para aplicação de campo magnético triaxial	62
4.5.5	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial.....	64
4.6	Técnicas de visualização do campo magnético.....	72
4.6.1	Equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.....	74
4.6.2	Equipamento para aplicação de campo magnético triaxial	75
4.6.3	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial.....	75
5.	MODELAÇÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO DAS BACTÉRIAS.....	77
5.1	Introdução	77
5.2	Simulação analítica	79
5.2.1	Modelo da bactéria.....	79
5.2.2	Forças Aplicadas	80
5.2.3	Modelo proposto	81
5.3	Simulação numérica do campo eléctrico.....	86
5.3.1	Modelo do condensador placas planas paralelas.....	86
5.3.2	Resultados	87
6.	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	93
6.1	Introdução	93
6.2	Fabrico de provetes com defeitos padrão.....	94
6.3	Provetes de ensaio de tracção.....	96
6.4	Bactérias.....	97
6.5	Ensaio com provetes padrão	97
6.6	Ensaio com provetes de ensaio de tracção.....	108
7.	CONCLUSÃO.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Procedimento experimental END utilizando células bacterianas [1].	10
Figura 2.2 – Interface dinâmica entre o magnésio e o ambiente biológico durante a degradação [15]......	13
Figura 2.3 - Viabilidade da bactéria <i>Staphylococcus</i> em cobre, bronze e aço inox a temperatura ambiente.	15
Figura 2.4 – Ciclo completo de histerese [8]......	16
Figura 2.5 – Evolução dos ímãs permanentes no século XX [26]......	17
Figura 2.6 - Visualização das linhas de campo magnético [8].	18
Figura 2.7 - Direcção do campo magnético criado pela passagem de corrente eléctrica no fio [28]......	19
Figura 2.8 - Campo magnético de um solenóide [28].	20
Figura 2.9 - Categorias de sensores para a medição do campo magnético.	22
Figura 2.10 - Efeito Hall.	23
Figura 2.11 - Campo eléctrico uniforme.	24
Figura 2.12 - Linhas do campo eléctrico.....	25
Figura 2.13 - <i>Field mill</i> [33]......	26
Figura 2.14 - Sonda campo eléctrico sonda de campo eléctrico.	26
Figura 3.1 - Modelação triaxial em SOLIDWORKS™ do equipamento para aplicação de campo magnético triaxial.	32
Figura 3.2 - Equipamento para aplicação de campo magnético triaxial.....	33
Figura 3.3 - Referencial assumido para caracterizar o movimento do ponto P.....	33
Figura 3.4 - Percurso do ponto P para vinte rotações mecânicas e uma rotação electrónica.	34
Figura 3.5 – Percurso do ponto P para uma rotação mecânica e vinte rotações electrónicas.....	35
Figura 3.6 - Percurso do ponto P para uma rotação mecânica e uma rotação electrónica.	35
Figura 3.7 - Percurso do ponto P para meia rotação mecânica e uma rotação electrónica.....	35
Figura 3.8 – Interface gráfica Labview™ para equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial.....	36
Figura 3.9 - Modelação triaxial em SOLIDWORKS™ do equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial.....	39
Figura 3.10 - Equipamento com aplicação campo magnético permanente triaxial.....	40
Figura 3.11 - Interface gráfica Labview™ para equipamento dedicado para aplicação de campo magnético permanente triaxial.	41
Figura 3.12 - Equipamento para remoção do excesso de bactérias com Luz ultra violeta [2]. ..	42
Figura 4.1 - Sinal de saída (Volts) em função do campo magnético (Gauss).	45

Figura 4.2 – Posição relativa das sondas de Hall:	46
Figura 4.3 – Esquema de montagem do sensor efeito Hall.	46
Figura 4.4 – Interface gráfica em <i>Labview</i> TM	47
Figura 4.5 – Sondas de Hall com as ligações eléctricas e a posição relativa final:	48
Figura 4.6 – Ensaio com sonda de Hall nº2 no equipamento com 4 solenóides –	49
Figura 4.7 - Eixo de coordenadas do equipamento com 4 solenóides.....	49
Figura 4.8 – Campo B(t) – Ligação nº1 – 1 Hz.....	50
Figura 4.9 - Campo B(t)- Ligação nº2 -1 Hz.....	51
Figura 4.10 – Ensaio com sonda de Hall nº2 no equipamento com rotação do campo magnético.	52
Figura 4.11 - Eixo de coordenadas do equipamento com rotação do campo magnético.	52
Figura 4.12 – Campo B(t) no equipamento com rotação do campo magnético.	53
Figura 4.13 - Esquema de montagem de equipamento de campo magnético H e V.....	54
Figura 4.14 - Eixo de coordenadas do equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.....	55
Figura 4.15 – Caracterização do equipamento com campo magnético horizontal e vertical com diferentes materiais:	55
Figura 4.16 - Campo magnético X,Y e Z sem provete.....	56
Figura 4.17 - Campo magnético X,Y e Z com provete de alumínio.	56
Figura 4.18 – Campo magnético X,Y e Z com provete de cobre.....	57
Figura 4.19 - Campo magnético X,Y e Z com provete de PMMA.	57
Figura 4.20 - Campo magnético X,Y e Z com provete de aço inox.....	58
Figura 4.21 - Campo magnético X,Y e Z com provete de aço carbono.	58
Figura 4.22 – Gráfico 3D campo magnético do equipamento para aplicação campo magnético horizontal e vertical.....	61
Figura 4.23 Esquema de montagem equipamento campo magnético triaxial	62
Figura 4.24 - Eixo de coordenadas do equipamento campo magnético triaxial.....	62
Figura 4.25 - Campo magnético X,Y e Z sem rotação.....	63
Figura 4.26 - Campo magnético X,Y e Z com rotação	63
Figura 4.27 - Coordenada medida	65
Figura 4.28 - Ensaio com sonda de Hall –	65
Figura 4.29 - Ensaio com sonda de Hall – Configuração 1.....	65
Figura 4.30 – Ensaio com Sonda de Hall – Configuração 2	66
Figura 4.31 – Interpolação e derivada dos resultados experimentais da intensidade do campo magnético B(x).....	67
Figura 4.32 - Eixo de coordenadas para equipamento campo magnético triaxial.....	67

Figura 4.33 - Campo magnético com rotação do íman vertical a 5 mm do provete - Íman Alnico.	68
Figura 4.34 - Campo magnético com rotação do íman vertical a 5 mm do provete – Íman Nd..	68
Figura 4.35 - Campo magnético com rotação horizontal e vertical - Íman Alnico.....	69
Figura 4.36 - Campo magnético com rotação horizontal e vertical - Íman Nd.....	70
Figura 4.37 – Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 45°	70
Figura 4.38 – Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 30°	71
Figura 4.39 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 15°	71
Figura 4.40 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 30°	72
Figura 4.41 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 45°	72
Figura 4.42 - Visualização de campo magnético com filamentos de ferro.....	73
Figura 4.43 - Visualização de campo magnético com ferrofluido.....	73
Figura 4.44 – Filme de visualização de campo magnético.....	74
Figura 4.45 – Visualização do campo ao longo do tempo com filamentos de ferro.....	74
Figura 4.46 - Visualização do campo ao longo do tempo com ferrofluido.....	74
Figura 4.47 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.....	75
Figura 4.48 - Visualização do campo ao longo do tempo com filamentos de ferro.....	75
Figura 4.49 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.....	75
Figura 4.50 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.....	76
Figura 5.1 – Morfologias das bactérias:.....	79
Figura 5.2 - Modelos de densidade da bactéria:.....	80
Figura 5.3 - Diagrama de forças.....	81
Figura 5.4 - Gráfico da força exercida sobre a bactéria em função do campo magnético gerado por solenóides.....	83
Figura 5.5 – Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$	83
Figura 5.6 - Gráfico da força exercida sobre a bactéria em função do campo magnético gerado por ímanes permanentes.....	84
Figura 5.7 - Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força magnética gerada por ímanes permanentes.....	84
Figura 5.8 – Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força eléctrica.....	85
Figura 5.9 - Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força eléctrica.....	85
Figura 5.10 - Configuração do modelo.....	86

Figura 5.11 – Visualização da malha tetraédrica do modelo	87
Figura 5.12 – Potencial eléctrico com provete em ar	88
Figura 5.13 - Potencial eléctrico com provete em perfeito condutor eléctrico	88
Figura 5.14 - Potencial eléctrico com provete de material isolante ($\epsilon=3$),	89
Figura 5.15 – Linhas campo eléctrico com provete de ar.....	90
Figura 5.16 - Linhas campo eléctrico com provete de perfeito condutor eléctrico	90
Figura 5.17 - Linhas campo eléctrico com provete de material isolante.....	90
Figura 6.1 – Matriz de indentações	95
Figura 6.2 – Forma do defeito padrão.	95
Figura 6.3 – Provetes produzidos em diferentes materiais.....	96
Figura 6.4 – Exemplo de um provete fornecido.....	97
Figura 6.5 – Defeito no provete PL_B:	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades das ligas magnéticas alnico e NdFeB [27].....	18
Tabela 3.1 - Requisitos equipamento dedicado campo magnético triaxial.	30
Tabela 3.2- Requisitos equipamento dedicado campo magnético permanente.	38
Tabela 4.1 – Tabela comparativa das propriedades dos vários sensores.....	44
Tabela 4.2 – Intensidade campo magnético para equipamento com 4 solenóides – Ligação nº 2 - 1 Hz.	50
Tabela 4.3 – Intensidade campo magnético para equipamento com 4 solenóides - Ligação 2 - 1 Hz.	51
Tabela 4.4 – Valores máximos e mínimos da intensidade do campo magnético.	53
Tabela 4.5 – Valores das intensidades do campo magnético no equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.....	59
Tabela 4.6 - Máximo e mínimo do ensaio sem rotação.....	63
Tabela 4.7 - Máximo e mínimo do ensaio com rotação	63
Tabela 4.8 – Intensidade do campo magnético em função da distância para o ensaio com sonda de Hall nº 4.....	66
Tabela 6.1 - Propriedades dos materiais.....	94
Tabela 6.2 – Escala de dimensão dos defeitos	94
Tabela 6.3 – Dimensão dos defeitos nos diferentes materiais.....	96
Tabela 6.4 - Propriedades das bactérias utilizadas nos ensaios laboratoriais.....	97
Tabela 6.5 – Planificação dos ensaios efectuados e dimensão L [μm] /P[μm] do menor defeito detectado em cada ensaio.	98
Tabela 6.6- Ensaio em provetes de aço inox.	99
Tabela 6.7 Ensaio em provetes de alumínio.....	100
Tabela 6.8 - Ensaio em provetes de cobre.....	101
Tabela 6.9 - Ensaio em provetes de fibra de carbono.	102
Tabela 6.10 - Ensaio em provetes de GLARE TM	103
Tabela 6.11- Ensaio em provetes de grafite IC5.	104
Tabela 6.12 - Ensaio em provetes de Magnésio.....	105
Tabela 6.13 - Ensaio em provetes de NiTi.	105
Tabela 6.14 - Ensaio em provetes de Chumbo.....	106
Tabela 6.15 - Ensaio em provetes de titânio.	107
Tabela 6.16 – Tabela com melhores resultados.	108
Tabela 6.17 - Planificação dos ensaios.....	109

1. INTRODUÇÃO

1.1 ESTADO DA ARTE E MOTIVAÇÃO

Os Ensaio Não Destrutivos (END) consistem numa técnica e metodologia de ensaio que avalia e detecta defeitos em materiais, peças ou equipamentos sem danificar ou alterar as suas características de forma irreversível, podendo, após a inspecção, voltar ao seu normal funcionamento.

Devido aos constantes avanços tecnológicos e à evolução significativa a nível de novos materiais, surge a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas e metodologias de END, nomeadamente na área da microfabricação. Uma das motivações deste trabalho decorre da necessidade que se verifica actualmente nas técnicas de END para detecção de defeitos em peças e componentes provenientes da microfabricação, pois a especificidade deste tipo de defeito ultrapassa os limites tecnológicos das técnicas convencionais de END.

Tem vindo a ser desenvolvida uma técnica pioneira de END, baseada na utilização de células bacterianas para a detecção de micro-defeitos. A utilização de células bacterianas tem por base as suas principais características como o tamanho, a mobilidade e a aderência das bactérias.

O trabalho realizado por João Borges [1] permitiu validar os pressupostos desta nova técnica, obtendo bons indicadores, principalmente de carácter experimental e qualitativos. Como desenvolvimento surgiram os trabalhos de Bruno Mateus [2] e Diogo Carvalho [3], que criaram novos equipamentos dedicados e realizaram vários ensaios práticos, recolhendo mais informação sobre a nova técnica e definindo parâmetros óptimos com base nos ensaios realizados.

Contudo, a técnica necessita de mais investigação e desenvolvimento, pois o trabalho realizado foi sobretudo de carácter experimental, quantitativo e restrito a poucos materiais, não sendo possível relacionar os resultados obtidos com os parâmetros dos ensaios, nem identificar as causas desses resultados ou mesmo prever o efeito de parâmetros ainda não testados.

O trabalho a realizar pretende adicionar mais recursos e informações sobre a mobilidade das células bacterianas sujeitas a campo magnético e eléctrico.

1.2 OBJECTIVOS

Com o intuito de desenvolver e melhorar a nova técnica de END com células bacterianas foram traçados novos objectivos científicos e tecnológicos para o trabalho a realizar, com base no problema existente.

Os principais objectivos científicos para a nova técnica END com células bacterianas foram:

1) Aprofundar o conhecimento científico da nova técnica, permitindo melhorar a compreensão dos aspectos fenomenológicos envolvidos na técnica, utilizando esse conhecimento para otimizar os parâmetros de ensaios e para criar novos equipamentos dedicados.

2) Compreender e caracterizar os campos magnéticos e eléctricos existentes nos equipamentos. Pretende-se com este conhecimento quantificar a intensidade dos campos magnéticos em função tempo, bem como o seu decaimento no espaço, medindo experimentalmente as intensidades dos campos magnéticos. Pretende-se igualmente estudar as linhas do campo eléctrico no interior e na envolvente de um condensador de placas planas paralelas, através da simulação numérica.

3) Criar um modelo simplificado do comportamento dinâmico das células bacterianas para explicar e prever a causa/efeito dos parâmetros dos ensaios, com os resultados obtidos através da simulação analítica.

Para alcançar os objectivos científicos, foram traçados 3 objectivos tecnológicos de forma a cumprir com os requisitos acima referidos:

1) Produção de novo equipamento de ensaio dedicado, para aplicação de campos magnéticos triaxiais com ímanes permanentes e com solenóides, para melhorar a mobilidade das células bacterianas na fase de penetração das bactérias aos defeitos.

2) Criação de protótipo funcional com uma apresentação pré-comercial, constituído por um kit com todos os elementos necessários para aplicação da técnica.

3) Inspeccionar novos materiais com a técnica END utilizando células bacterianas nomeadamente titânio, NiTi, magnésio AZ31, fibra de carbono, GLARETM, chumbo e grafite.

4) Desenvolvimento de sondas de Hall, bem como os meios necessários para a aquisição e processamento de sinal, e de um programa dedicado.

1.3 TRABALHO REALIZADO

Foram produzidos dois novos equipamentos dedicados para promover a mobilidade e a penetração das bactérias nos defeitos. O primeiro equipamento cria um campo magnético triaxial gerado pelos solenóides do estator de um motor passo-a-passo. No segundo equipamento utilizaram-se ímanes permanentes para a criação de campo magnético triaxial, com a particularidade de os campos magnéticos serem mais intensos.

Procedeu-se à instrumentação dos equipamentos com sondas de Hall para a medição da intensidade dos campos magnéticos, para quantificar a intensidade dos campos magnéticos em função dos parâmetros de inspecção. Utilizaram-se técnicas complementares de caracterização dos campos, recorrendo a ferrofluido, partículas magnéticas e filmes de visualização de campo magnético. Estabeleceu-se um modelo analítico expedito para o comportamento das bactérias, baseado na vibração forçada amortecida, de modo a descrever e prever a dinâmica das bactérias em meio aquoso sujeitas a forças eléctricas ou magnéticas harmónicas. Foram caracterizados os campos eléctricos e magnéticos nas condições de ensaio através de simulação numérica, recorrendo aos métodos dos elementos finitos.

Foram utilizadas as bactérias *R.erythropolis*, *S. aureus* e *S.hominis* em provetes com defeitos padrão de micro indentação em AA1100, AISI304L, Ti6Al4V, NiTi, chumbo, magnésio AZ31, grafite, fibra de carbono e GLARE™ e também em provetes de tracção uniaxial em AISI 304L com defeitos reais, microfabricados por *powder injection moulding*.

1.4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho desenvolveu-se equipamento dedicado para a aplicação de campo magnético, bem como a instrumentação e caracterização dos campos magnéticos. Simulou-se o comportamento da bactéria sujeita a força magnética e eléctrica em meio aquoso, e por fim validou-se experimentalmente a nova técnica de END utilizando diferentes células bacterianas em diferentes materiais de engenharia.

Relativamente aos equipamentos para aplicação de campos magnéticos, pode concluir-se que a concepção e a solução construtiva adoptada cumprem eficazmente os requisitos de projecto inicialmente estabelecidos.

A instrumentação realizada permitiu caracterizar e quantificar adequadamente a intensidade dos campos magnéticos em cada equipamento, nas três direcções espaciais, e para quaisquer parâmetros de ensaio. Verificou-se que na posição em que os provetes são colocados nos equipamentos, o campo magnético gerado pelos solenóides é inferior a 350 Gauss, enquanto o

campo gerado pelos ímanes permanentes é superior a 1000 Gauss, podendo aumentar consideravelmente mediante pequenas acções correctivas.

As três técnicas complementares de caracterização qualitativa dos campos magnéticos que foram utilizadas (ferrofluido, partículas de ferro e filmes de visualização com partículas de níquel) mostraram-se muito úteis para o conhecimento da extensão espacial dos campos.

O modelo analítico do comportamento dinâmico das bactérias baseado na analogia com a vibração forçada amortecida de uma partícula em meio aquoso sujeita a forças harmónicas revelou-se uma forma expedita para estimar a posição das bactérias em função do tempo, para diferentes parâmetros de ensaio.

As principais conclusões a retirar acerca da simulação numérica do campo eléctrico foram que: o campo é uniforme aproximadamente em todo o seu volume na ausência de provete; que existe uma maior perturbação do campo quando o provete é condutor eléctrico, enquanto para o caso do material isolante a perturbação é tanto menor, quanto menor for a constante dieléctrica.

Conclui-se que o melhor resultado obtido foi para o provete de aço inox 304, onde se detectou o defeito padrão H, com uma largura de 5,71 μm e uma profundidade de 1,2 μm com bactérias *R. erythropolis* negativas.

Em termos de bactérias, a melhor foi a *R. erythropolis* negativa, quer para campo eléctrico, como magnético. As bactérias com propriedades magnéticas, a *S. aureus* e a *S. hominis* não detectaram qualquer defeito.

Em suma, os melhores resultados experimentais mostraram que é possível identificar defeitos artificiais com profundidades de 1,2, 3,2, 2,0 e 1,8 μm em AISI 304L, AA1100, cobre, e Ti6Al4V, respectivamente. As imagens de microscópio electrónico de varrimento evidenciaram a presença de bactérias no interior de defeitos com 5 μm nos provetes microfabricados. Os diversos resultados permitiram aprofundar o conhecimento processual e fenomenológico da técnica de END baseada em células bacterianas.

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica realizada. Abordam-se no estado da arte os principais temas associados a esta tese, nomeadamente os END (§ 2.1), END por líquidos penetrantes (§ 2.3), END por partículas magnéticas (§ 2.4) e END utilizando de células bacterianas (§ 2.5). Apresentam-se desenvolvimentos recentes para a detecção de micro-defeitos (§ 2.7) e potenciais aplicações dos END utilizando células bacterianas (§2.8). Descrevem-se os principais fundamentos do campo magnético (§ 2.11) e campo eléctrico (§ 2.12)

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

Os Ensaio Não-Destrutivos (END) são conjuntos de ensaios que se realizam em equipamentos, peças ou materiais, sem perda da sua integridade física ou funcionalidade após o ensaio. Este tipo de ensaio é definido pela *American Society for Nondestructive Testing* (ASNT) [4] como:

“A aplicação de metodologias de teste para examinar um objecto, material ou sistema, sem prejuízo das suas propriedades, performance ou utilidade futura”

O aparecimento dos END não tem data específica, mas sofreu grande impulso durante as duas Grandes Guerras Mundiais, passando a ser uma importante ferramenta para o aumento dos níveis de fiabilidade, qualidade e segurança dos materiais e componentes. Com a constante introdução de novos materiais e tecnologias de produção surgem novos tipos de defeitos que necessitam de novas técnicas END para a sua detecção [5].

Os END podem classificar-se segundo o princípio físico associado, como a emissão de radiação, ondas acústicas, ondas electromagnéticas entre outros (absorção, capilaridade, etc.) Os métodos mais comuns de END são: Líquidos Penetrantes (LP), Partículas Magnéticas, Correntes Induzidas, Ultra-sons e o Raios X.

2.3 END POR LÍQUIDOS PENETRANTES (LP)

Os líquidos penetrantes (LP) são um dos métodos mais utilizados em END para detecção de defeitos superficiais numa grande variedade de materiais, salvo materiais porosos ou com rugosidade elevada. É uma técnica com múltiplas aplicações, pois adapta-se facilmente a diferentes tamanhos e geometrias das peças, requer baixos tempos de inspecção e possui um custo baixo comparativamente a outras técnicas, constituindo assim uma ferramenta essencial na indústria actual. [6]

A origem dos LP remonta aos finais do século XIX, em que as peças a inspecionar eram mergulhadas em óleo mineral durante algum tempo e, após a secagem da superfície, a peça era coberta com talco. O aparecimento de manchas no talco revelavam os defeitos existentes na superfície da peça [7]. Este procedimento não permite detectar defeitos de pequena dimensão, pelo que foi necessário uma evolução no sentido de aumentar a capacidade de penetração dos LP por capilaridade e a adição de corantes para criar uma coloração do defeito facilitando a sua detecção.

A inspecção por LP baseia-se na capacidade de penetração de um líquido num defeito pelo efeito da capilaridade. É necessário preparar o objecto a inspecionar, removendo toda a

sujidade e gordura da superfície em estudo de modo a desobstruir os possíveis defeitos à superfície para a aplicação do penetrante. O excesso é removido e aplicado um revelador que absorve o penetrante do interior dos defeitos. As manchas que surgem indicam a localização dos defeitos permitindo a sua caracterização e avaliação. O procedimento a seguir para a realização de um ensaio por LP é apresentado mais detalhadamente [8]:

1. - Preparação da superfície – É necessário garantir que a superfície a inspeccionar esteja limpa e seca, isto é, isento de gorduras e impurezas que possam pôr em causa os resultados do ensaio.

2. - Aplicação do penetrante – O líquido penetrante é aplicado em toda a área da superfície a inspeccionar, criando uma película contínua em toda a superfície.

3. - Remoção do excesso de penetrante – O excesso de penetrante é removido da superfície após o tempo de penetração. Pode ser removido através de 3 técnicas: água, emulsificador ou solventes, sendo necessário especial cuidado para que o penetrante não seja removido dos defeitos.

4. - Aplicação de revelador – É aplicada uma fina camada de revelador sobre toda superfície uniformemente. O revelador absorve o penetrante dos defeitos, indicando a presença de um defeito.

5. - Inspeção e interpretação dos resultados – Após a detecção do defeito, este é caracterizado de modo a avaliar se os defeitos são prejudiciais ou não.

6. - Limpeza Final – Concluída a operação de avaliação dos defeitos, procede-se à limpeza da superfície para remover os resíduos dos materiais penetrantes. Caso a superfície não seja devidamente limpa, pode ficar comprometida uma aplicação futura, por exemplo, de tinta ou a qualidade de uma soldadura.

As principais propriedades que caracterizam os LP são a capilaridade/molhabilidade, a viscosidade e a coloração.

Outras propriedades são tidas em conta no fabrico do LP como:

- a) Viscosidade limitada a 5 centistokes
- b) Ponto de inflamação mínimo entre os 50 – 55 ° C, por razões de segurança
- c) Volatilidade baixa
- d) Estabilidade térmica, para que não ocorra perda de brilho e cor dos pigmentos utilizados.
- e) Inércia química, ou seja, o penetrante não deve reagir quimicamente com as peças a inspeccionar
- f) Solubilidade, facilidade de remoção e resistência à água, O penetrante deve ser facilmente removido da superfície onde foi aplicado.
- g) Toxicidade baixa

2.4 END POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (PM)

A inspeção com partículas magnéticas é uma técnica utilizada para detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. O END por PM surgiu nos Estados Unidos da América, por volta de 1930, mas após a 2ª Guerra Mundial sofreu uma grande evolução como método de Ensaio não Destrutivo. O método de PM baseia-se no facto das partículas serem atraídas para zonas de campo de fuga gerado pelo defeito na peça, após ser sujeita a um campo magnético.

Este método é composto por 6 fases:

- 1 Limpeza da peça (Remoção de óleos, gorduras, etc)
2. Magnetização da peça
3. Aplicação de partículas magnéticas
4. Inspeção
5. Desmagnetização
6. Limpeza dos resíduos das partículas magnéticas

A escolha das partículas magnéticas a utilizar numa inspeção é um dos factores mais importantes do método. As características das partículas a ter em conta num ensaio são [6]:

a) Dimensão – A dimensão das partículas condiciona o seu movimento quando sujeitas a um campo magnético. Um campo magnético fraco criado por um defeito retém mais facilmente uma partícula de pequena dimensão do que uma de maior dimensão. Uma rugosidade elevada prejudica a mobilidade de uma partícula menor, podendo esta aderir à superfície sem que ocorra movimento, enquanto uma partícula de maior dimensão atenua este efeito de adesão. Tipicamente a dimensão das partículas são da ordem dos 10 -30 μm .

b) Forma – A forma das partículas influencia o seu comportamento quando sujeito a um campo magnético. Partículas com forma mais alongada tendem a alinhar-se ao longo das linhas de força, ao invés de partículas esféricas, devido ao aparecimento de polos magnéticos.

c) Permeabilidade e força coerciva – As partículas magnéticas devem ter uma permeabilidade elevada, baixa retentividade e força coerciva baixa.

d) Mobilidade – A mobilidade das partículas tem uma influência importante na formação das indicações. Na aplicação por via seca é possível aumentar a mobilidade, vibrando a peça a inspeccionar ou utilizando correntes alternadas ou rectificadas. Para a via húmida é pertinente regular a viscosidade da suspensão para não reduzir a mobilidade das partículas.

e) Visibilidade e Contraste – As partículas podem ser fabricadas com várias cores, para criar várias possibilidades de contraste e visibilidade. As partículas originalmente são de cor

cinzenta, mas são utilizadas outras cores em função da peça em inspecção, de modo a conseguir-se um melhor contraste. É possível criar partículas com pigmentos fluorescentes que aumentam a visibilidade e contraste, sendo então necessário realizar a inspecção com luz negra.

2.5 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZANDO CÉLULAS BACTERIANAS

A técnica END utilizando células bacterianas é um método para inspecção de micro-defeitos superficiais em materiais ferrosos e não ferrosos. É uma técnica recente e pioneira que se encontra em desenvolvimento no âmbito das actividades de investigação do Núcleo de Tecnologia Mecânica do DEMI da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Os resultados experimentais já efectuados demonstraram o elevado potencial da técnica, mas também a necessidade de mais investigação [1], [2] e [3].

O método em estudo baseia-se na dimensão reduzida das bactérias, na ordem dos microns, permitindo identificar defeitos com dimensão inferiores a 10 μm [3]. Este método é semelhante aos END por líquidos penetrantes devido à sua metodologia de ensaio.

Na primeira etapa, a superfície da peça deve ser limpa de modo a ficar isenta de sujidade e gorduras. Depois, aplicam-se as células bacterianas na superfície da peça para a fase penetração e adesão das células ao defeito durante 4 minutos [3]. De seguida, o excesso é removido e dá-se o início à etapa de revelação, inspecção e interpretação dos resultados. Por fim, a peça é esterilizada a 60 °C de forma a matar todas as células bacterianas, evitando danos a nível da biocorrosão [1]. As diferentes fases estão representadas na Figura 2.1

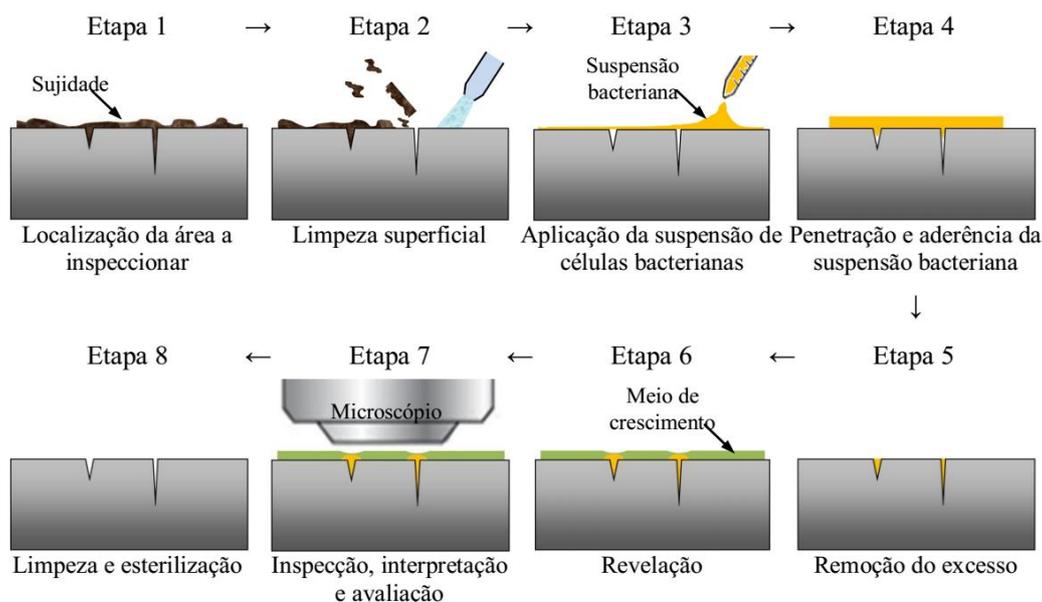


Figura 2.1- Procedimento experimental END utilizando células bacterianas [1].

O desenvolvimento de uma técnica END capaz de detectar micro-defeitos é uma necessidade e uma importante ferramenta, devido à actual falta de uma técnica nesta área. As técnicas comuns de END como os ultra-sons, raios-x, os LP, as correntes induzidas e as PM não têm actualmente uma variante capaz de detectar micro-defeitos, por exemplo nas peças microfabricadas.

Os trabalhos recentemente desenvolvidos sobre a técnica END utilizando células bacterianas abordaram principalmente a etapa de penetração das células bacterianas aos defeitos. No trabalho realizado por Bruno Mateus [2], foram produzidos vários equipamentos dedicados para promover a mobilidade das bactérias, tais como: equipamento para aplicação campo eléctrico horizontal e vertical, equipamento com rotação do campo magnético e equipamento aplicando campo magnético horizontal e vertical. Como trabalho complementar, Diogo Carvalho [3] avaliou e interpretou as novas variáveis criadas pelos novos equipamento realizando vários ensaios. Com o trabalho realizado foi possível definir um limiar de detectabilidade de micro-defeitos superficiais de 9,6 μm para provetes em aço inox [3].

2.6 SEMELHANÇAS ENTRE LÍQUIDOS PENETRANTES, PARTÍCULAS MAGNÉTICAS E CÉLULAS BACTERIANAS

A primeira evidência da semelhança entre os END por LP e os END utilizando células bacterianas está na metodologia de ensaio, uma vez que ambos apresentam o mesmo procedimento de ensaio. As duas técnicas foram desenvolvidas para detectar defeitos à

superfície: os líquidos penetrantes com limiar de detectabilidade nos 67 μm no cobre e as células bacterianas para defeitos inferiores a 10 μm [3]. O efeito da capilaridade é um dos factores mais importante presente nas duas técnicas que possibilitam a penetração dos líquidos ou bactérias nos defeitos. Uma das vantagens das células bacterianas em relação aos líquidos penetrantes é a adesão das bactérias ao defeito, diminuindo a possibilidade de remoção de bactérias do defeito na fase de remoção do excesso. O paralelismo entre as partículas magnéticas e as células bacterianas deve-se à utilização de bactérias com propriedades magnéticas.

2.7 METODOLOGIAS RECENTES PARA A DETECÇÃO DE MICRO-DEFEITOS

A inspecção de componentes produzidos por *printed circuit board* (PCB) requer meios de inspecção fiáveis, para que o seu custo de montagem seja reduzido. Existem vários tipos de defeitos em PCB, dificultando a sua identificação. Os defeitos mais comuns são o curto circuito, falta de ligação, desvios, etc. [9].

Em 2006 na Universidade de Kanazawa no Japão, Sotoshi *et al* [10] desenvolveram uma sonda de correntes induzidas de alta frequência composta por uma *meander coil*, como bobina de excitação, e por um *spin-valve giant magnetoresistance* (SV-GMR). A sonda tem a capacidade de inspecionar PCB, detectando os micro-defeitos nos micro condutores, fornecendo ainda informação sobre a dimensão e alinhamento do condutor. A sonda foi testada num modelo de PCB com um condutor de 200 μm de espessura, em que os defeitos variavam entre os 50 μm a 500 μm , conseguindo detectar o defeito de menor dimensão [9].

A dificuldade de detecção e caracterização de defeitos em micro componentes electrónicos aumentou, devido à maior complexidade das formas dos componentes e à diminuição da sua dimensão. A utilização de raio-X apresenta cada vez mais limitações devido à maior sobreposição das formas geométricas dos componentes, interferindo no campo de visão do raio-X. Devido a esse facto, o uso da técnica de tomografia computadorizada, tem maior interesse por ser gerado um modelo 3D de visualização do componente, através do processamento de um algoritmo de reconstrução dos raio-x tirados em vários planos. Com esta técnica, foi possível atingir resoluções na ordem dos 2 μm [11].

A detecção de micro-defeitos em condutas de vapor é crucial para garantir a segurança e longevidade das mesmas, visto que estão sujeitas a elevadas pressões durante longos períodos de tempo. Nestes casos, existe um risco elevado do crescimento dos micro-defeitos desde a

superfície até ao interior da conduta, aumentando a possibilidade de falha grave e ruptura do equipamento [12].

O método convencional de ultra-sons não detecta este tipo de defeitos, visto que o comprimento de onda dos ultra-sons é superior ao comprimento do defeito, ocorrendo a difracção da onda ao invés da sua reflexão [13]. Para ultrapassar este problema, o trabalho de J. V. Zhitluchina *et al.* [11], aprofundou o estudo das propriedades acústicas de amostras de aço 12Kh1MF de alta temperatura, retiradas de uma conduta de vapor, com micro-defeitos de 0,5 μm até 28 μm . A técnica de interferometria laser foi utilizada para aprofundar o conhecimento da dinâmica espacial-temporal dos campos acústicos na presença de defeitos internos e superficiais. Três tipos de provetes foram testados com as seguintes condições: o primeiro provete esteve sujeito a pressões de 20 MPa, à temperatura de 600 °C durante 16000 horas, com identificação ao microscópio de discontinuidades à superfície na gama dos 4,3 - 28,25 μm ; o segundo e terceiro provetes foram sujeitos a pressões de 13 MPa, à temperatura de 550 ° durante 150000 horas. No provete 2 foi inspeccionada a zona sujeita à compressão e no provete 3 analisou-se a zona à tracção, com a caracterização dos defeitos na ordem dos 0,6 a 8,8 μm para o provete 2 e de 0,5 a 15,6 μm para o provete 3. Os resultados obtidos nos ensaios com os provetes mostraram uma boa relação entre os sinais causados pela difracção dos ultra-sons com a extensão dos danos no material.

V.Mahendran and John Philip [14] desenvolveram uma nova técnica de visualização de defeitos a olho nu para a caracterização de defeitos superficiais em materiais ferromagnéticos. Foram utilizados diferentes tipos de nano-fluidos com nano-partículas ferromagnéticas na ordem dos 10 nm, numa emulsão de óleo-água. Os provetes utilizados tinham dimensão de 21x2,5x1 cm, com defeitos cilíndricos e rectangulares com dimensão na ordem dos 0,5 - 5 mm e profundidade de 3 a 8 mm. Os resultados obtidos mostram que foi possível localizar e visualizar defeitos com os nano fluidos devido à mudança de cor provocada pelo campo de fuga do defeito. O menor defeito detectado com esta técnica foi de 0,5 mm de comprimento.

2.8 POTENCIAIS APLICAÇÕES DOS END UTILIZANDO CÉLULAS BACTERIANAS: BIOMATERIAIS

A utilização de metais para o fabrico de implantes tem sido cada vez mais requisitada, dado o crescente progresso da medicina nesta área. Os metais são utilizados em aplicações onde resistência mecânica e dureza são essenciais, como nas próteses ortopédicas, parafusos, próteses dentárias, entre outros [15]. O metal a utilizar numa prótese, requer um estudo adequado das consequências da sua utilização, pois o corpo humano não tolera alguns dos metais em grandes quantidades no seu sistema. Outro factor a ter em conta é a corrosão do metal, que estará sujeito a ambientes com bactérias, processo designado por biocorrosão. A corrosão de um material

implica o seu enfraquecimento estrutural, podendo levar ao colapso do componente, bem como a deterioração do material pode criar efeitos indesejáveis nos tecidos [16]. Alguns metais com particular interesse neste trabalho são os biomateriais, onde se incluem o titânio Ti6AL4V, liga de magnésio AZ31 e o NiTi.

2.8.1 TITÂNIO

Os primeiros implantes fabricados em titânio remontam à década 30 do século XX. Atendendo à sua leveza comparável com o aço inox 316, $4,5 \text{ g/cm}^3$ e $7,9 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, aliadas às boas propriedades mecânicas e químicas tornaram o titânio num material utilizado por exemplo na área biomédica, com uma cota de utilização de 50% para o Ti-6Al-4V, tornando-se numa liga standard na área [16].

2.8.2 MAGNÉSIO

A aplicação de magnésio ou ligas de magnésio na área da biomédica tem sido recorrente desde o início do século XX, mas teve um período de menor desenvolvimento quando não foram encontradas soluções para o problema da corrosão [17]. Um dos grandes interesses do uso do magnésio ou das suas ligas prende-se com o facto de ser necessário usar implantes em metal biodegradável, o que poderia evitar uma segunda cirurgia para remover o implante, minimizando custos médicos e trauma no paciente [15]. O magnésio encontra-se na classe de materiais mais reactivos e, por isso, novas ligas comerciais foram desenvolvidas de modo a tornar a liga de magnésio menos reactiva [15].

Relativamente à biocorrosão do magnésio, esta ocorre quando a concentração de OH^- na superfície aumenta até um certo nível, resultando na formação de uma camada à superfície de precipitados, devido aos fosfatos contidos no Cálcio e Magnésio [15].

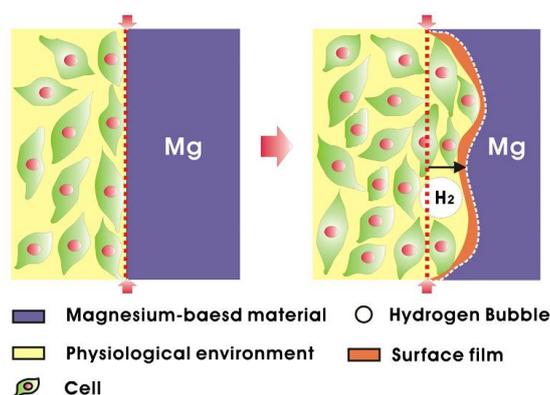


Figura 2.2 – Interface dinâmica entre o magnésio e o ambiente biológico durante a degradação [15].

Conclui-se que a taxa de biocorrosão, na maioria das ligas de magnésio, é mais elevada nos primeiros estágios da corrosão. Esta dinâmica é diferente em comparação com aço inoxidável ou ligas de titânio no mesmo ambiente [15].

2.8.3 NiTi

A liga NiTi tem um importante papel na biomédica para aplicações *in-vivo*, tendo como principais características a memória de forma e super-elasticidade. A liga tem a capacidade de reverter de uma situação em que sofreu uma deformação plástica, regressando à sua forma inicial após ser aquecido, sendo que este efeito ocorre apenas se a deformação plástica não ultrapassar a temperatura de transformação. O NiTi é usado em várias situações, como fio dentário para aparelhos dentários, stents vasculares, clips para aneurismas intracranianos e implantes ortopédicos [17].

2.9 EFEITO ANTI-BACTERIANO DO COBRE

O conhecimento da interação entre diferentes tipos de material e as bactérias é determinante para a fase de adesão das bactérias à superfície do material [18]. Alguns dos materiais têm propriedades anti-bacterianas, por exemplo o cobre.

A utilização do cobre remonta ao império romano, onde o cobre era utilizado para o fabrico de utensílios culinários e usado no sistema de abastecimento de água potável. Na época, o uso do cobre devia-se ao conhecimento do efeito de melhoria da saúde pública, mas desconhecia-se que a melhoria resultava do efeito anti-bacteriano do cobre [19].

Estudos recentes apontam para a diminuição e extinção de bactérias quando em contacto com uma superfície de cobre seco à temperatura ambiente. Então, o uso de cobre em hospitais em alternativa ao aço inox seria uma vantagem na contenção da transmissão de infecções e doenças [20].

Num estudo realizado na Universidade de Southampton em 2006, J.O. Noyce *et al.*[20] compararam o efeito antibacteriano de três materiais: aço inox, bronze e cobre. É utilizado a bactéria Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) e duas formas de epidemia, EMRSA-1 e EMRSA-16. Os investigadores concluíram que existia uma extinção da bactéria MRSA após 45 minutos de contacto entre a bactéria e o cobre, ao invés do aço inox que mantinha os mesmos níveis de bactérias iniciais. O bronze apresentou igualmente um efeito antibacteriano, embora mais atenuado que o cobre como é demonstrado na Figura 2.3 [21]:

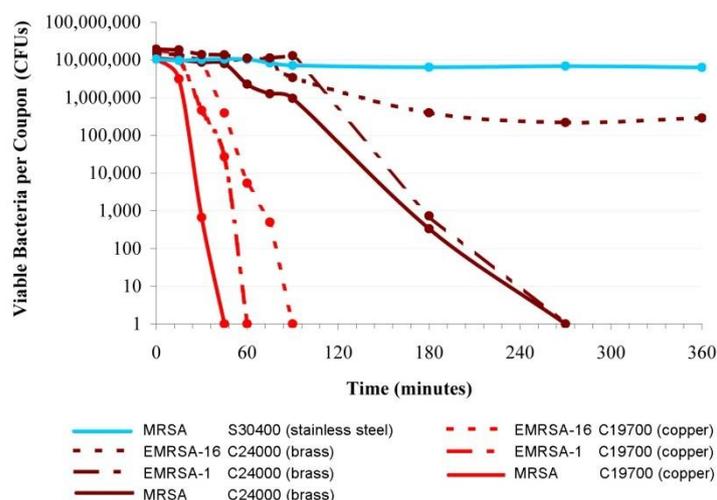


Figura 2.3 - Viabilidade da bactéria *Staphylococcus* em cobre, bronze e aço inox a temperatura ambiente.

O efeito anti-bacteriano do cobre foi confirmado no trabalho de Diogo Carvalho [3].

2.10 EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO NO CRESCIMENTO DO FILME DE CÉLULAS BACTERIANAS

Para avaliar o efeito do campo magnético em alguns tipos de bactérias, nomeadamente *Escherichia coli*, *Leclercia adecarboxylata* e *Staphylococcus aureus*, sujeitas a um campo magnético de baixa frequência durante a sua fase de crescimento, foi realizado um estudo em 2003 por Luka's Fojt, no Instituto de Biofísica da Academia de Ciências da República Checa em Brno [22]. Pretendia-se comparar se a formação de colónias aumentava ou diminuía, quando as bactérias eram sujeitas a campo magnético. Utilizou-se uma bobina com 880 espiras, diâmetro interior de 205 mm, 210 mm de comprimento e fio de 2 mm de diâmetro. O campo magnético gerado no interior da bobina foi de 10 mT.

Os autores concluíram que existe um efeito negativo do campo magnético no crescimento de colónias em todos os tipos de bactérias. A bactéria *E.coli* foi a mais afectada e a *S. Aureus* a menos. Não foi possível concluir a causa deste efeito sobre as bactérias, mas a principal teoria baseia-se na possibilidade de existir um efeito na permeabilidade dos canais iónicos, afectando o transporte de iões para as células, resultando em alterações biológicas no organismo. Por fim, outra teoria relata a possibilidade de formação de radicais livres devido a exposição ao campo magnético [22].

2.11 REVISÃO DE ALGUNS FUNDAMENTOS DO CAMPO MAGNÉTICO

Uma vez que as bactérias apresentam propriedades magnéticas, pode explorar-se esta característica de forma a promover a mobilidade e a penetração da bactéria nos defeitos. Isso pode ser realizado com a aplicação de campo magnético sobre as bactérias durante o tempo de penetração. Neste sentido, considera-se útil uma revisão de alguns conceitos básicos da física dos campos magnéticos.

2.11.1 CAMPO MAGNÉTICO PERMANENTE

Há mais de 2000 anos os gregos conheciam uma pedra (de um mineral que hoje chamamos de magnetita) que atraía pedaços de ferro. Existem também referências documentais do uso dos ímanes na navegação no século XII [23].

Um íman permanente pode ser comparado a um componente que armazena energia, por exemplo a mola, que armazena energia potencial elástica. A capacidade de armazenar energia depende do produto entre $(B \cdot H)_{\max}$. O ciclo de histerese descreve a relação entre a intensidade do campo magnético (H) com o fluxo densidade magnética (B), gerado pelo material magnético. A intensidade do campo magnético tem como unidade o Oersted ou A/m. Para o fluxo densidade magnética tem unidade T (Tesla) ou em unidades cgs Gauss, com uma relação de conversão de: $1 \text{ mT} = 10 \text{ Gauss}$. Apresenta-se na Figura 2.4 o ciclo de histerese.

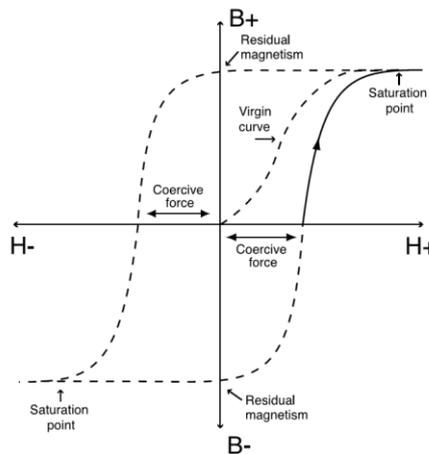


Figura 2.4 – Ciclo completo de histerese [8].

Existem duas classes de ligas magnéticas, os *hard magnets* e os *soft magnets*. Na classe dos *hard magnets*, os ímanes tem elevadas forças coercivas, enquanto para os *soft magnets* a força coerciva é mínima, mas tem elevados níveis de saturação, ou seja, enquanto os *hard magnets* tem maior capacidade de reter campo magnético, os *soft magnets* são caracterizados pela sua

incapacidade de reter campo magnético quando este é removido [24]. Os *soft magnets* são utilizados em aplicações como geradores, motores e em transformadores estáticos, devido à sua elevada intensidade de campo magnético e facilidade de maquinação, onde a diminuição do peso e tamanho são requeridos [24]. Os *hard magnets*, mais conhecidos por ímanes permanentes, tem como principal característica a capacidade de reter o campo magnético e são usados em vários componentes, como discos rígidos, microfones e altifalantes, bem como motores passo-a-passo ou motores lineares [25]. É representado da Figura 2.5 um gráfico com a evolução das intensidades do campo magnético ao longo dos anos[26].

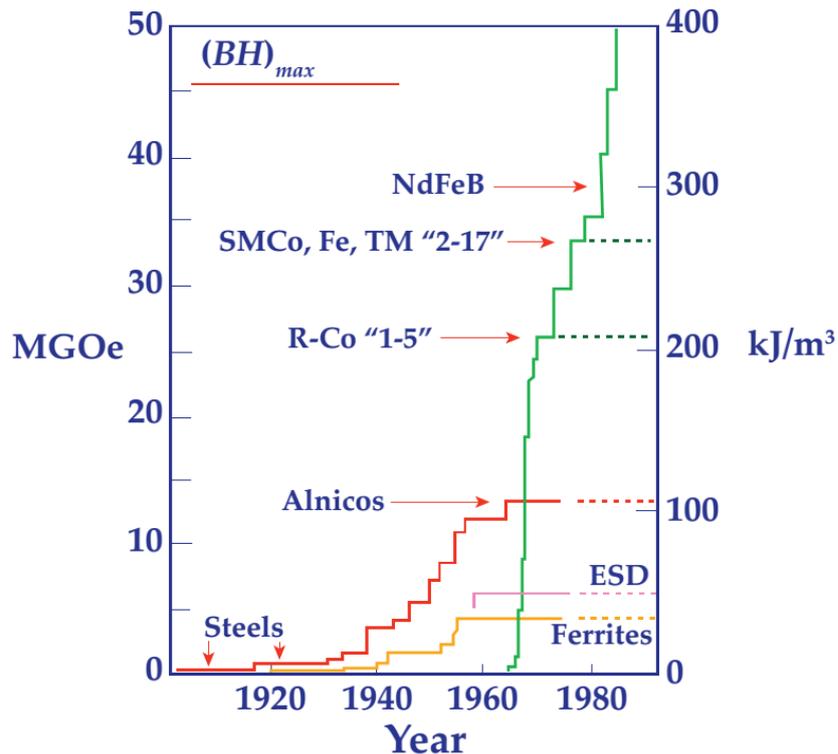


Figura 2.5 – Evolução dos ímanes permanentes no século XX [26].

As principais ligas magnéticas, com interesse para o trabalho realizado foram o alnico e NdFeB, mais conhecido por ímanes de neodímio. A liga alnico foi descoberta em 1932, quando a Universidade Tóquio revelou uma nova liga Al-Ni-Fe com força coerciva 9 vezes maior que os aços magnéticos disponíveis à data. Após maior desenvolvimento, foi adicionado cobalto à liga, mudando a designação da liga para Alnico [24]. Desde 1983, o desenvolvimento da liga de NdFeB resultou num aumento do produto de energia para 45 MGOe, o que permitiu um avanço tecnológico nos componentes referidos anteriormente [24]. As principais propriedades magnéticas são apresentadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Propriedades das ligas magnéticas alnico e NdFeB [27].

Magnetic Alloy	Magnetic properties							
	Max. Energy Product $(BH)_{\max}$		Residual Induction B_r		Coercive Force H_c		Intrinsic Coercive Force H_{cj}	
	[MGOe]	[kJ/m ³]	[Gauss]	[mT]	[oersteds]	[kA/m]	[oersteds]	[kA/m]
Alnico	5,5	43,8	12800	1280	640	51	640	51
NdFeB	42	340	13100	1310	12700	1010	15000	1190

A permeabilidade magnética μ [H/m], é uma medida do grau de magnetização de um material quando um campo magnético é aplicado, ou seja é uma relação entre a intensidade do campo magnético e a densidade fluxo magnético, como demonstrado na equação 2.1. O valor da permeabilidade magnética no vazio é de $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]. A permeabilidade magnética relativa μ_r dada pela razão entre μ e μ_0 é aproximadamente de um ($\mu_r = 1$) para materiais paramagnéticos e diamagnéticos, portanto a permeabilidade μ [H/m] é praticamente igual a μ_0 [23].

$$B_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (2.1)$$

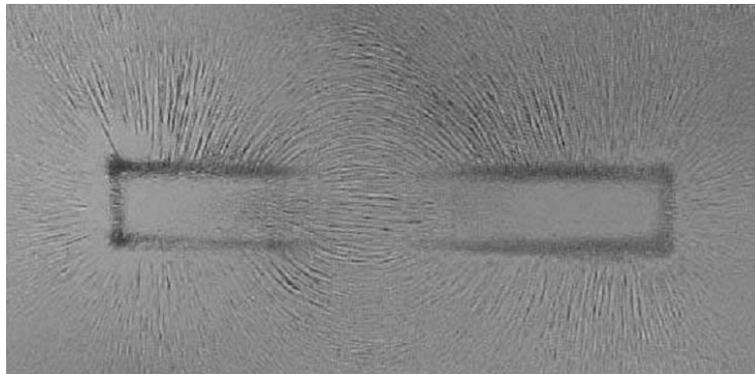


Figura 2.6 - Visualização das linhas de campo magnético [8].

2.11.2 ELECTROMAGNETISMO

Existe outra forma de criar campo magnético, sem a utilização de ímanes permanentes, nomeadamente com corrente eléctrica. O exemplo para demonstrar este fenómeno consiste na colocação de uma folha de cartão com alguns filamentos de ferro na horizontal e passar um fio eléctrico na perpendicular ao cartão, como pode ser visto na Figura 2.7. Quando uma corrente passa pelo fio, é gerado um campo magnético circular em volta do fio, que orienta os filamentos

segundo a direcção e sentido do campo magnético. Se for invertido o sentido da corrente pelo fio, as linhas do campo magnético também invertem o sentido [28].

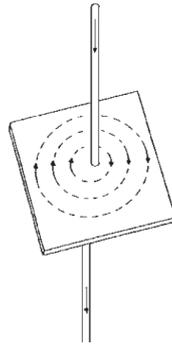


Figura 2.7 - Direcção do campo magnético criado pela passagem de corrente eléctrica no fio [28].

A equação para o campo magnético produzido por uma corrente eléctrica é obtida pela Lei de Biot-Savart. Um elemento de corrente $I \cdot \vec{ds}$ produz um campo magnético no ponto P $d\vec{B}_p$ que é perpendicular a $I \cdot \vec{ds}$ e a $gr\vec{a}d_p r$. Na Equação 2.2 apresenta-se a Lei de Biot-Savart, em que I [A] é a intensidade de corrente, μ [H/m] é a permeabilidade magnética e r [m] é a distância entre P e $I \cdot \vec{ds}$ [29]

$$d\vec{B}_p = \frac{\mu \cdot I}{4\pi r^2} (\vec{ds} \times gr\vec{a}d_p r) \quad (2.2)$$

A intensidade do campo magnético no centro de uma espira percorrida por corrente é descrita na Equação 2.3 em que B [T] é o campo magnético, μ [H/m] é a permeabilidade magnética no espaço livre, I [A] é a intensidade de corrente e r [m] é o raio da espira:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R} \quad (2.3)$$

Um solenóide é um fio enrolado em hélice, de modo a formar uma série de espiras muito juntas para produzir um campo magnético intenso e homogéneo na região delimitada pelas espiras. Considerando um solenóide de comprimento L [m] formado por N espiras percorridas por uma corrente I [A], com eixo do x alinhado com o eixo do solenóide e que $x = -a$ é a extremidade esquerda e $x = +b$ a extremidade direita, a expressão que permite calcular a intensidade do campo magnético [T] na origem é apresentada na Equação 2.4:

$$B_x = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N}{L} I \left(\frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \right) \quad (2.4)$$

Na Figura 2.8 apresentam-se as linhas de campo magnético de um solenóide.

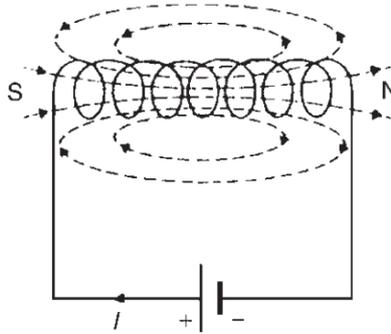


Figura 2.8 - Campo magnético de um solenóide [28].

2.11.3 FORÇA MAGNÉTICA DE TRANSLAÇÃO

A força magnética de translação exercida sobre um corpo ferromagnético pode ser calculada pela variação do gradiente da densidade de energia do campo magnético na presença de um objecto ferromagnético [30]. A força F_m [N] é obtida pela Equação 2.1, em que ∇ é o gradiente, U [J/m³] é a densidade de energia com o objecto ferromagnético, U_0 [J/m³] é a densidade de energia sem o objecto ferromagnético e V [m³] é o volume do objecto ferromagnético.

$$\vec{F}_{mag} = \nabla[(U - U_0)V] \quad (2.5)$$

A densidade de energia do campo magnético [U] é dada pela Equação 2.2, em que B [T] é a densidade de fluxo magnético e H [A/m] é a densidade de campo magnético

$$U = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \quad (2.6)$$

A densidade de fluxo magnético na ausência de objecto ferromagnético é:

$$B_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (2.7)$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] é a permeabilidade magnética do vazio

A densidade de fluxo magnético do objecto ferromagnético é:

$$B_0 = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (2.8)$$

Onde μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético.

O valor da permeabilidade magnética relativa depende do material e da forma do objecto, existindo grandes variações do valor dependendo da forma do objecto. Um objecto com forma cilíndrica e comprida em ferro pode ter permeabilidade relativa mil vezes maior que de uma esfera do mesmo material. Para uma esfera, o valor da permeabilidade relativa é igual a 3. Assim, substituído valores na Equação 2.1, vem que:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{mag} &= \nabla \left\{ \left[\frac{1}{2} (3\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{H}) - \frac{1}{2} (\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{H}) \right] V \right\} \\ \vec{F}_{mag} &= \nabla (\mu_0 H^2 V) = \nabla \left(\frac{V}{\mu_0} B_0^2 \right) \\ \vec{F}_{mag} &= \frac{2V}{\mu_0} B_0 \frac{dB_0}{dr} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Note-se que, de acordo com a Equação 2.5, para que uma partícula de ferro fique sujeita a uma força magnética, é necessário que a derivado do campo magnético em ordem ao espaço não seja nula.

2.11.4 EFEITO HALL

Existem vários métodos para a medição do campo magnético, baseados em diferentes tecnologias, com diferentes princípios físicos. A medição dos campos pode ser dividida em duas partes: os sensores que medem campos magnéticos de baixa intensidade ($< 1 \text{ mT}$) e os de alta intensidade ($> 1 \text{ mT}$). Ainda se podem dividir em componente vectorial ou intensidade escalar como se apresenta na Figura 2.9 [31].

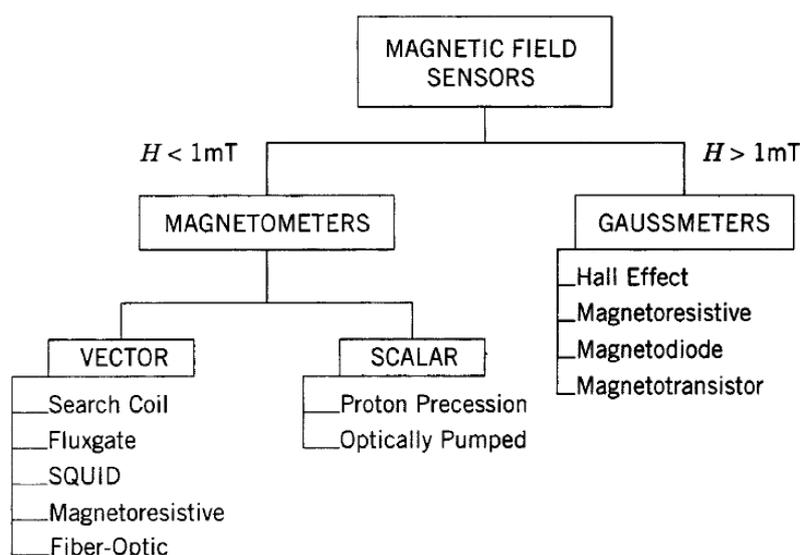


Figura 2.9 - Categorias de sensores para a medição do campo magnético.

O uso de sensores de efeito Hall é o método mais antigo e o mais comumente utilizado na medição de campos de alta intensidade, sendo especialmente útil para medição de campos magnéticos acima dos 1T. O efeito Hall foi descoberto por Edwin Hall em 1879, ficando com o seu nome associado ao método. O efeito de Hall é caracterizado por um sensor no plano XY, onde existe uma corrente e uma diferença de potencial eléctrica conhecida na direcção X, que ao ser sujeita a um campo magnético na direcção perpendicular ao plano, origina uma diferença de potencial na direcção Y, devido ao desvio da trajectória dos electrões [32]. A medição desta diferença de potencial será então a intensidade do campo, que após conversão é apresentada em Tesla ou Gauss ($1 \text{ mT} = 10 \text{ Gauss}$), unidades de intensidade do fluxo do campo magnético.

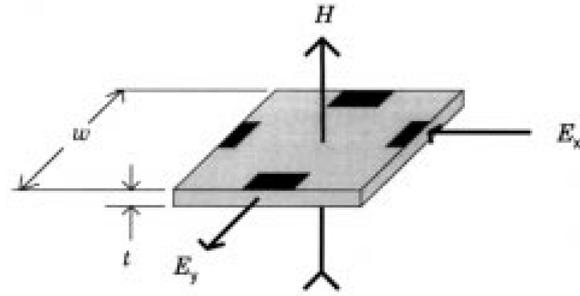


Figura 2.10 - Efeito Hall.

2.12 CAMPO ELÉCTRICO

Um campo eléctrico é um campo de força gerado por cargas eléctricas. Este campo é vectorial e a intensidade do campo é a razão entre a força eléctrica F [N] e a carga de prova q [C].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.6)$$

A força resultante \vec{F} é a combinação de vários vectores, pois as partículas interagem aos pares independentemente umas das outras. Considerando $\vec{F}_{i,j}$ a força exercida sobre a partícula i por j :

$$\vec{F}_{i,res} = \vec{F}_{i,j} + \vec{F}_{i,k} + \dots + \vec{F}_{i,n} \quad (2.7)$$

O campo eléctrico pode ser definido por linhas imaginárias tangentes, com a mesma orientação do vector campo eléctrico em cada ponto. O sentido é sempre das cargas positivas para as negativas. A densidade das linhas de campo eléctrico por unidade de área é proporcional ao módulo do campo eléctrico. Assim, nas zonas onde a densidade é maior, a intensidade do campo é maior, enquanto nas zonas com menos densidade o campo é menor.

Num campo eléctrico uniforme, todos os pontos possuem o mesmo vector campo eléctrico (intensidade, direcção e sentido). As linhas de campo são então paralelas e equidistantes umas das outras. O campo eléctrico pode ser gerado pela colocação de duas placas planas, paralelas e próximas com cargas opostas e de igual intensidade.

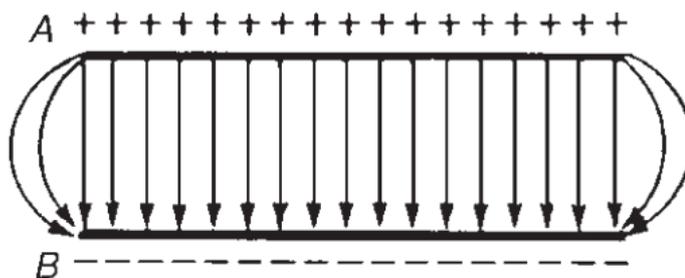


Figura 2.11 - Campo eléctrico uniforme.

A Lei de Gauss, juntamente com a Lei de Indução de Faraday, Lei de Gauss do Magnetismo e Lei de Ampère, formam as quatro equações de Maxwell que, em conjunto, com a Lei da Força de Lorentz, compõem o electromagnetismo clássico [32].

A Lei de Gauss relaciona o fluxo eléctrico que passa através de uma superfície fechada com as cargas eléctricas que se encontram à superfície. A equação é representada na forma integral por:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

A carga envolvida pela superfície gaussiana é denominada por q [C]. O fluxo que a atravessa tem uma intensidade E [V/m] uniforme e os vectores \vec{E} e \vec{A} são paralelos entre si. Deste modo, simplifica-se a equação anterior, em que q [C] é a carga eléctrica, ϵ_0 [F/m] é a permissividade eléctrica do vácuo, E [V/m] é o campo eléctrico e A [m²] corresponde à área:

$$q = \epsilon_0 \cdot E \cdot A \quad (2.9)$$

A diferença de potencial entre as duas placas do condensador é dada por:

$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.10)$$

Se o percurso da linha de campo eléctrico for da placa negativa para a positiva, os vectores \vec{E} e $d\vec{s}$ têm a mesma direcção, embora com sentidos opostos. Assim, a equação pode ser representada por:

$$\Delta V = - \int_{-}^{+} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.11)$$

Resolvendo o integral da Equação 2.11, obtém-se a Equação 2.12, em que E [V/m] é o campo eléctrico, ΔV [V] é a diferença de potencial e d [m] corresponde à distância entre as placas.

$$V = E \int_{-}^{+} ds = E \cdot d \Leftrightarrow E = \frac{V}{d} \quad (2.12)$$

2.12.1 POTENCIAL DO CAMPO ELÉCTRICO

No caso do condensador de placas planas paralelas é possível desenhar as linhas de campo para obter a intensidade do campo num ponto. Considerando as placas A e B, em que A tem potencial positivo V^+ e B potencial negativo V^- , um campo eléctrico é gerado entre as placas, no qual a sua intensidade depende da diferença de potencial entre as placas, bem como a distância entre elas. A diferença de potencial entre as placas varia linearmente de uma placa para outra. As linhas equipotenciais são linhas que unem pontos de igual potencial conforme-se representa na Figura 2.12 a tracejado [28].

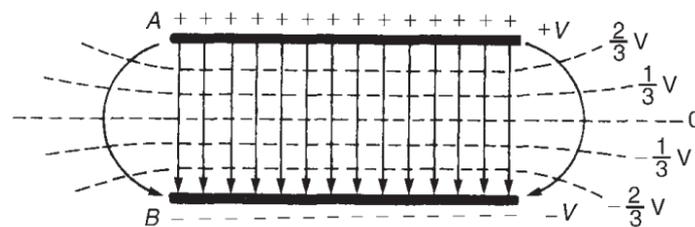


Figura 2.12 - Linhas do campo eléctrico.

2.12.2 SENSOR CAMPO ELÉCTRICO

O campo eléctrico atmosférico tem sido estudado há já alguns séculos, tendo sido criados vários equipamentos para a medição do campo eléctrico desde a terra até à altitude em estudo, para efeitos de meteorologia, inclusivamente fenómenos como trovoadas [33].

Em 2010 foi reportado por K. Joahansson *et al.* [34] estudos para aprofundar o conhecimento sobre o campo eléctrico resultante das linhas de alta tensão da rede de distribuição eléctrica. Existe um grande interesse em aumentar o nível de voltagem da rede, uma vez que deste modo é possível reduzir o número de linhas de distribuição para cidades [34].

O primeiro aparelho construído e o mais frequentemente empregue é o *field mill*, apresentado na Figura 2.13 [8].

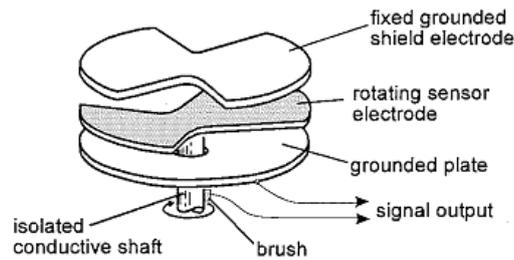


Figura 2.13 - *Field mill* [33].

O campo eléctrico induz uma carga na superfície superior do dispositivo. Com a rotação do sensor, a carga presente na superfície superior do dispositivo é exposta alternadamente, gerando uma corrente alternada entre o sensor e o *ground* que pode ser medida. A intensidade da corrente pode ser relacionada com a carga, que por sua vez está relacionada com o campo eléctrico ou com a velocidade de rotação do sensor. Com este método não é possível obter a direcção do campo, porque mede apenas a componente normal ao dispositivo.

No artigo de K. Joahansson *et al.* [34] é referido a construção de uma sonda com 20 mm de diâmetro e capacidade de medir campos até 2×10^3 V/mm, detectando campos a partir dos 10 V/mm. A precisão do dispositivo deve atingir os 5% com campos eléctricos na ordem dos 500 V/mm. Na Figura 2.14 apresenta-se o aparato laboratorial do ensaio e a sonda de campo eléctrico.

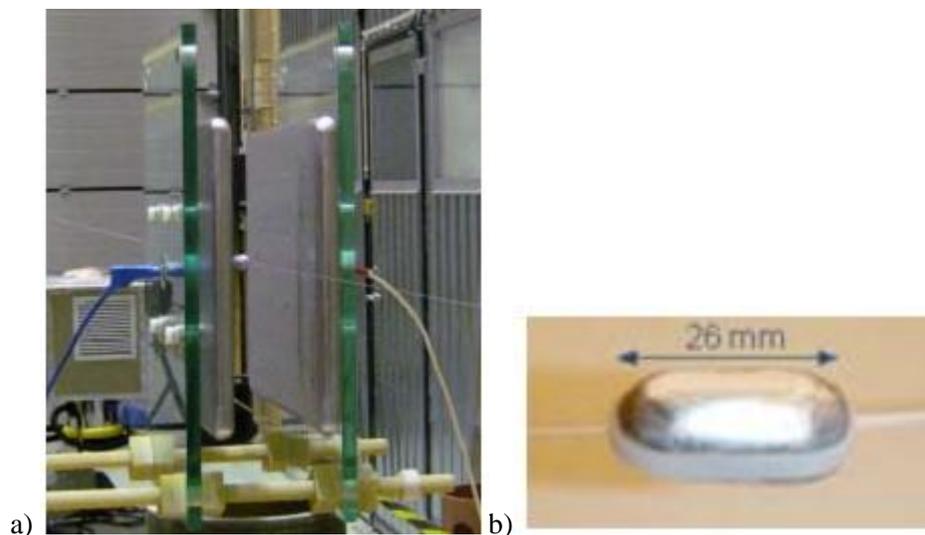


Figura 2.14 - Sonda campo eléctrico: a) Aparato laboratorial do ensaio b) Vista de pormenor da sonda de campo eléctrico.

Este dispositivo foi usado em testes com campo eléctrico estático, gerado por duas placas planas paralelas, para aumentar o conhecimento da intensidade do campo no espaço. Apesar do

equipamento ter validado os pressupostos, foi considerado como protótipo, precisando de melhorias no que se refere à robustez e facilidade de operação.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

No capítulo 3 descreve-se o desenvolvimento e produção de novo equipamento dedicado aos END utilizando células bacterianas. Foram produzidos dois novos equipamentos: um baseado em solenóides (§ 3.2) e outro baseado em ímanes permanentes (§ 3.3). Alterou-se o equipamento para remoção das bactérias (§ 3.4). Realizou-se a instrumentação (§ 3.5) e caracterização dos campos magnéticos nos diferentes equipamentos dedicados (§ 3.6).

3.2 DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DEDICADO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO TRIAXIAL

3.2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS

O principal objectivo da concepção de um equipamento dedicado para o END com células bacterianas é promover o movimento das bactérias durante a fase de penetração nos defeitos da peça a inspeccionar.

No trabalho realizado por Bruno Mateus [2] foram produzidos vários equipamentos para criação de campo eléctrico horizontal e vertical, campo magnético com rotação num plano e campo magnético vertical e horizontal. Com o aprofundamento da técnica e a necessidade de explorar melhor o seu potencial, definiu-se uma nova variante com um campo magnético triaxial.

Como um dos pilares do desenvolvimento desta nova técnica passa por criar equipamento de “inspecção no campo”, isto significa que não se pretende criar uma técnica muito complexa, que só possa ser aplicada em ambiente laboratorial. A mobilidade e facilidade de utilização são requisitos importantes. Pretende-se que haja compatibilidade de *software* entre os diferentes equipamentos existentes e os futuros, daí que todos os equipamentos devem partilhar a mesma base de programação e equipamento de aplicação de corrente. Apresenta-se na Tabela 3.1 os principais requisitos funcionais que o equipamento dedicado para o END utilizando células bacterianas deve apresentar.

Tabela 3.1 - Requisitos equipamento dedicado campo magnético triaxial.

	Requisitos	Comentário
1	Aplicação de campo magnético triaxial no provete	Ao aplicar campo magnético triaxial é possível promover a mobilidade e a penetração das células bacterianas no defeito em simultâneo
2	Variação da intensidade, frequência e tempo de exposição do provete ao campo.	Variando os parâmetros de excitação do campo é possível otimizar as condições de mobilidade para cada provete e bactéria
3	Fixação do provete de forma rápida e expedita	O provete deve ser facilmente fixo, independentemente do seu material, forma e dimensão.
4	Garantir a portabilidade do equipamento	Para aumentar as potencialidades do método em relação a outras técnicas de visualização, como o microscópio, as dimensões e o peso devem ser baixos.
5	Automatização do processo de inspecção	O equipamento deve ser accionado e movimentado por computador, de forma a garantir a reprodutibilidade dos ensaios.
6	Compatibilidade de <i>hardware</i> de aplicação de corrente	A excitação do novo equipamento dedicado deve utilizar o <i>hardware</i> de aplicação de corrente dos equipamentos dedicados anteriormente desenvolvidos
7	Equipamento com baixo custo	O equipamento deve apresentar soluções fáceis para a produção e manutenção do mesmo nas oficinas da Faculdade

3.2.2 CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO

Para criar um campo magnético triaxial pode gerar-se um campo magnético com rotação num plano e fazer esse mesmo plano rodar. O campo magnético num plano é conseguido com a utilização de um estator de um motor passo-a-passo que, ao ser excitado como em funcionamento normal, cria diferentes direcções do campo magnético no plano do estator. Acoplado o estator a um veio é possível impor rotação ao plano onde é produzido o campo magnético. Desta forma são criados dois parâmetros importantes: a velocidade de rotação mecânica do estator do motor e a frequência do campo magnético produzido pelo estator, que é dependente da sua frequência de excitação. Estes parâmetros são controlados através da interface criada em LabviewTM.

Para que o conceito descrito anteriormente funcione, é necessário criar um suporte para a colocação dos provetes no centro do estator, mas este tem de estar desacoplado da rotação imposta ao estator para que não rode com o movimento do estator. Para isso é indispensável que o suporte tenha os seus apoios perfeitamente alinhados com o eixo de rotação do estator e com grau de liberdade nesse mesmo eixo.

Devido ao movimento de rotação do veio, a alimentação eléctrica do estator constitui uma dificuldade acrescida ao mecanismo. Os fios necessitam de ter grau de liberdade para rotação no eixo do veio e, para que isso seja viável, é preciso usar um sistema casquilho-escova. Este sistema cria uma área de contacto que transmite a corrente eléctrica e permite, simultaneamente, a rotação do eixo do veio.

3.2.3 PROPOSTA DE EQUIPAMENTO DEDICADO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO TRIAXIAL

O equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial foi desenhado em *software* de modelação (*SOLIDWORKS*TM), permitindo um acompanhamento visual durante a sua concepção, identificando-se possíveis problemas de funcionamento.

A solução do equipamento encontrada para o equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial é ilustrado na Figura 3.1. Nesta figura, é possível identificar os elementos chave deste mecanismo. O estator do motor passo-a-passo encontra-se embutido num suporte em acrílico rectangular que está unido a um veio. O suporte do provete está apoiado na tampa do estator, em acrílico, que ocupa o espaço físico do rotor do motor passo-a-passo e encontra-se acoplado ao estator através de um elástico. Geraram-se várias soluções para o sistema de fixação do suporte do estator à tampa do estator, como, por exemplo, o uso de ligação aparafusada, mas foi escolhido um sistema com elástico, por ser considerada a solução mais flexível e prática para a remoção do provete de forma rápida e precisa.

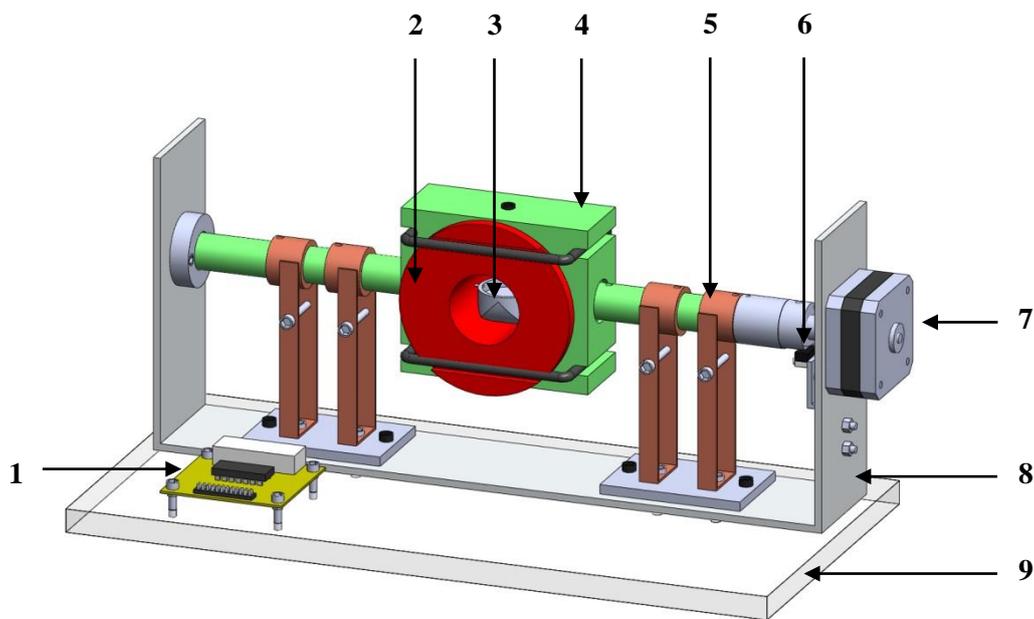


Figura 3.1 - Modelação triaxial em SOLIDWORKS™ do equipamento para aplicação de campo magnético triaxial.

Legenda: 1- Chip L293, 2 - Tampa do estator, 3 - Suporte do provete, 4 - Suporte do estator, 5 - Sistema transmissão corrente eléctrica, 6 – Fim de curso, 7- Motor passo-a-passo, 8 – Chassis do equipamento, 9 - Base de suporte do equipamento.

Para a alimentação eléctrica do estator do motor passo-a-passo foram usados casquilhos em cobre, sujeitos a uma pressão exercida por umas patilhas no mesmo material, de forma a criar uma área de contacto suficiente e constante para a transmissão de corrente eléctrica entre os dois elementos e permitindo, concomitantemente, a rotação do veio. As patilhas precisam de manter o contacto com o casquilho para evitar a ocorrência de arco eléctrico, no entanto, não pode originar demasiado atrito que condicione a rotação do veio. Foi utilizada uma ligação aparafusada para a regulação da força exercida sobre o casquilho. Todos os subconjuntos do mecanismo foram montados num chassis em alumínio obtido através de chapa quinada, sendo este aparafusado a uma base de suporte em acrílico.

As cotas de atravancamento do equipamento são 300 mm de comprimento, 150 mm de largura e 140 mm de altura, cumprindo assim o requisito de mobilidade. Na Figura 3.2 é ilustrado o mecanismo após a sua produção.

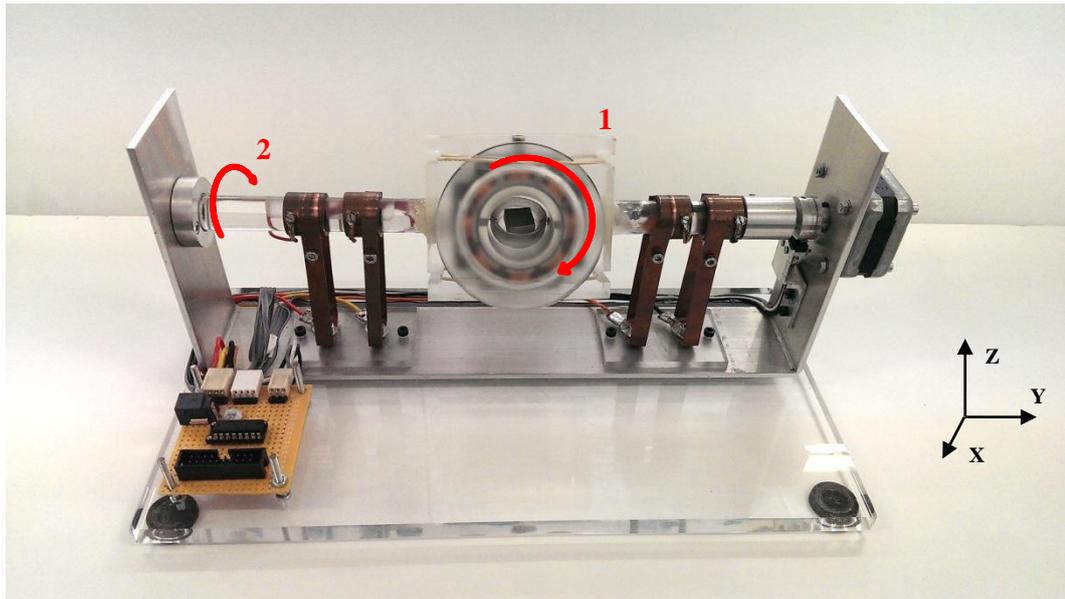


Figura 3.2 - Equipamento para aplicação de campo magnético triaxial.

1 – Rotação eléctrica do campo magnético no plano do estator, 2 – Rotação mecânica do plano de estator do eixo Y.

Para visualizar qualitativamente o efeito no campo magnético da escolha das frequências de rotação mecânica e da rotação electrónica foi necessário obter as equações paramétricas do percurso de um ponto no plano do estator.

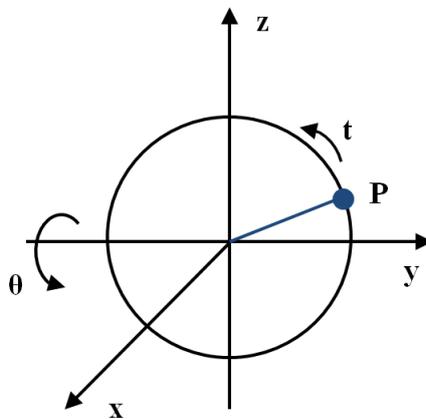


Figura 3.3 - Referencial assumido para caracterizar o movimento do ponto P.

No Plano YZ, o movimento do ponto P em função do tempo é dado pela Equação paramétrica 3.1.

$$P_{.xyz}(x, y, z) = P_{.xyz}(0, \cos(t), \sin(t)) \quad (3.1)$$

Dado que o plano YZ roda em torno do eixo Y é necessário utilizar a equação da rotação em torno deste eixo (Equação 3.2).

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(t) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Conseqüentemente, o resultado no espaço é dado pelo produto interno da Equação 3.1 e 3.2.

$$P_{\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}} = \begin{bmatrix} \cos(t) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(t) \end{bmatrix} \cdot [0 \quad \cos(t) \quad \sin(t)]^T \Leftrightarrow$$

$$P_{\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}} = \begin{Bmatrix} \sin(\theta) \cdot \sin(t) \\ 1 \cdot \cos(t) \\ \cos(\theta) \cdot \sin(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Conhecendo as equações paramétricas que definem o percurso do ponto P foi possível desenhar os gráficos apresentados nas Figuras 3.4 a 3.7, alterando os parâmetros para a rotação mecânica e rotação electrónica.

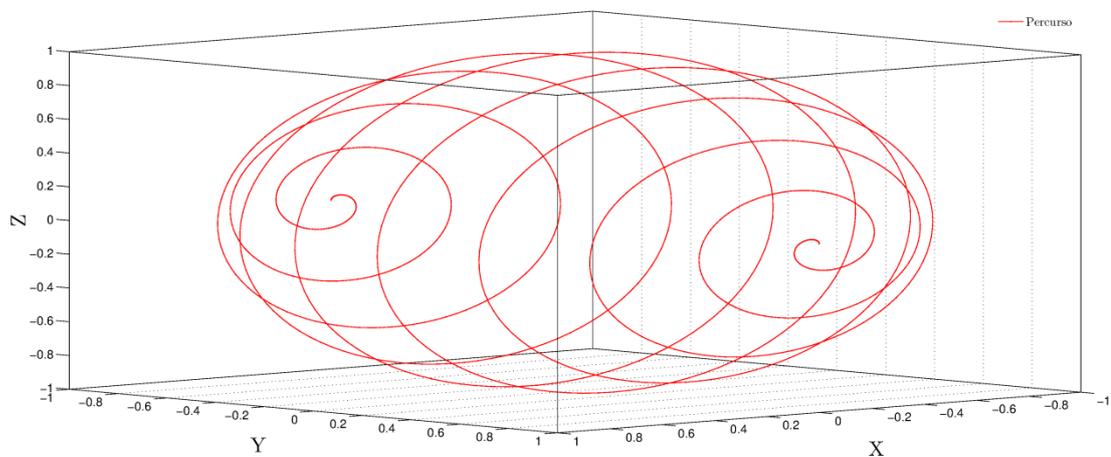


Figura 3.3 - Percurso do ponto P para vinte rotações mecânicas e uma rotação electrónica.

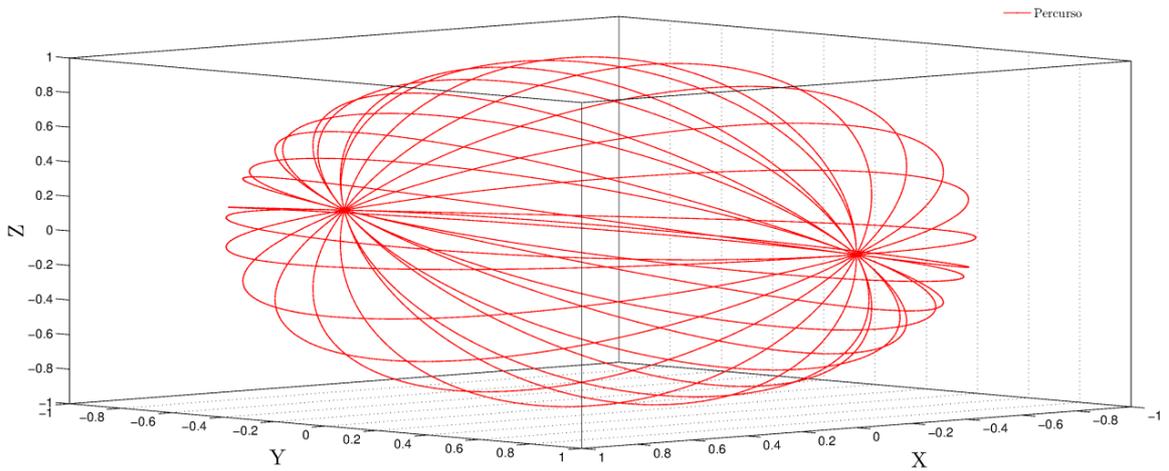


Figura 3.4 – Percurso do ponto P para uma rotação mecânica e vinte rotações electrónicas.

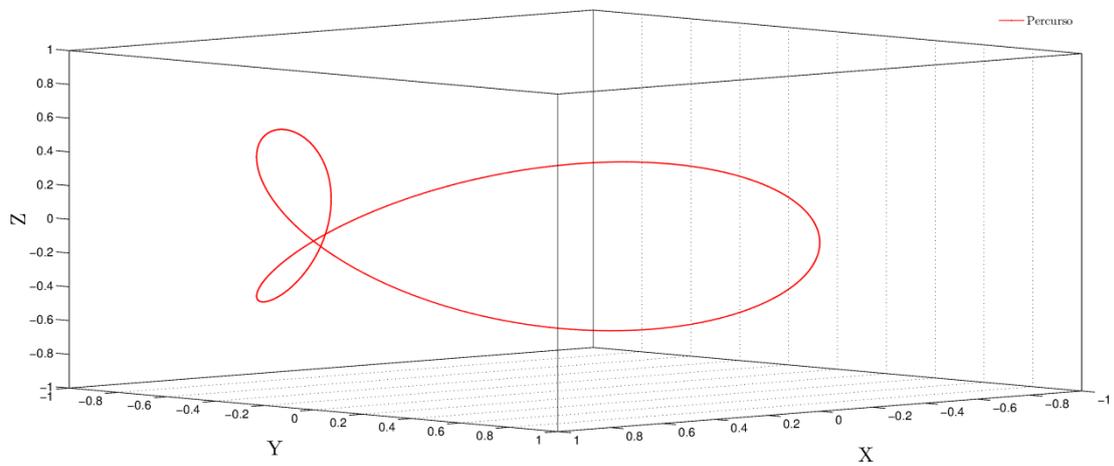


Figura 3.5 - Percurso do ponto P para uma rotação mecânica e uma rotação electrónica.

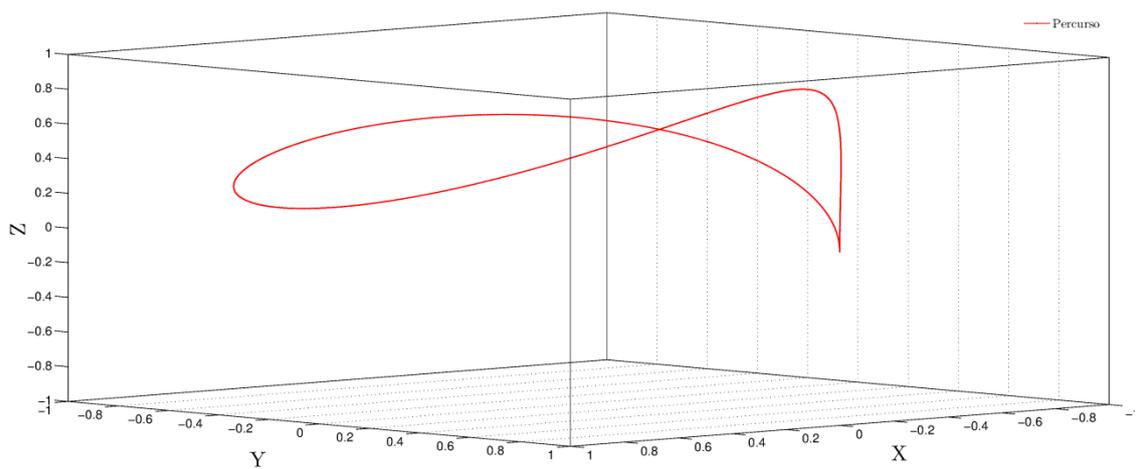


Figura 3.6 - Percurso do ponto P para meia rotação mecânica e uma rotação electrónica.

Com o conhecimento do percurso de um ponto P num plano com rotação, conclui-se que a escolha das frequências para a rotação mecânica e electrónica é determinante para o resultado final.

3.2.4 AUTOMAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A automação do equipamento foi desenvolvida em Labview™, que proporciona a criação de um painel de instrumentos onde estão localizados os botões para a interação com o equipamento, bem como os ajustes dos parâmetros para cada ensaio. O programa desenvolvido para o controlo do movimento tem como objectivo o controlo de parâmetros, como a rotação do mecanismo, o número de voltas, tempo de cada volta e a frequência do campo magnético. O equipamento está equipado com um fim do curso, o que permite criar um “home”, isto é, definir uma posição inicial. Se necessário, é possível criar um campo magnético sem rotação, o que possibilita ao utilizador escolher o plano no qual deseja que o campo magnético seja criado.

Este equipamento substitui o equipamento automatizado com rotação de campo magnético no plano horizontal e vertical criado por Bruno Mateus [2]. Para tal, existe um modo de funcionamento que permite a alternância do campo magnético no plano horizontal e vertical de forma mais rápida, reduzindo o tempo no qual o provete não está sujeito a campo magnético. A interface do programa com o utilizador foi criada de forma a ser de fácil utilização e intuitiva, como é ilustrado na Figura 3.8.

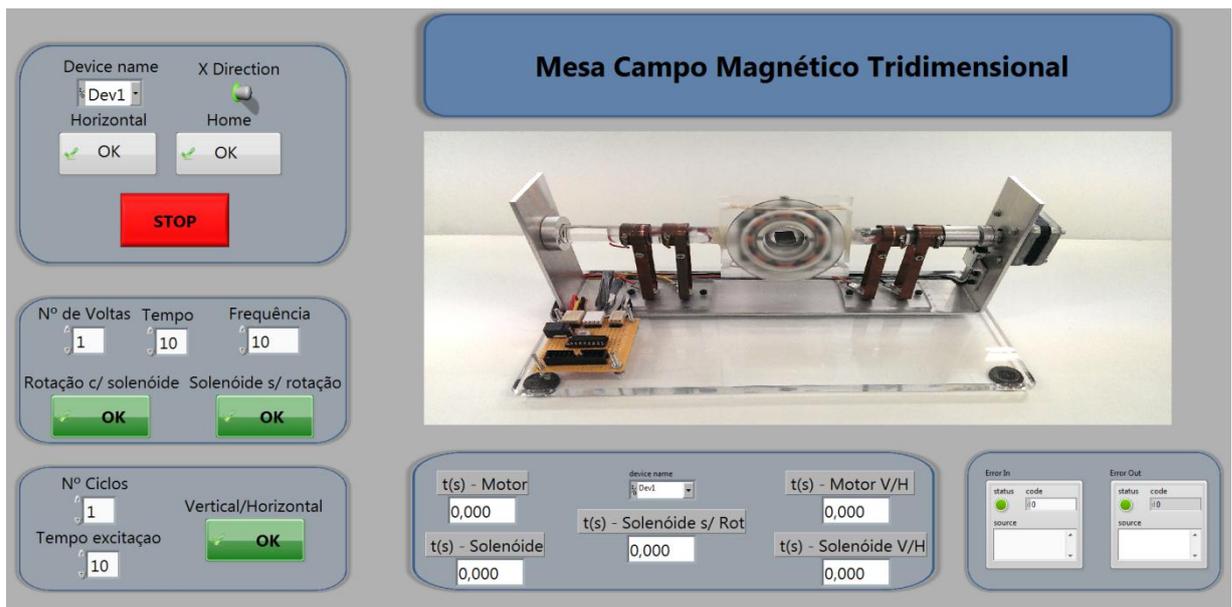


Figura 3.7 – Interface gráfica Labview™ para equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial.

3.3 DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DEDICADO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PERMANENTE TRIAXIAL

3.3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS REQUISITOS FUNCIONAIS

Até à data, o campo magnético criado para promover o movimento das bactérias foi gerado por estatores de motores passo-a-passo ou solenóides, gerando-se assim o campo magnético variável no tempo. No âmbito do presente trabalho, a intensidade dos campos magnéticos criados por esses equipamentos revelou-se baixa para a mobilidade das bactérias (< 400 Gauss tipicamente), tendo sido equacionado o uso de ímanes permanentes, a fim de aumentar a intensidade do campo. Esta necessidade levou ao projecto de um novo equipamento para colmatar o problema da intensidade do campo magnético.

Como requisito inicial e comum aos outros equipamentos já produzidos, era requerida a criação de um equipamento leve, portátil, de fácil utilização e de baixo custo. Pretende-se criar campo magnético horizontal e vertical, com a possibilidade de alterar as intensidades dos campos, afastando ou aproximando os ímanes do provete a ensaiar, bem como a possibilidade de criar campo magnético horizontal e vertical em simultâneo ou em separado. Novamente, é fundamental criar uma interface simples e intuitiva.

Resumindo, os requisitos pretendidos para o equipamento são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Requisitos equipamento dedicado campo magnético permanente.

Requisitos		Comentário
1	Aplicar campo magnético triaxial mais intenso no provete	Com a utilização de ímanes permanentes de neodímio no plano horizontal e vertical é possível aumentar entre 10x a 20x a intensidade máxima do campo magnético.
2	Varição do campo magnético em função do tempo.	Impondo movimento de rotação ao provete ou ao íman é possível variar a intensidade do campo em função do tempo.
3	Variar a intensidade e o tempo de exposição do provete ao campo.	Variando a distância entre o íman e o provete, a intensidade do campo aumenta ou diminui.
4	Fixação do provete de forma rápida e expedita	O provete deve de ser fixo facilmente, independentemente do seu material, forma e dimensão.
5	Garantir a portabilidade do equipamento	Para aumentar as potencialidades do método em relação a outras técnicas de visualização, como o microscópio, as dimensões e o peso devem ser baixos.
6	Automatização do processo de inspeção	O equipamento deve de ser accionado e movimentado por computador, por forma a garantir a repetibilidade dos ensaios.
7	Equipamento com baixo custo	O equipamento deve apresentar soluções fáceis para produção e manutenção do mesmo nas oficinas da faculdade.

3.3.2 CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO

Como este tipo de campo magnético é estático, é necessário criar movimento relativo entre os ímanes e as células bacterianas, para que haja uma interacção dinâmica entre os campos e as bactérias.

Uma abordagem ao problema consiste na utilização de um motor que faça o provete rodar, enquanto dois ímanes são fixos de modo que um campo magnético seja criado no plano horizontal, promovendo a mobilidade na face do provete. Um segundo motor, com um dos ímanes acoplado ao veio, pode ser utilizado para criar um campo magnético vertical, promovendo a penetração das bactérias nos defeitos. A utilização de motores passo-a-passo permite um maior controlo de posição, o que é desejável para a programação de vários tipos de movimento.

3.3.3 PROPOSTA DE EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PERMANENTE TRIAXIAL

Para o fabrico do equipamento foi utilizado perfil *Bosch Rexroth*® em alumínio, que garante leveza, baixo custo e facilidade de montagem, visto que este sistema permite a ligação entre perfis por ligação aparafusada, ou seja, reversível, o que possibilita a realização de vários ajustes até ser encontrada a afinação final.

Foram utilizados 2 motores passo-a-passo unipolares por forma a obter maior controlo do movimento, dado que com este tipo de motor é possível controlar o ângulo de rotação, não comprometendo a velocidade e binário do motor para este tipo de aplicação.

Outro elemento construtivo utilizado foi o uso de parafusos com cabeça de aperto manual em polímero, com o objectivo de facilitar o ajuste da distância dos ímanes ao provete, não sendo necessário recorrer a nenhuma ferramenta de aperto auxiliar.

Montou-se numa caixa a electrónica necessária ao comando dos dois motores utilizando os chips ULN2008. Foi ainda introduzido um LED na caixa da electrónica, para que seja perceptível se o equipamento está ligado à fonte de alimentação que lhe fornece energia.

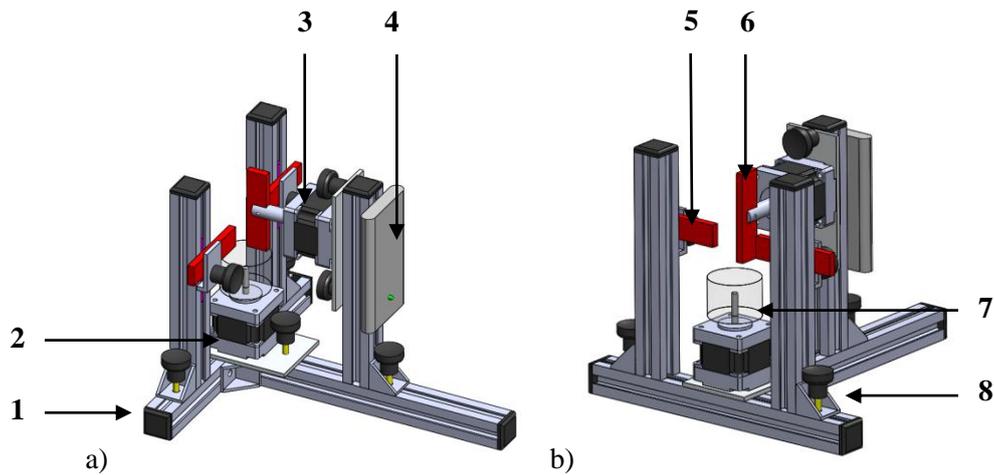


Figura 3.8 - Modelação triaxial em SOLIDWORKS™ do equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial.

Legenda: 1- Suporte dos mecanismo, 2 – Motor com rotação no eixo vertical, 3 - Motor com rotação no eixo horizontal, 4 – Caixa com electrónica, 5 – Íman horizontal, 6 – Íman vertical, 7- Suporte do provete em acrílico, 8 - Parafuso de aperto manual em polímero.

O modelo final do equipamento é apresentado na Figura 3.10.

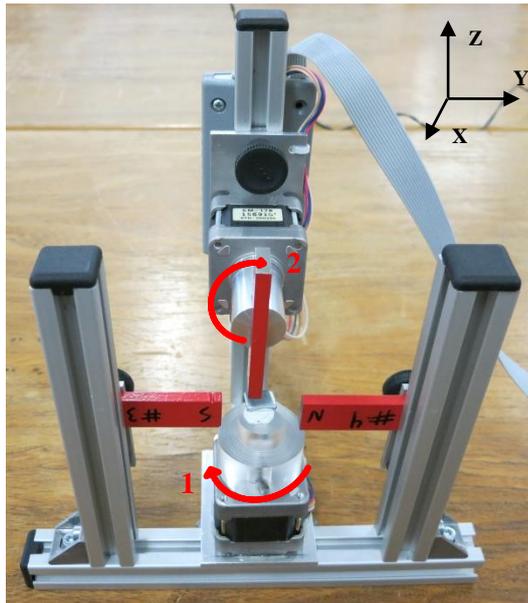


Figura 3.9 - Equipamento com aplicação campo magnético permanente triaxial.

Legenda: 1 – Rotação do provete no plano horizontal (eixo Z), 2 – Rotação do ímã no plano vertical (eixo X).

3.3.4 AUTOMAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O *software* Labview™ descrito anteriormente no ponto 3.2.4 foi utilizado para a criação do programa de automação do equipamento dedicado à aplicação de campo magnético triaxial. O programa criado está dividido em três blocos. O primeiro permite ajustar os parâmetros para o motor horizontal e no segundo bloco para o vertical, de forma independente. O terceiro bloco está configurado para transformar o movimento do motor vertical num movimento tipo pêndulo, sendo possível definir quer o ângulo de oscilação, quer a velocidade de oscilação. Para dar início ao ensaio existem quatro modos. O primeiro modo inicia o movimento do motor horizontal, onde o provete irá rodar de acordo com os parâmetros definidos. No segundo modo, é iniciado o movimento do motor vertical, que irá mover o ímã a ele acoplado. O terceiro modo combina os dois primeiros modos, havendo simultaneamente movimento nos dois motores. O quarto modo é específico ao movimento do tipo pêndulo, onde se pode optar por incluir rotação horizontal em simultâneo com o pêndulo e, neste caso, os parâmetros definidos no primeiro bloco serão também utilizados para o movimento do motor horizontal.

Foi também incluído um painel com a indicação do número de voltas e ciclos restantes, bem como um led a sinalizar o motor que está em funcionamento. Existe um campo com a pré-visualização do tempo de rotação de cada motor ou ciclo, de modo a facilitar a escolha dos parâmetros desejados. A interface desenvolvida é apresentada na Figura 3.11.



Figura 3.10 - Interface gráfica Labview™ para equipamento dedicado para aplicação de campo magnético triaxial.

3.4 MODIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA REMOÇÃO DO EXCESSO DE BACTÉRIAS COM LUZ ULTRA VIOLETA

No trabalho de Bruno Mateus [2] foi desenvolvido um equipamento para a fase de remoção do excesso para a técnica END utilizando células bacterianas. O método não deve ser intrusivo para que sejam removidas apenas as bactérias em excesso na superfície do provete, sem afectar as bactérias que penetraram e aderiram ao defeito.

O equipamento consiste numa lâmpada ultravioleta com comprimento de onda germicida (260 nm) e com o feixe de luz confinado de modo a criar uma linha de incidência no provete em ensaio. A lâmpada foi montada num suporte que permite a variação do ângulo de incidência da luz ultravioleta, variando entre um ângulo tangente à superfície até aos 45°. O equipamento desenvolvido por Bruno Mateus é apresentado na Figura 3.7:

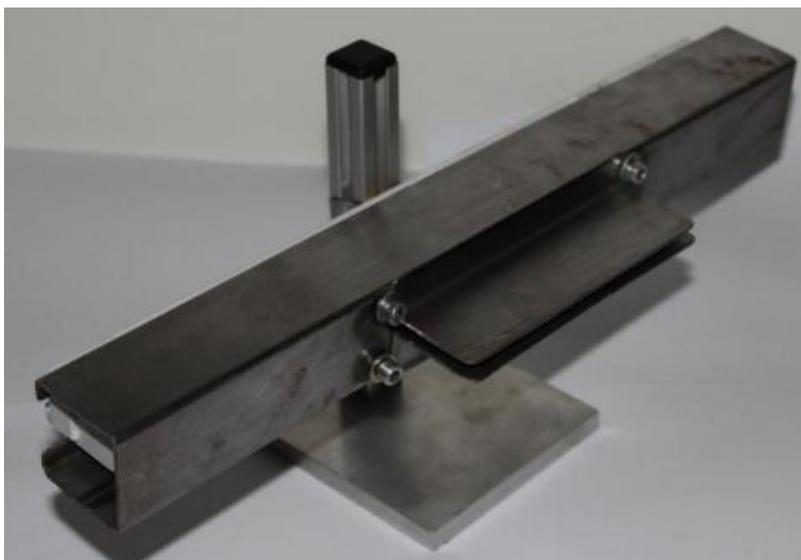


Figura 3.11 - Equipamento para remoção do excesso de bactérias com Luz ultra violeta [2].

3.4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

Durante a utilização do equipamento constatou-se que melhorias seriam possíveis por forma a resolver alguns problemas que surgiram. O primeiro problema identificado diz respeito ao modo de fixação do suporte da lâmpada ao poste, onde foi usado um adesivo como meio de ligação entre os dois componentes, o que se revelou pouco eficaz devido ao peso do suporte produzido em aço. O peso excessivo foi devido à dimensão da lâmpada existente no mercado à data do projecto, que era superior ao necessário para o tipo de aplicação pretendido.

O sistema de regulação do ângulo não garantia a precisão necessária e o ajuste do ângulo requeria uma ferramenta auxiliar de aperto, dificultando a operação.

Ocorreu também oxidação no suporte da lâmpada em aço, o qual também teria de ser resolvido a curto-prazo para não danificar o suporte.

3.4.2 SOLUÇÕES PROPOSTAS

Devido aos problemas referidos anteriormente, o equipamento foi reformulado com o objectivo de torna-lo mais prático, leve e portátil. A dimensão da lâmpada terá que ser reduzida, preferencialmente para 50% do comprimento da lâmpada actual.

A estrutura será novamente produzida em perfil *Bosch*, mas na forma de tripé, tornando a estrutura mais estável e leve. O conjunto da lâmpada deve ser ajustável em altura e no ângulo, sendo necessário um ajuste de pelo menos 90° para que seja possível direccionar o feixe de luz desde a tangente à superfície do provete (ângulo rasante) até à perpendicular da face (ângulo normal). Um motor passo-a-passo será adicionado à estrutura e irá rodar o provete durante a limpeza, resultando numa remoção mais uniforme do excesso de bactérias na superfície.

4. INSTRUMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo aborda-se a caracterização das sondas de efeito de Hall (§4.2), a adaptação das sondas de efeito Hall e ligação eléctrica (§4.3) e, por fim, a caracterização dos campos magnéticos dos equipamentos existentes (§4.6).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SONDAS DE EFEITO HALL

Para a medição do campo magnético existem no mercado vários produtos disponíveis de fácil aplicação, como sensores de efeito Hall em circuitos impressos. Este tipo de sensor é de baixo custo, fácil manuseamento e fácil interpretação de sinal, o que se adequa à criação de protótipos. Após pesquisa comercial, encontraram-se vários tipos de sensor efeito Hall com diferentes sensibilidades, intervalos de leitura e preços. Na Tabela 4.1 apresentam-se as principais características dos sensores seleccionados para a realização da sonda.

Tabela 4.1 – Tabela comparativa das propriedades dos vários sensores.

	Allegro A1322LUA -T	Honeywell SS495A	Honeywell SS496A1	Honeywell SS94A2D	Honeywell SS94A1	Honeywell SS94A1F
Sensibilidade [mV/Gauss]	3.125± 0,05	3.125± 0,05	2.50± 0,05	1.00± 0,02	5.00± 0,02	25± 0,05
Gama [Gauss]	Não definido	± 600	± 750	± 2500	± 500	± 100
V _{alimentação} [V]	5	4,5 - 10,5	4,5 - 10,5	6,6 - 12,6	6,6 - 12,6	6,6 - 12,6
V _{saída} [V]	2,50	2,50	2,50	4,0	4,0	4,0
Nº sonda de hall	-	-	1	3	2	4
Direcção implementada	-	-	X,Y e Z	X	X,Y e Z	X

Dada a existência de vários tipos de sensores, com diferentes especificidades, foi definida a criação de quatro tipos de sondas para abranger o maior leque de gamas de inspecção possível.

Os sensores SS4961 e SS94A1 foram usados para aplicações gerais, onde não é necessária muita sensibilidade, nem a medição de campos de grande intensidade. A diferença significativa entre os dois sensores são as suas dimensões físicas. Com estes dois sensores foi possível medir campo magnético em todos os equipamentos com solenóides.

Uma sonda com capacidade de medir campos magnéticos de maior intensidade é necessária para os equipamentos com ímanes permanentes, uma vez que geram campos magnéticos de maior intensidade do que os gerados por bobinas. Para o efeito foi utilizado o sensor SS94A2D.

Por fim, uma quarta sonda com o sensor SS94A1F foi utilizada para medições em que sensibilidade e precisão são exigidas, mas para campo magnético de baixa intensidade, dado que o intervalo de leitura deste sensor é sete vezes inferior aos dois sensores para uso geral. A Figura 4.1 representa graficamente a relação entre a voltagem medida e o campo magnético correspondente, para as diferentes sondas.

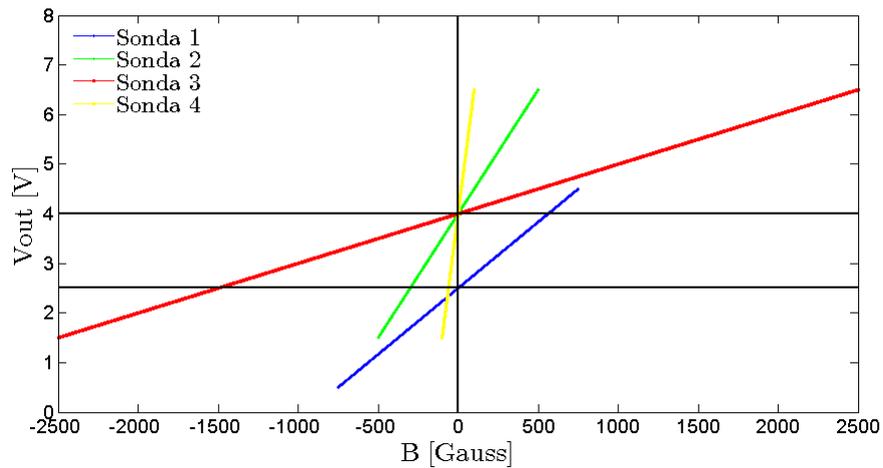


Figura 4.1 - Sinal de saída (Volts) em função do campo magnético (Gauss).

Existe uma proporcionalidade entre V e o campo B medido com diferentes declives, ou seja, a sensibilidade de cada sonda. O valor do campo magnético é calculado a partir de V , através da Equação 4.1, em que B [Gauss] é o campo magnético, $V_{saída}$ [V] corresponde a voltagem de saída, V_{zero} [V] é a voltagem para 0 Gauss e $\frac{dV}{dB}$ [V/Gauss] é a sensibilidade da sonda.

$$B = f(V) \Leftrightarrow B = \frac{V_{out} - V_{zero}}{\frac{dV}{dB}} \quad (4.1)$$

4.3 ADAPTAÇÃO DAS SONDAS DE EFEITO HALL

O processo de montagem da sonda para medição do campo magnético consistiu em fazer as respectivas ligações para a alimentação do sensor e a interpretação do sinal de saída do sensor, que, no caso dos sensores existentes, é sinal analógico.

Criaram-se dois tipos de configuração na montagem dos sensores, de forma a medir o campo magnético de duas formas. A primeira configuração, e a mais simples, consiste na utilização de apenas um sensor que poderá medir o campo em qualquer direcção, dependendo apenas da orientação pretendida para um dado ensaio.

Na segunda configuração, dispuseram-se os sensores em 3 planos perpendiculares, sendo possível medir o campo nas 3 direcções ortogonais X, Y e Z em simultâneo, obtendo-se mais informação do campo. Esta configuração tem como principal objectivo decompor o campo nas 3 direcções ortogonais, para melhor compreensão da intensidade do campo no espaço. Representam-se na Figura 4.2 as posições relativas das sondas de Hall.

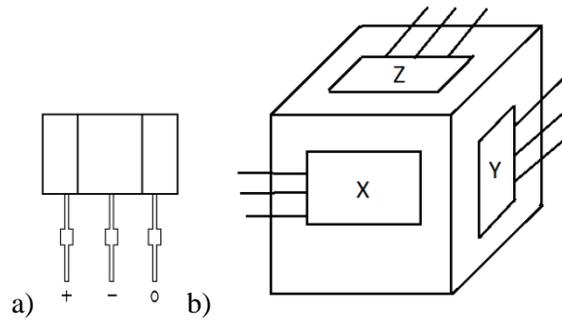


Figura 4.2 – Posição relativa das sondas de Hall: a) Configuração 1, b) Configuração 2.

Para a segunda configuração foi necessário proceder à colagem dos sensores entre eles, evitando assim a necessidade de um suporte, já que se suportam de forma estável entre eles e garantindo ainda a perpendicularidade.

Para a aquisição de dados foi utilizada a placa NI DAQ 6008-USB, que tem a capacidade de adquirir e gerar sinais analógicos e digitais. O sinal proveniente do sensor é analógico, por isso usou-se uma porta analógica para cada sinal de saída da sonda. Assim, uma sonda com um sensor necessita de uma porta analógica, enquanto uma sonda com três sensores necessita de três portas. Os esquemas de ligação dos sensores diferem apenas na posição dos pinos do sensor. Apresenta-se na Figura 4.3 o esquema de ligação dos sensores SS94A2D, SS94A1 e SS94A1F à placa NI DAQ 6008-USB.

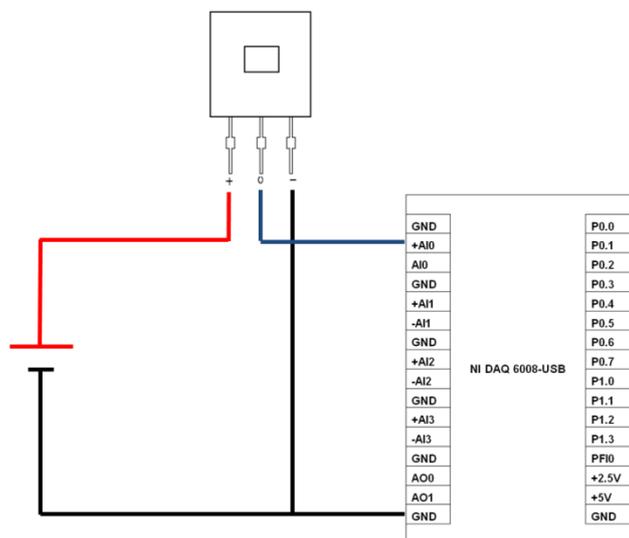


Figura 4.3 – Esquema de montagem do sensor efeito Hall.

4.4 AQUISIÇÃO, LEITURA E CONVERSÃO DO SINAL

O sinal analógico (voltagem) produzido pela sonda de Hall é adquirido pela placa NI DAQ 6008-USB, convertido para sinal digital e posteriormente o *software* permite guardar os dados em *.txt.

O sinal adquirido pela placa resulta da diferença de potencial de saída do sensor e varia consoante a intensidade do campo magnético aplicado no sensor, existindo uma variação de voltagem resultante conforme referido no ponto anterior. O programa para a leitura do sinal foi construído de forma que, ao definir-se a sonda em uso, as conversões de V_{out} (voltagem de saída) para B (campo em Gauss) são efectuadas de forma automática, não sendo necessário operações adicionais. Os dados são apresentados graficamente para cada direcção em função do tempo, para que seja possível interpretar os resultados em tempo real. O máximo, mínimo e a frequência do campo magnético em cada direcção são igualmente apresentados no momento do ensaio. Para o tratamento dos dados após o ensaio, um ficheiro *.txt é gerado com os dados, sendo ainda possível adicionar notas relativas ao ensaio, como a data, o número da sonda, o equipamento inspeccionado e informações adicionais relevantes. Na Figura 4.4 é apresentada a interface gráfica em LabviewTM.

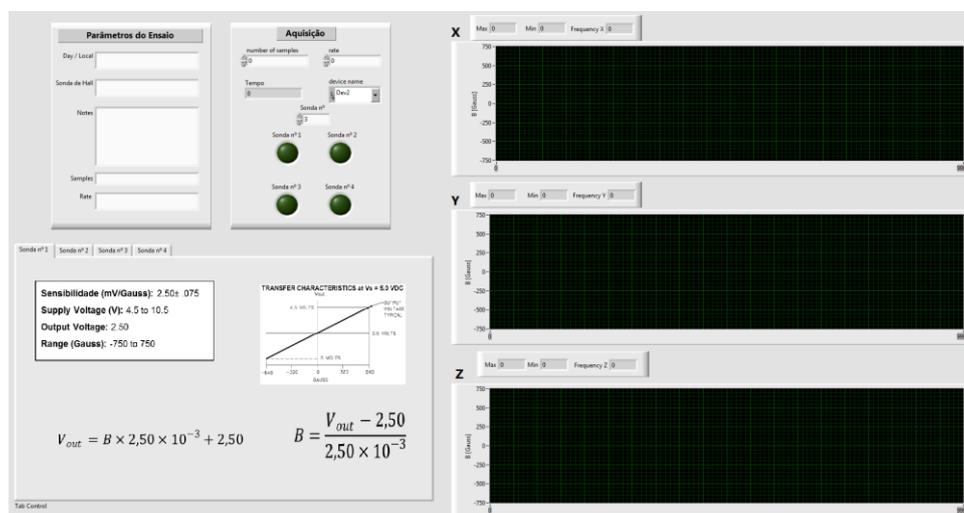


Figura 4.4 – Interface gráfica em LabviewTM.

Os dados em formato *.txt podem, posteriormente, ser apresentados graficamente conforme se mostra no ponto 4.5.1. Na Figura 4.5 são apresentadas as sondas de Hall produzidas:

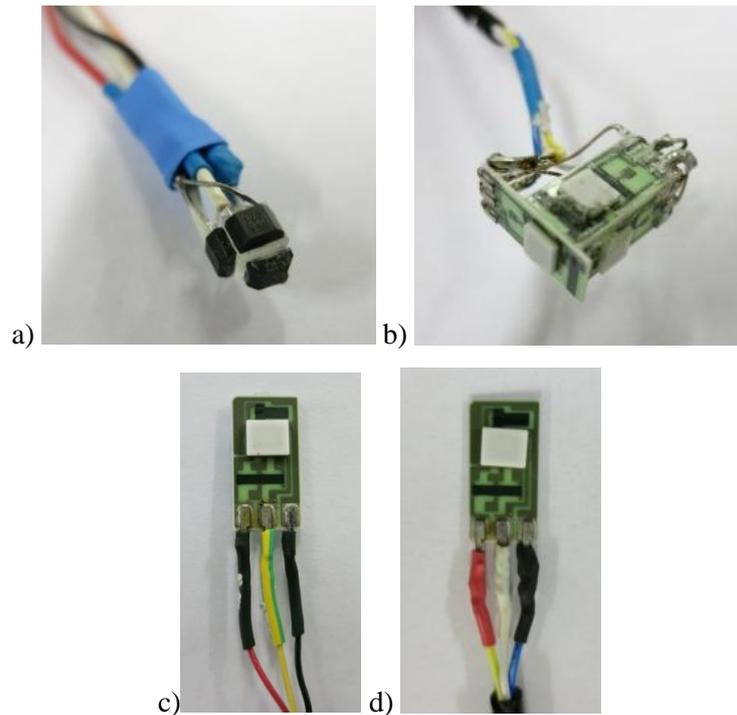


Figura 4.5 – Sondas de Hall com as ligações eléctricas e a posição relativa final: a) Sonda nº1, b) Sonda nº2, c) Sonda nº3, d) Sonda nº4.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Realizaram-se vários ensaios com vista à caracterização do campo magnético produzido pelos vários equipamentos dedicados que promovem o movimento das bactérias para a fase de penetração nos defeitos. Até ao momento, apenas existia uma percepção empírica do tipo de campo magnético gerado pelos diversos equipamentos, não havendo um conhecimento aprofundado no domínio das intensidades e direcções do campo magnético.

Para esta tarefa foram utilizadas as sondas de Hall, descritas anteriormente. Recorreu-se a ferrofluido, limalhas de ferro e filmes de visualização de campo magnético para analisar qualitativamente os campos (a descrição mais pormenorizada das técnicas encontra-se no ponto 4.6). Com esta metodologia pretende-se, não só quantificar a intensidade dos campos, mas também conhecer a sua distribuição espacial, sobretudo nas zonas de colocação dos provetes. Nos próximos pontos são apresentados os resultados para cada um dos equipamentos existentes.

4.5.1 EQUIPAMENTO COM 4 SOLENÓIDES

Este equipamento é constituído por quatro solenóides ortogonais dispostos no plano horizontal. Existem dois tipos de ligação entre os solenóides, a primeira ligação gera campos convergentes, enquanto a segunda gera campos divergentes. Para este equipamento foram testados os dois tipos de ligação num intervalo de frequências de 0,5 -100 Hz, uma vez que este intervalo inclui todas as frequências usadas nos ensaios experimentais.

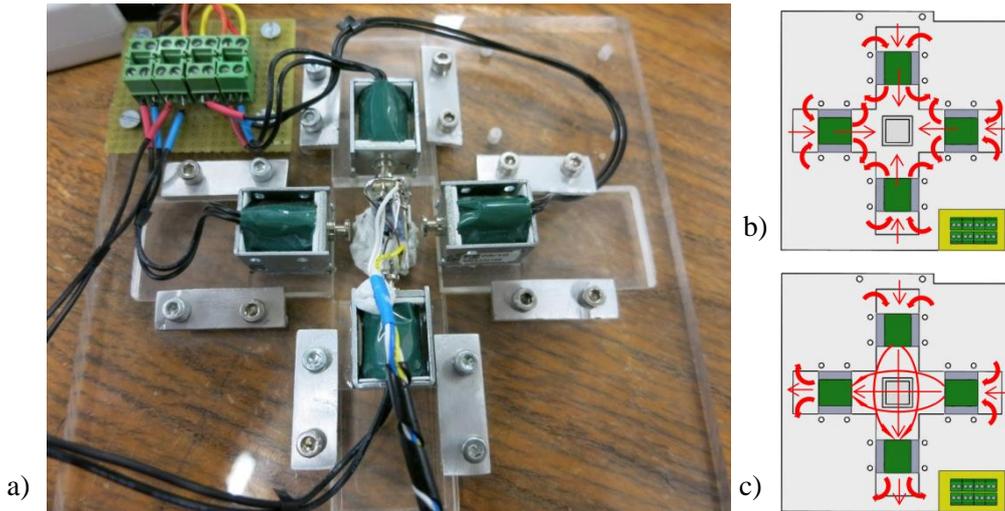


Figura 4.6 – Ensaio com sonda de Hall nº2 no equipamento com 4 solenóides – a) Foto equipamento, b) Ligação nº1 c) Ligação nº2 [2].

Utilizou-se a sonda nº 2 neste ensaio, que tem a capacidade de detectar campo magnético no intervalo de ± 500 Gauss nas três direcções X,Y e Z. As direcções assumidas são apresentadas no esquema da Figura 4.7.

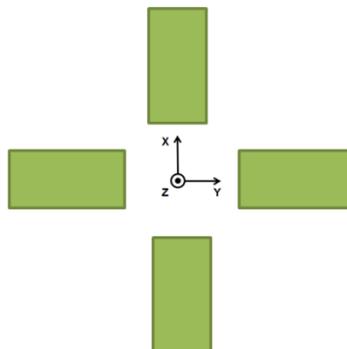


Figura 4.7 - Eixo de coordenadas do equipamento com 4 solenóides.

Os gráficos criados mostram a variação da intensidade do campo magnético em função do tempo, medido nas três direcções (X,Y e Z) com uma taxa de aquisição de 3333 *samples/s*.

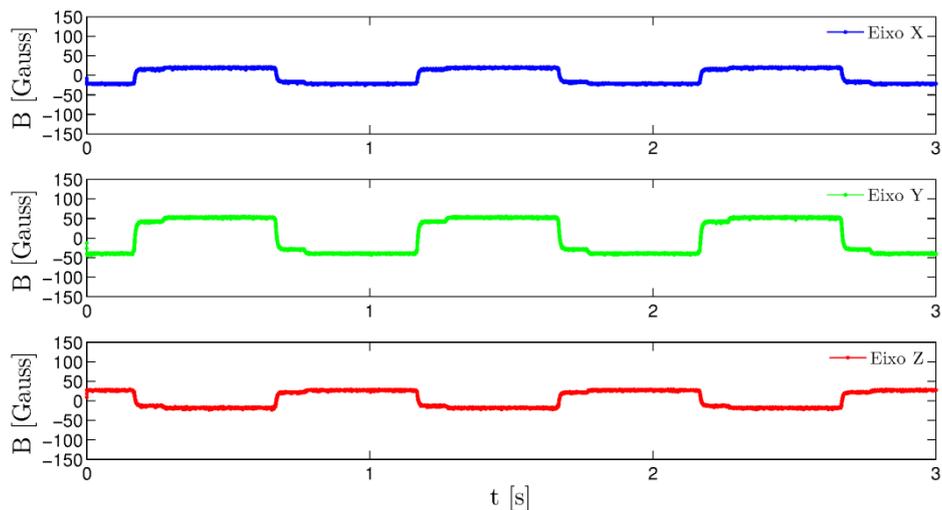


Figura 4.8 – Campo B(t) – Ligação nº 1 – 1 Hz.

A intensidade do campo magnético obtido foi baixa, com uma intensidade máxima de 56,03 Gauss para a componente Y do campo. A componente X do campo tem metade da intensidade em Y e estão em fase. A intensidade do campo magnético no eixo Z indica que o campo não se resume apenas ao plano horizontal, existindo uma componente vertical com intensidade semelhante à da componente X. A onda gerada tem forma quadrada.

Na Tabela 4.2, apresentam-se os valores máximos e mínimos do campo magnético, para cada uma das direcções referentes à ligação nº1.

Tabela 4.2 – Intensidade campo magnético para equipamento com 4 solenóides – Ligação nº 2 - 1 Hz.

	X	Y	Z
Máximo [Gauss]	21,31	56,03	31,25
Mínimo [Gauss]	-31,68	-49,99	-29,90

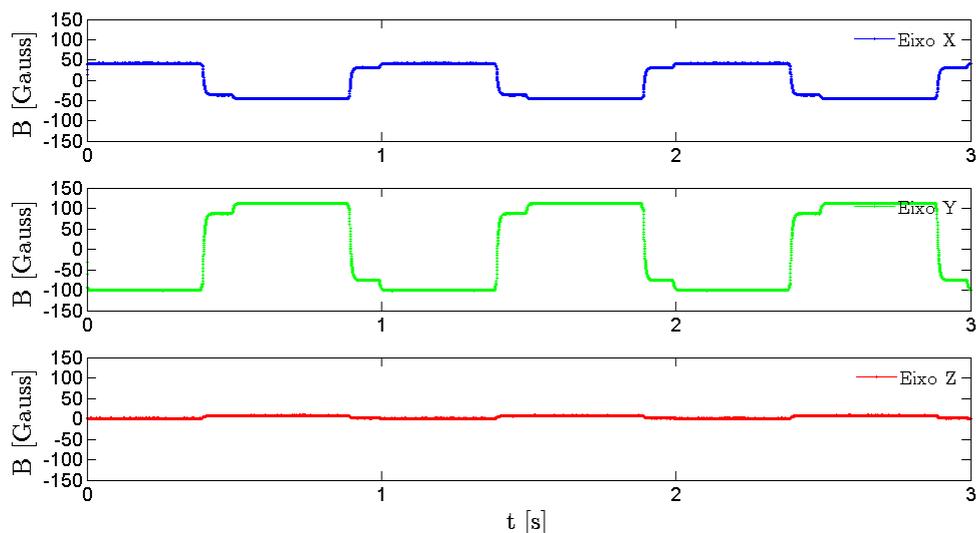


Figura 4.9 - Campo B(t)- Ligação nº 2 -1 Hz.

Os resultados obtidos para a ligação 2 foram diferentes aos da ligação nº 1, o que era expectável porque a excitação dos solenóides foi diferente. A intensidade do campo magnético em Y é duas vezes mais intenso que na ligação nº 1, observando-se igual resultado para a componente X. Na ligação nº 2, as fases de X e Y estão desfasados de 180° e o campo na componente vertical é praticamente nulo.

Tabela 4.3 – Intensidade campo magnético para equipamento com 4 solenóides - Ligação 2 - 1 Hz.

	X	Y	Z
Máximo [Gauss]	43,73	113,11	8,83
Mínimo [Gauss]	-47,98	-102,99	-1,36

Conclui-se então que o campo magnético mais intenso foi medido na componente Y da ligação nº 2. Na ligação nº 1 as componentes X e Y estão em fase, ao passo que na ligação nº 2 estão em oposição de fase. Apenas foi detectado campo na componente vertical na ligação nº 1. A forma da onda observada nas duas ligações foi quadrada.

4.5.2 EQUIPAMENTO COM ROTAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Este equipamento foi criado para a visualizar o movimento das bactérias, em tempo real, no microscópio. O equipamento é constituído por um estator de um motor passo-a-passo com um diâmetro interior de 5 cm para a colocação do provete no centro do estator. Existe ainda a possibilidade de colocar a lente do microscópio no interior do estator, para monitorização em tempo real do movimento das bactérias sujeitas a campo magnético.



Figura 4.10 – Ensaio com sonda de Hall nº 2 no equipamento com rotação do campo magnético.

O ensaio neste equipamento teve como objectivo quantificar a intensidade do campo e, sobretudo a direcção, uma vez que as bobinas deste estator não se encontram visíveis e daí a dificuldade do conhecimento da direcção do campo. A gama de frequências testadas variou entre 0,5 e 100 Hz. Na Figura 4.11 representam-se os eixos de coordenadas assumidos para o equipamento.

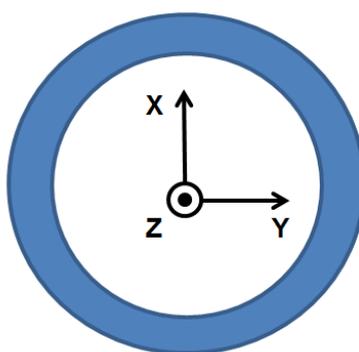


Figura 4.11 - Eixo de coordenadas do equipamento com rotação do campo magnético.

A sonda utilizada para os ensaios foi a nº2, com uma taxa de aquisição de 3333 *samples/s* e os limites dos gráficos são ± 500 Gauss.

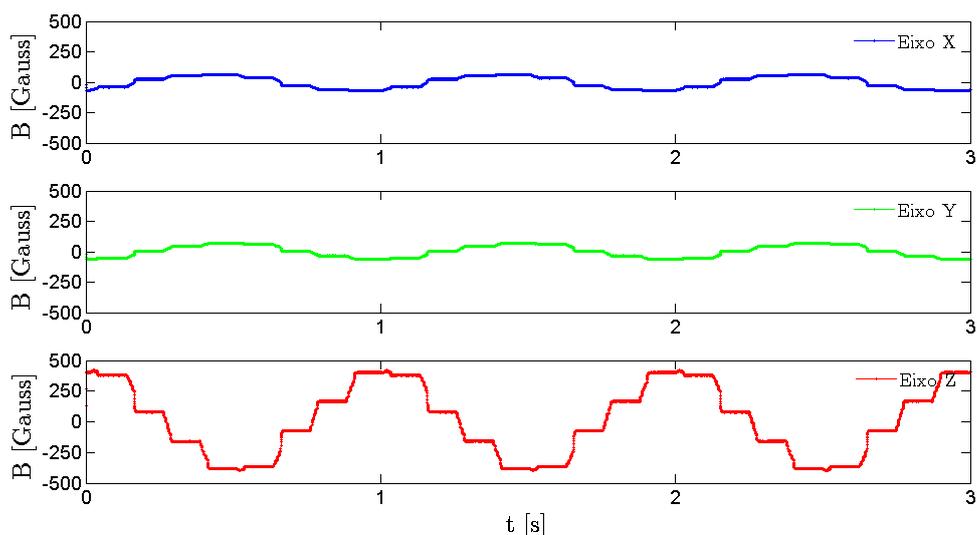


Figura 4.12 – Campo $B(t)$ no equipamento com rotação do campo magnético.

Tabela 4.4 – Valores máximos e mínimos da intensidade do campo magnético.

	X	Y	Z
Máximo [Gauss]	66,14	74,38	422,62
Mínimo [Gauss]	-72,44	-64,25	-400,88

Através deste equipamento pode concluir-se que a intensidade do campo magnético na componente vertical é muito superior ao campo magnético horizontal, cerca de 420 Gauss e 70 Gauss, respectivamente. Conforme se pode observar na Figura 4.12, este resultado demonstra que o campo magnético foi principalmente sentido na direcção Z, enquanto as componentes horizontais nas direcções X e Y deverão ser resultado de um desalinhamento da sonda em relação aos eixos das coordenadas. O tipo de curva observado neste equipamento tem forma senoidal, apesar de se observarem patamares ao longo da onda.

4.5.3 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL E VERTICAL.

Para o equipamento de campo magnético horizontal e vertical, pretendia-se conhecer o campo magnético aplicado na zona de colocação do provete durante um ciclo. Um ciclo é definido pelo tempo de campo horizontal e vertical aplicado no percurso do provete, desde o solenóide horizontal para o vertical. Utilizou-se a sonda nº 1 pelo facto de ser a sonda de menor dimensão e com uma gama de medição apropriada para a intensidade destes campos.

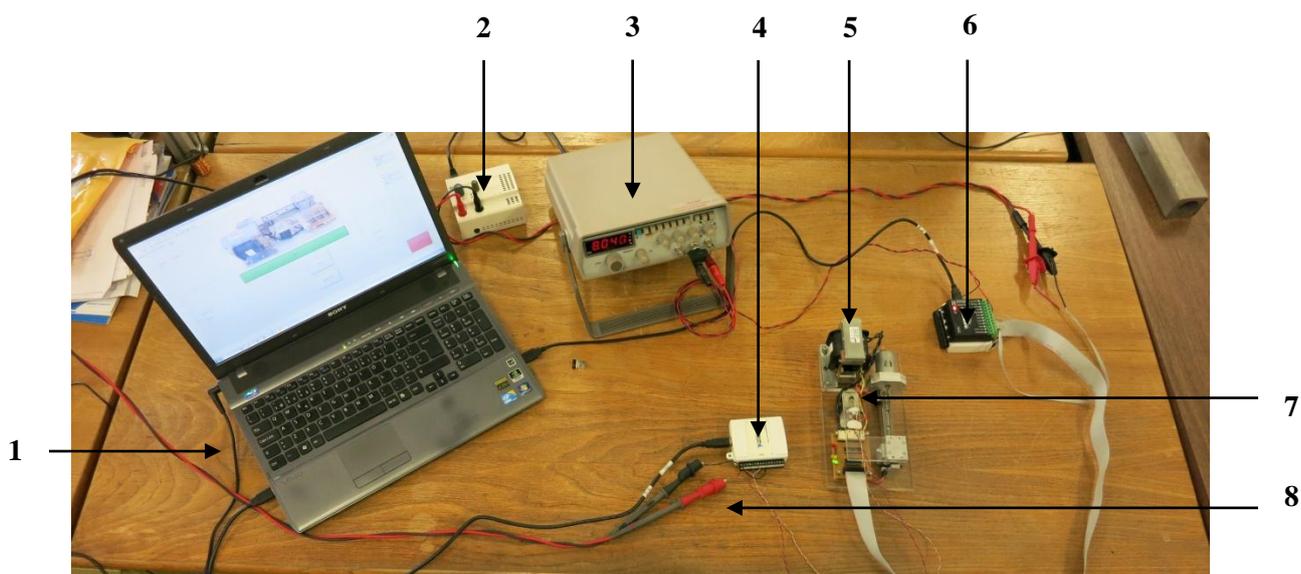


Figura 4.13 - Esquema de montagem de equipamento de campo magnético H e V.

Legenda: 1) PC com programa Labview™, 2) Alimentação *driver* do motor, 3) Gerador de sinais, 4) Placa NI6008-USB, 5) Equipamento de campo magnético horizontal e vertical, 6) *Driver* do motor, 7) Sonda de Hall, 8) Alimentação da sonda de Hall.

Um dos ensaios avaliou o efeito que a presença dos provetes exerce na intensidade de campo magnético, ou seja, foi medida a intensidade do campo magnético na superfície superior de provetes de alumínio, cobre, PMMA, aço inox e aço carbono colocados sobre o solenóide vertical. Realizou-se um ensaio com a sonda colocada na superfície do suporte do provete, servindo de referência para comparação de resultados Neste conjunto de ensaio todos os parâmetros foram mantidos constantes, nomeadamente intensidade de corrente eléctrica no solenóide, frequência e tempo de aplicação de campo magnético em cada solenóide. Representam-se as coordenadas assumidas para o equipamento na Figura 4.14.

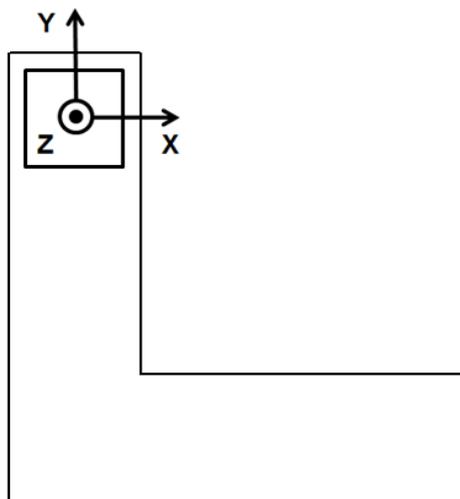


Figura 4.14 - Eixo de coordenadas do equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.

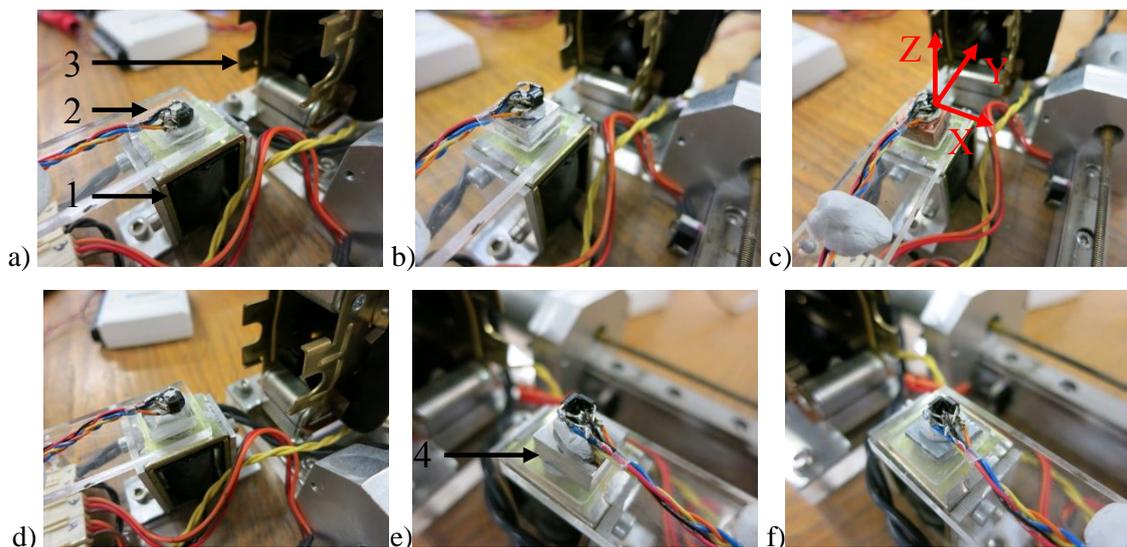


Figura 4.15 – Caracterização do equipamento com campo magnético horizontal e vertical com diferentes materiais: a) Sem provete, b) Alumínio, c) Cobre, d) PMMA, e) Aço inox, f) Aço carbono.

Legenda: 1) Solenóide vertical, 2) Sonda de Hall, 3) Solenóide horizontal, 4) Provete.

Nas Figuras 4.16 a 4.21 representam-se os gráficos do campo magnético em função do tempo, com a presença dos provetes nos diferentes materiais anteriormente descritos. Os limites da intensidade de campo magnético representado nos gráficos são de ± 400 Gauss com uma taxa de aquisição de 1000 samples/s .

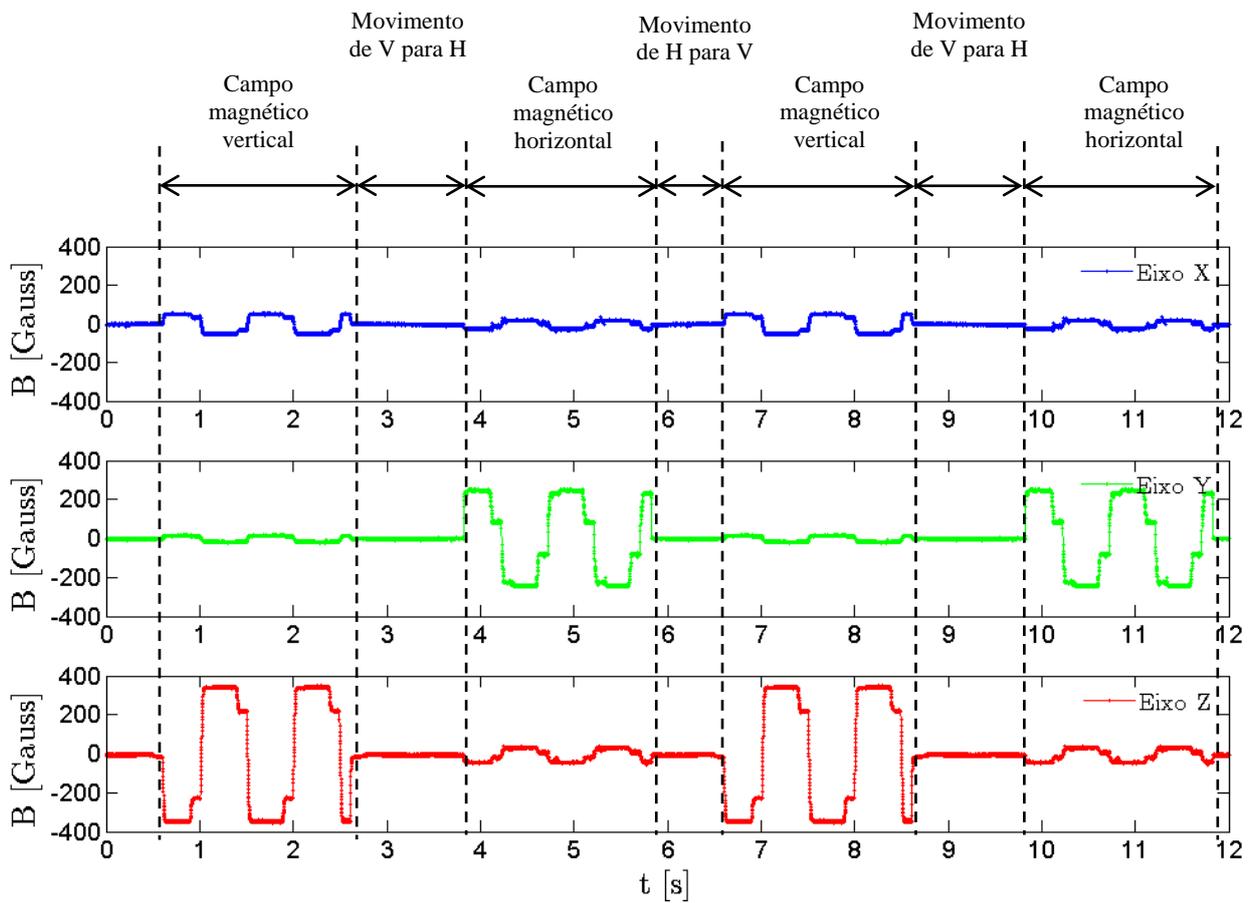


Figura 4.16 - Campo magnético X,Y e Z sem provete.

Nota: Movimento de V para H significa que o provete se desloca do solenóide vertical para o solenóide horizontal. A mesma analogia aplica-se para movimento de H para V.

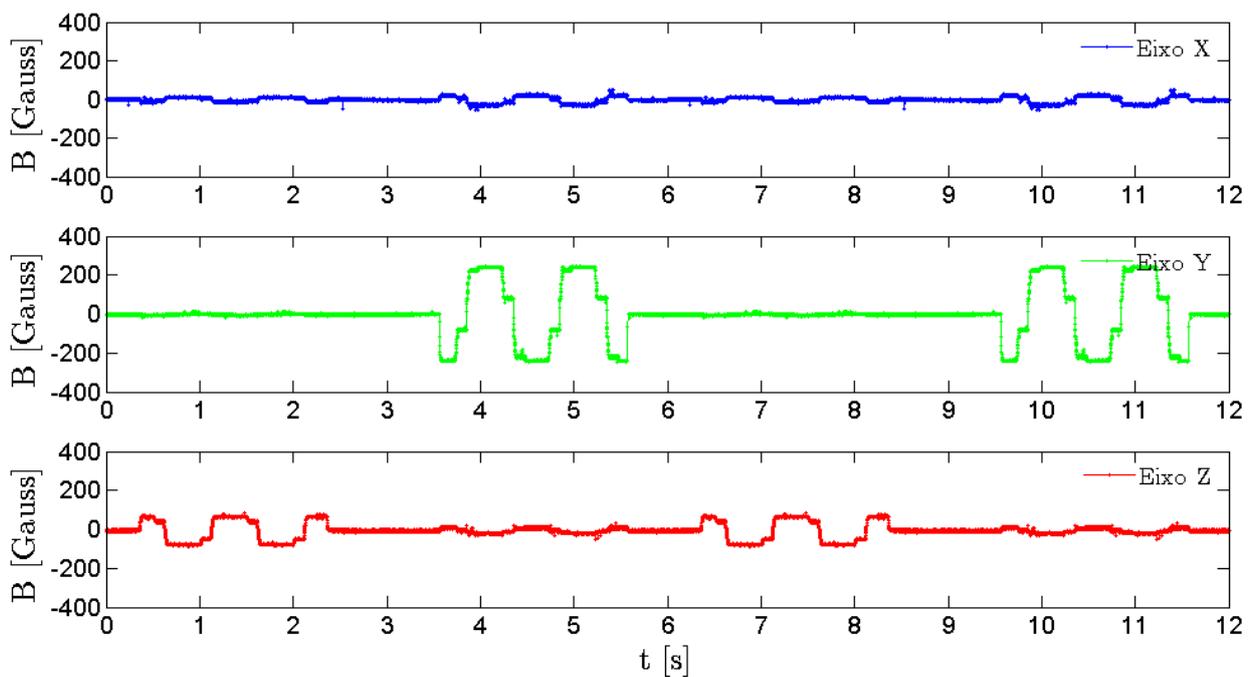


Figura 4.17 - Campo magnético X,Y e Z com provete de alumínio.

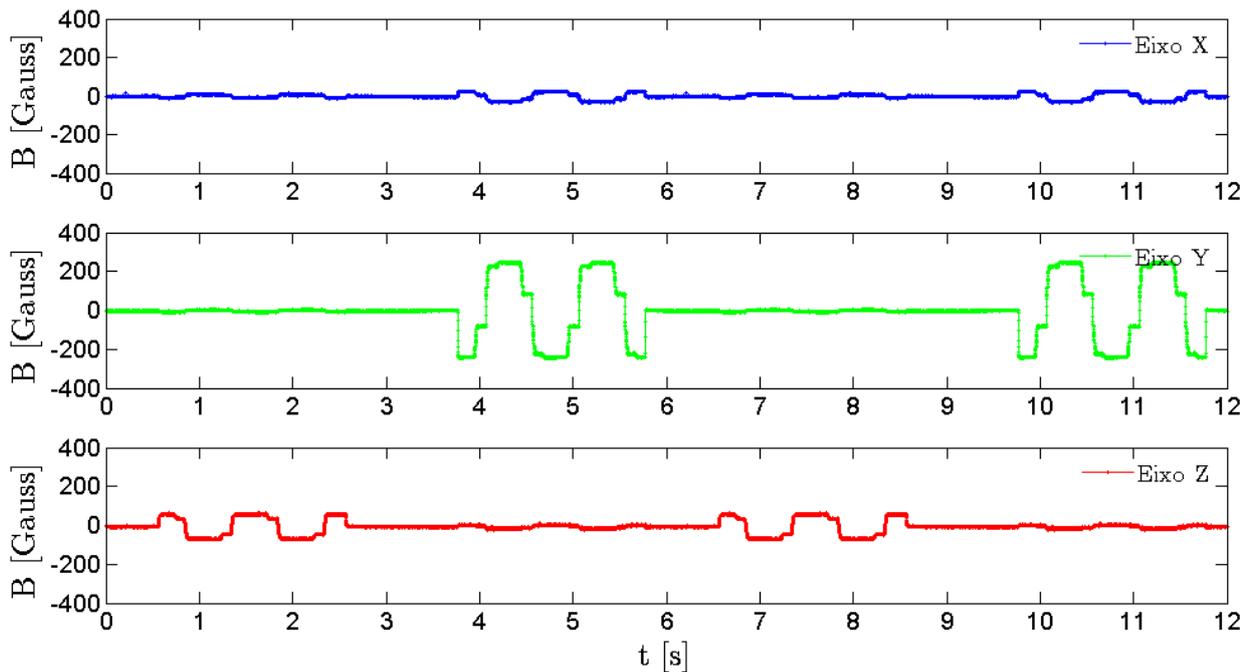


Figura 4.18 – Campo magnético X,Y e Z com provete de cobre.

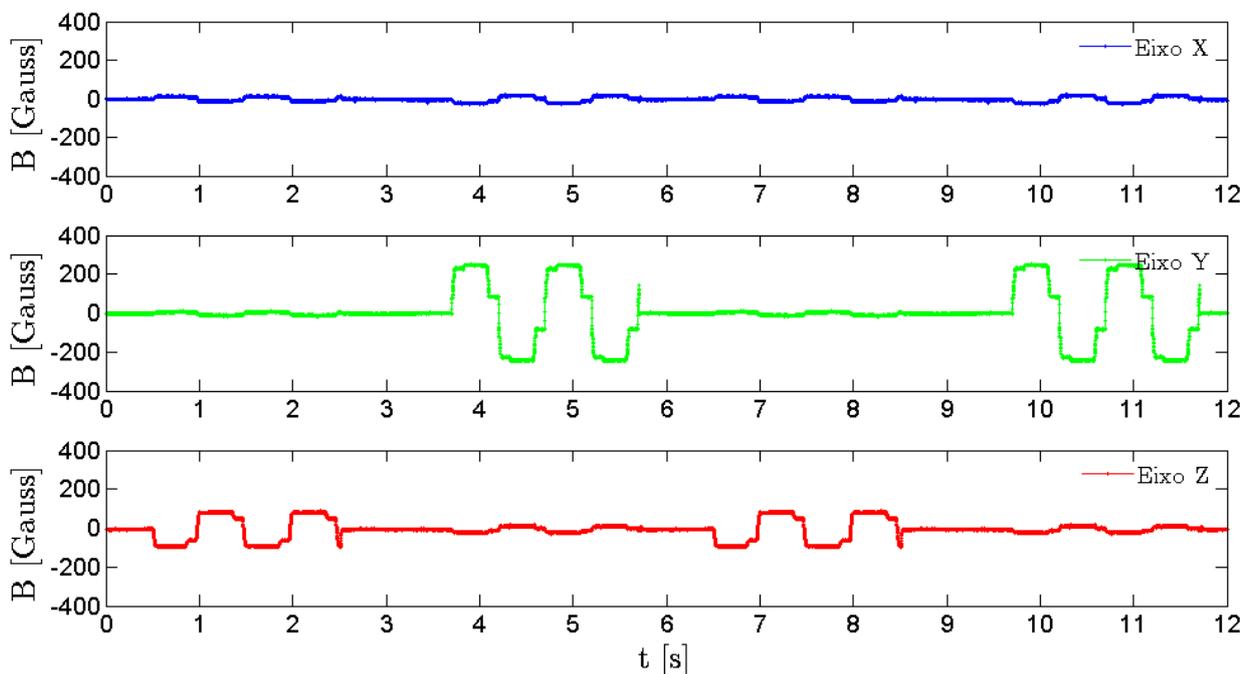


Figura 4.19 - Campo magnético X,Y e Z com provete de PMMA.

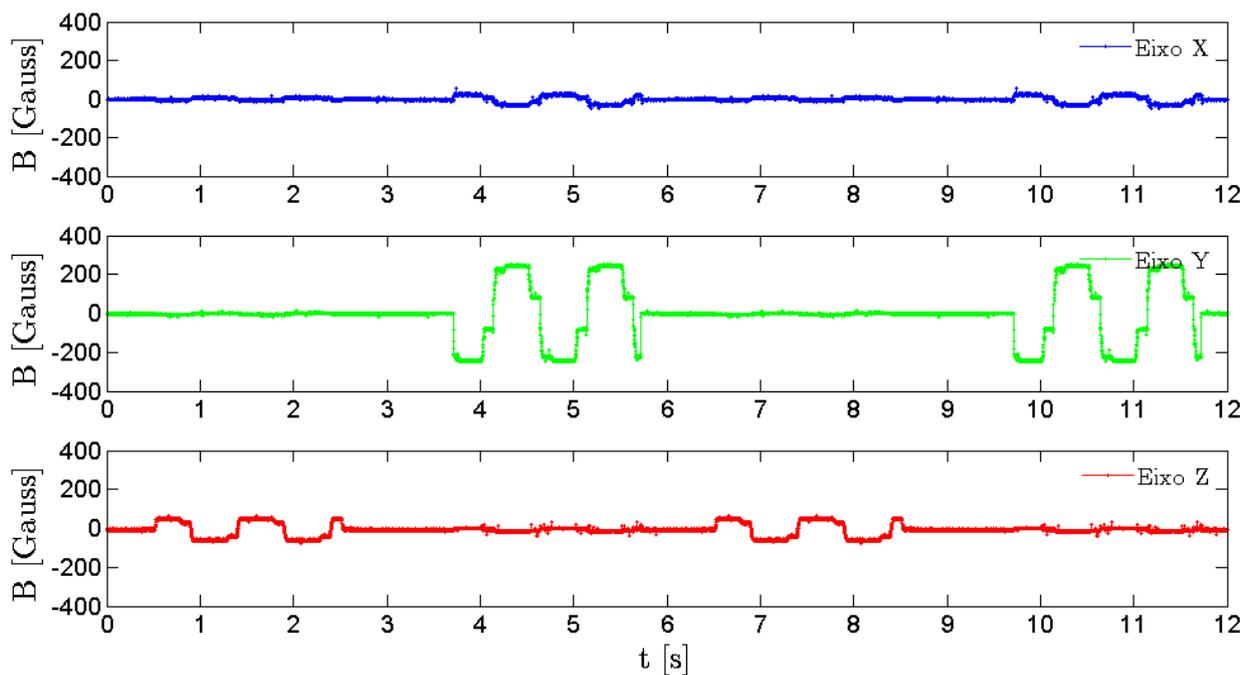


Figura 4.20 - Campo magnético X,Y e Z com provete de aço inox.

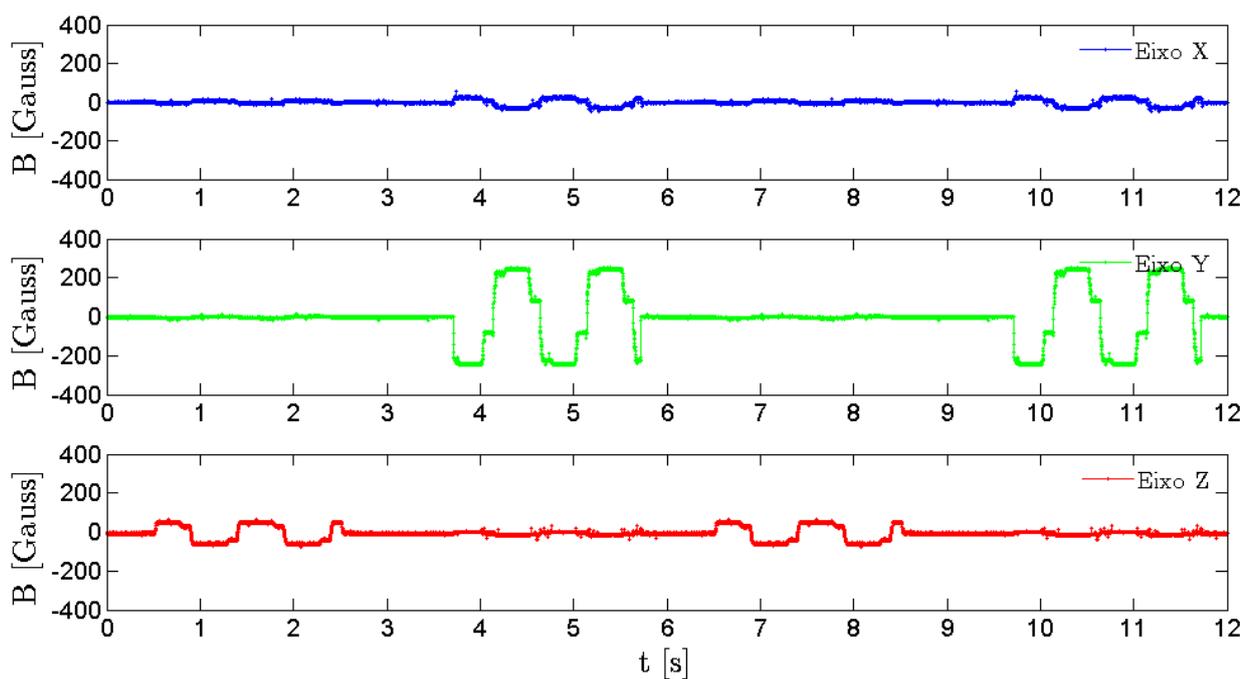


Figura 4.21 - Campo magnético X,Y e Z com provete de aço carbono.

Tabela 4.5 – Valores das intensidades do campo magnético no equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical.

Material	X		Y		Z	
	Máximo [Gauss]	Mínimo [Gauss]	Máximo [Gauss]	Mínimo [Gauss]	Máximo [Gauss]	Mínimo [Gauss]
Sem provete	52,96	-55,73	249,94	-248,88	345,87	-352,60
Alumínio	31,22	-38,07	244,50	-243,44	71,38	-83,54
Cobre	25,79	-38,07	247,22	-246,16	63,22	-74,03
PMMA	23,07	-29,92	251,30	-247,52	89,04	-97,13
Aço Inox	55,67	-50,30	251,29	-250,24	71,38	-79,46
Aço	39,37	-29,92	194,21	-184,99	99,91	-108,00

No ensaio sem provete, a sonda de Hall foi colocada com o sensor do eixo Z na superfície do suporte do provete. Com este ensaio foi possível observar que o campo magnético sem provete tem maior intensidade na componente vertical, cerca de ± 350 Gauss, e de ± 200 Gauss para a componente horizontal. Uma das principais causas para o resultado de campo magnético no eixo X deve-se ao alinhamento da sonda, dado que basta uma pequena inclinação para as linhas de fluxo não serem paralelas ao sensor. Durante um ensaio com este equipamento, as bactérias estão sujeitas a uma onda com forma quadrada.

Os provetes utilizados para avaliar o efeito da sua presença têm forma quadrada com 12 mm de lado.

No segundo ensaio, foi colocado um provete de alumínio com 5,50 mm de espessura entre a superfície do suporte e a sonda de Hall. O ensaio com o provete de alumínio resultou numa diminuição da intensidade do campo magnético na direcção Z, reduzindo sensivelmente para ± 80 Gauss. Na direcção X, o campo reduziu para valores muito baixos, sendo quase inexistente. Na direcção Y, o campo não foi afectado pela presença do provete.

Para o terceiro ensaio usou-se um provete em cobre com 5,96 mm de espessura entre a superfície do suporte e a sonda de Hall. Com o provete de cobre, o campo em Z foi menos intenso relativamente ao ensaio sem provete e em X foi praticamente nulo. O campo em Y não foi afectado pela existência do provete.

Colocou-se um provete de PMMA com 4,08 mm de espessura. O campo magnético em X foi praticamente nulo, o campo em Y manteve-se com igual intensidade relativamente ao ensaio sem provete e, na componente Z, a intensidade foi aproximadamente 1/4 da intensidade do ensaio sem provete.

Colocou-se um provete de aço inox com 5,95 mm de espessura e secção quadrada de 12 mm de lado. O campo em X teve um aumento de intensidade apreciável quando o provete foi sujeito

ao campo horizontal. O campo na componente Y manteve-se inalterado em relação ao ensaio sem provete e o campo em Z foi aproximadamente de 1/4.

Para o provete de aço com 1,51 mm de espessura e secção quadrada com 12 mm de lado, mediu-se um campo em Z menor que no ensaio sem provete, cerca de 1/3. Houve uma redução de campo em Y, no qual o máximo chegou aos 194 Gauss. Na componente X, o campo foi pouco intenso.

Com os ensaios no equipamento campo magnético horizontal e vertical conclui-se que o campo magnético mais intenso foi medido no ensaio sem provete na componente vertical, com intensidades na ordem dos 350 Gauss, enquanto no campo magnético horizontal o máximo medido foi 250 Gauss. A onda gerada pelo equipamento de excitação tem forma quadrada.

A presença do provete no interior do campo não afectou o campo magnético com os provetes de PMMA, alumínio e cobre, porque possuem uma permeabilidade magnética semelhante à permeabilidade magnética no vazio. A variação da intensidade do campo para estes materiais deveu-se, principalmente, à diferença de espessura dos materiais, que origina um maior ou menor afastamento da sonda em relação à fonte do campo magnético. O aço inox e o aço carbono afectaram o campo magnético, na medida em que o campo magnético foi superior no aço inox na componente Z do que no cobre apesar de terem igual espessura. Com este resultado comprova-se experimentalmente que um material paramagnético afecta o campo, ao invés de um material diamagnético como o cobre. No aço inox, quando o provete foi sujeito a campo magnético horizontal, evidenciou-se um aumento de intensidade na componente X. Relativamente ao aço carbono, observou-se que o valor da intensidade na componente Y foi a menor de todos os ensaios, o que sugere que o aço, um material ferromagnético, adensou o campo na sua proximidade, diminuindo a intensidade medida no sensor. Este resultado permite também relacionar a intensidade de campo magnético com a densidade das linhas de fluxo, constatando-se intensidades inferiores em zonas com menor densidade de fluxo.

A caracterização do campo magnético em função do tempo foi o principal objectivo da caracterização do campo magnético nos equipamentos. Uma vez estabelecida uma relação entre a força e o campo magnético, é então interessante estudar quer o comportamento do campo em função do tempo, quer também em função do espaço, visto que a força varia com a distância do ímã ao sensor. Foram produzidos dois gráficos tridimensionais de forma a demonstrar o decaimento do campo no espaço para várias intensidades.

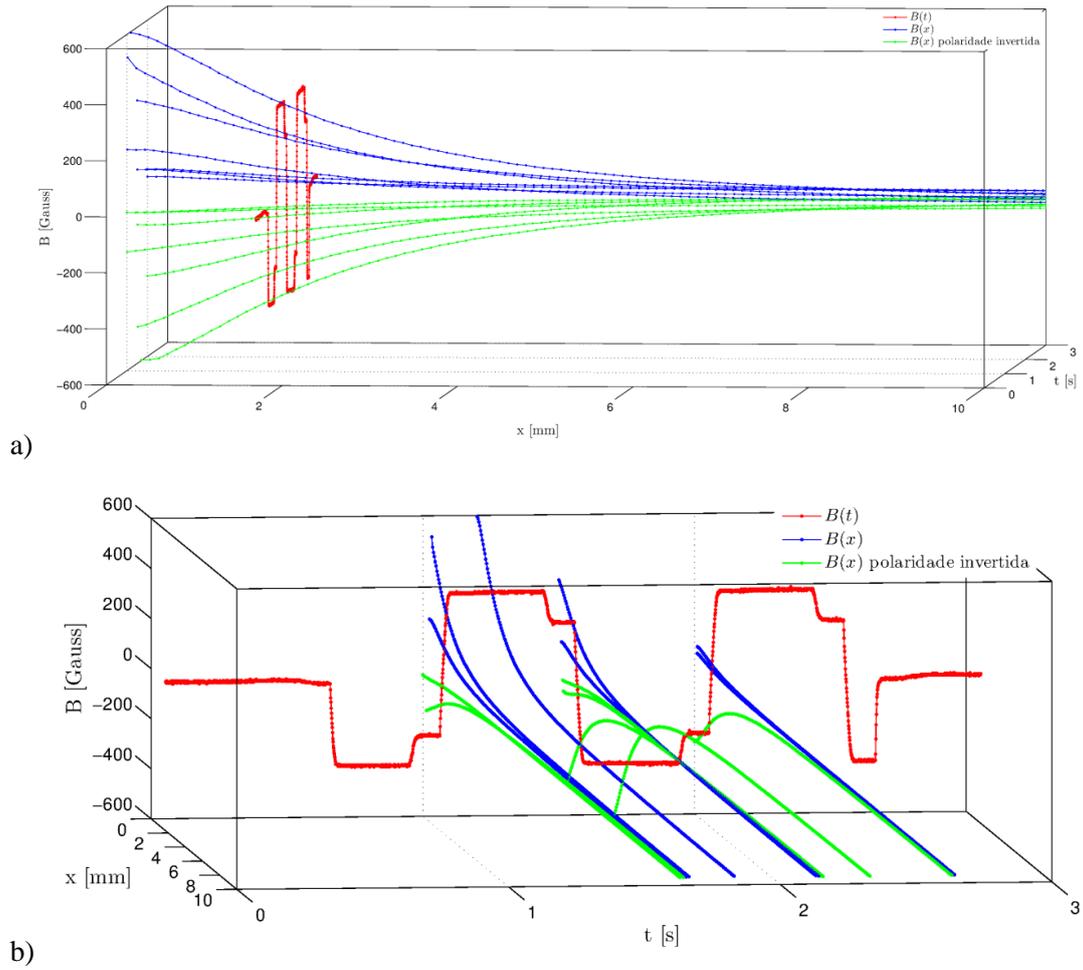


Figura 4.22 – Gráfico 3D campo magnético do equipamento para aplicação campo magnético horizontal e vertical.

a) Vista campo $B(x)$, Vista campo $B(t)$

4.5.4 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO TRIAXIAL

O equipamento para aplicação de campo magnético triaxial com solenóides é constituído por um estator de motor passo-a-passo que gera o campo magnético, sendo aplicada uma corrente ao estator por um *motor driver* da *Astrosyn*. A sonda escolhida para o ensaio foi a n°1 e colocou-se no centro do estator. Realizaram-se dois ensaios em cada uma das frequências em teste, o primeiro sem rotação e o segundo com rotação.

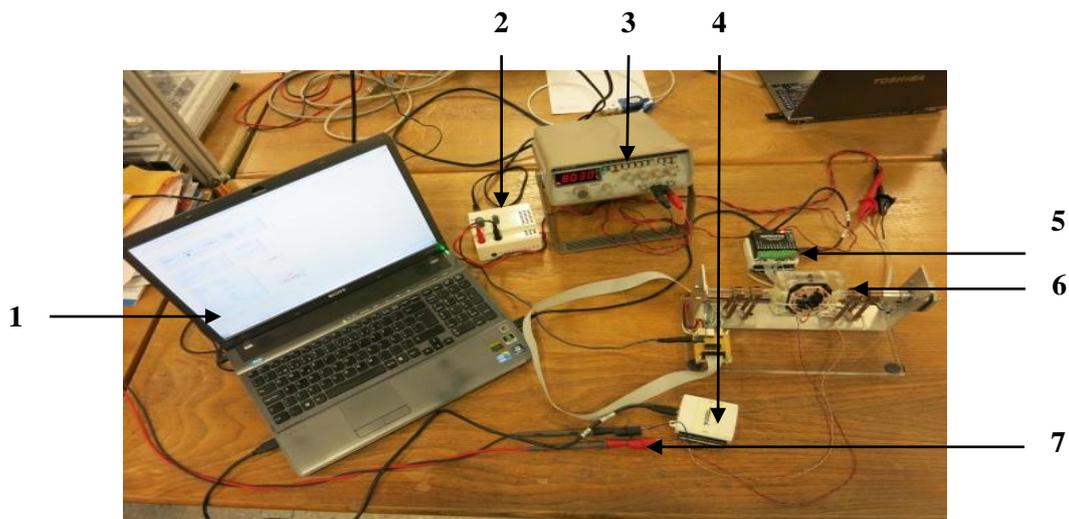


Figura 4.23 Esquema de montagem equipamento campo magnético triaxial.

Legenda: 1- PC com programa Labview™, 2 – Alimentação *driver* do motor, 3 – Gerador de sinais, 4 – Placa NI6008 -USB, 5 – *Driver* do motor, 6 – Equipamento para aplicação campo magnético triaxial, 7 – Alimentação da sonda de Hall

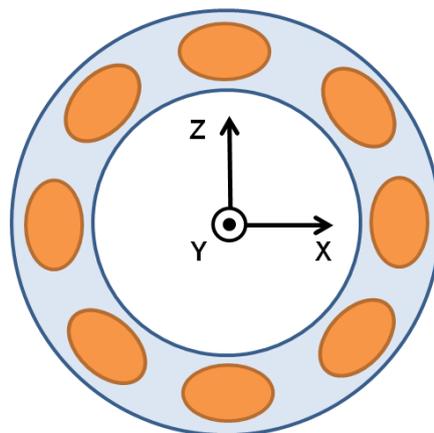


Figura 4.24 - Eixo de coordenadas do equipamento campo magnético triaxial.

Os limites dos gráficos das Figuras 4.25 e 4.26 para a intensidade do campo magnético são ± 100 Gauss.

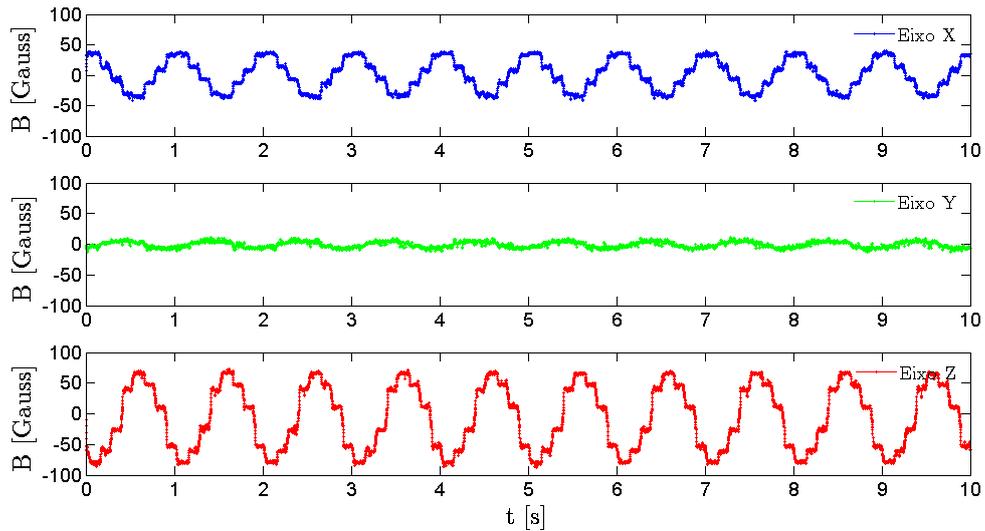


Figura 4.25 - Campo magnético X,Y e Z sem rotação.

Tabela 4.6 - Máximo e mínimo do ensaio sem rotação.

	X	Y	Z
Máximo [Gauss]	40,19	11,54	73,82
Mínimo [Gauss]	-41,33	-12,93	-87,62

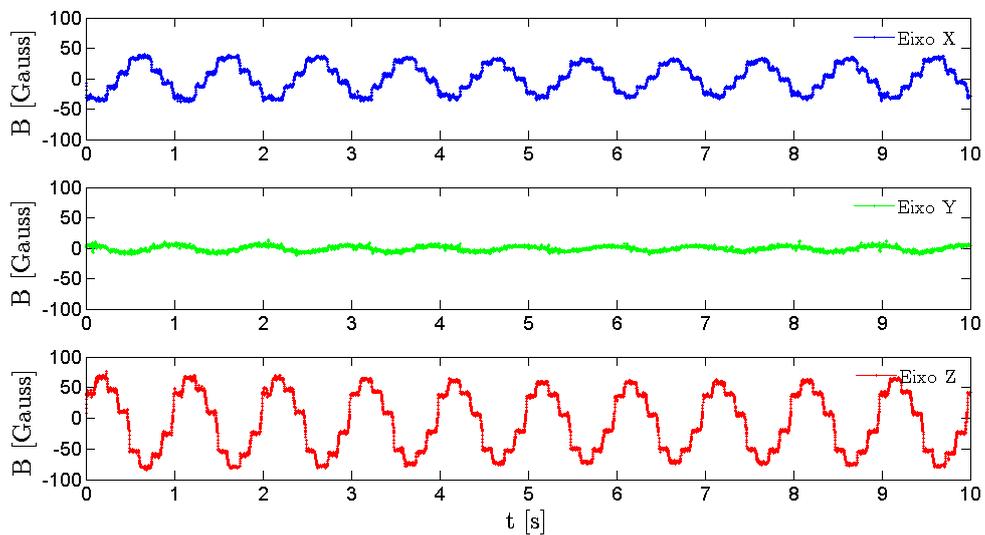


Figura 4.26 - Campo magnético X,Y e Z com rotação

Tabela 4.7 - Máximo e mínimo do ensaio com rotação

	X	Y	Z
Máximo [Gauss]	39,37	13,17	77,08
Mínimo [Gauss]	-38,07	-12,11	-84,36

A partir dos ensaios realizados com este equipamento foi possível concluir que a intensidade do campo magnético no centro do estator não é muito intensa em comparação com os outros equipamentos já caracterizados. A intensidade máxima do campo medida para este equipamento foi de -84,36, na direcção Z, enquanto no equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical o valor máximo foi de 352,60 na direcção Z. O campo tem somente componente na direcção X e Z, havendo baixa intensidade na componente Y, porque a sonda de Hall estava acoplada ao movimento do estator. Ocorreu uma diminuição do campo quando se realizou o ensaio com rotação, mas esta não se deveu à dinâmica na superfície de contacto dos casquilhos de cobre, mas sim a uma deslocação da sonda devido à gravidade. Este deslocamento deveu-se à falta de rigidez do suporte da sonda, que foi apenas suportada pelos seus próprios fios, permitindo o movimento da sonda. A onda medida apresentou uma forma senoidal, apesar dos patamares observados ao longo da onda.

4.5.5 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PERMANENTE TRIAXIAL

O equipamento para aplicação de campo magnético triaxial com ímanes permanentes foi criado com o intuito de gerar campo magnético mais intenso. Para o efeito foram utilizados ímanes permanentes em liga magnética alnico, material composto por alumínio, níquel e cobalto, e ímanes de neodímio, composto por neodímio, ferro e boro. Os ímanes permanentes produzem campos magnéticos estáticos, por isso foi necessário adicionar motores passo-a-passo, que rodam o provete, por forma a variar a intensidade e frequência do campo no tempo.

Como a intensidade do campo magnético gerado por ímanes permanentes é superior ao dos equipamentos já descritos, utilizaram-se nos ensaios a sonda de Hall nº 3, que permite medição de campo no intervalo de ± 2500 Gauss, e a sonda de Hall nº1 com intervalo de medição na ordem dos ± 750 Gauss, mas com aquisição de campo em 3 direcções.

O primeiro ensaio consistiu na medição da intensidade do campo magnético do íman permanente para diferentes distâncias. Foram testadas duas distâncias entre os ímanes para simular a correspondente distância consoante o suporte do provete instalado no equipamento. A primeira configuração tem 33 mm de distância entre os ímanes, enquanto a segunda tem 20 mm. Foram utilizados dez ímanes com configuração apresentada na Figura 4.27. Na Figura 4.28 é apresentada a disposição dos ímanes e a coordenada medida.



Figura 4.27 - Coordenada medida.

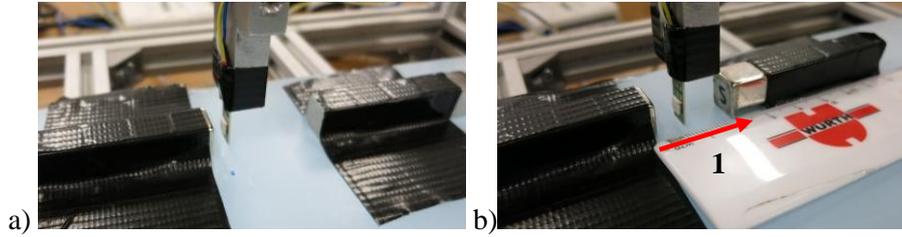


Figura 4.28 - Ensaio com sonda de Hall – a) Configuração n° 1, b) Configuração n° 2

Legenda: 1) Movimento da sonda de Hall.

Os limites dos gráficos da Figura 4.29 e 4.30 para a intensidade do campo magnético são de ± 3500 Gauss

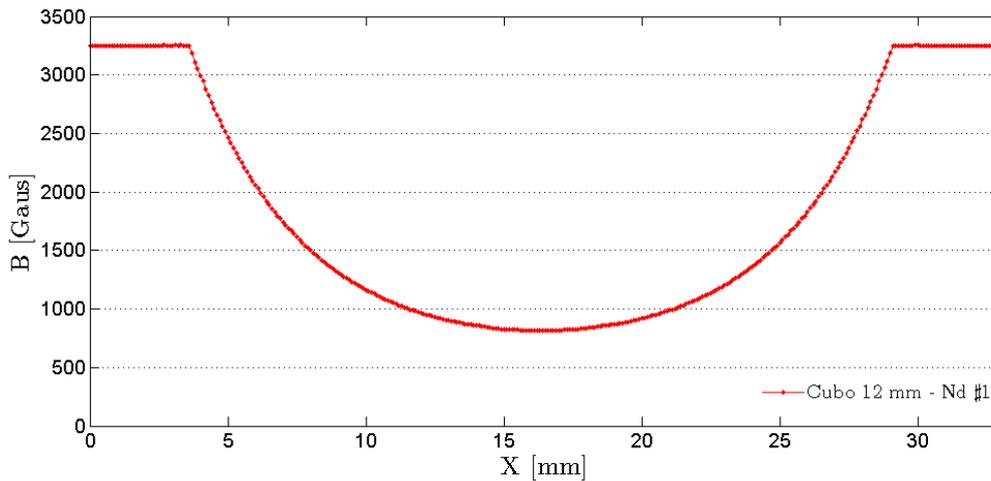


Figura 4.29 - Ensaio com sonda de Hall – Configuração 1.

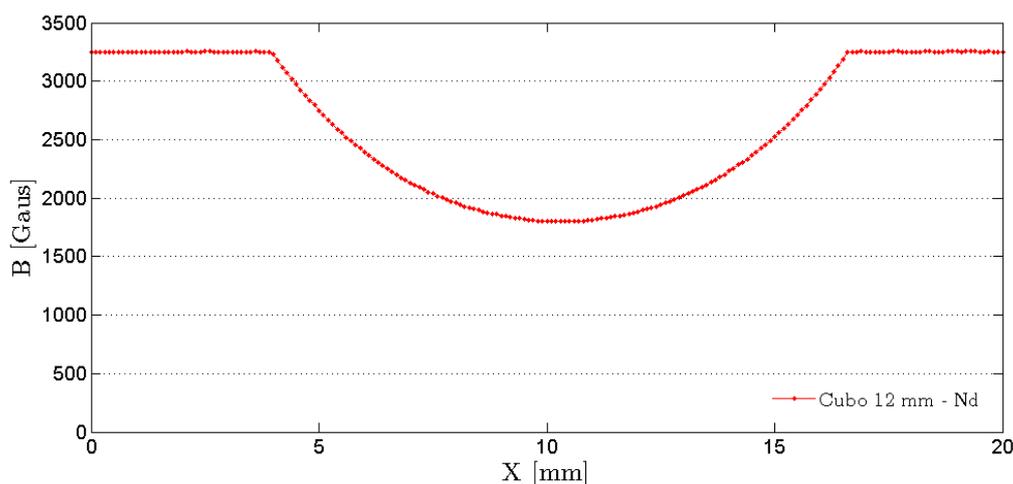


Figura 4.30 – Ensaio com Sonda de Hall – Configuração 2.

Constatou-se que a sonda nº 3 apresenta saturação do sinal para valores de ± 3300 Gauss, ou seja, valores acima do intervalo de medição indicado pelo fabricante. Apesar de medir valores acima dos 2500 Gauss, o intervalo de medição não foi suficiente para caracterizar o campo magnético para todas as distâncias, porque os sensores saturaram a distâncias próximas dos ímanes. A aproximação dos ímanes resultou num menor decréscimo do campo magnético quando se afasta o sensor dos ímanes.

Todavia, este ensaio permitiu concluir que os campos magnéticos medidos são os mais intensos dos equipamentos caracterizados, com um valor mínimo a meio da distância entre os ímanes de 815 Gauss e de 1802 Gauss, para a configuração nº1 e nº2, respectivamente.

Tabela 4.8 – Intensidade do campo magnético em função da distância para o ensaio com sonda de Hall nº 4.

	Configuração nº1	Configuração nº2
Máximo [Gauss]	3254	3255
Mínimo [Gauss]	815	1802

A fim de estimar o valor da intensidade do campo magnético nas zonas onde o sinal da sonda de Hall saturou, interpolou-se os resultados com um polinómio de grau 4. Obtida a equação, foi possível derivá-la, de forma a obter os valores necessários para calcular a força magnética no ponto 5.2.3. Representa-se na Figura 4.31 o gráfico da interpolação e derivado dos resultados experimentais da intensidade do campo magnético em função da distância $B(x)$. Com este resultado conclui-se ainda que o valor máximo da intensidade do campo magnético será de aproximadamente 7000 Gauss na superfície dos ímanes de neodímio.

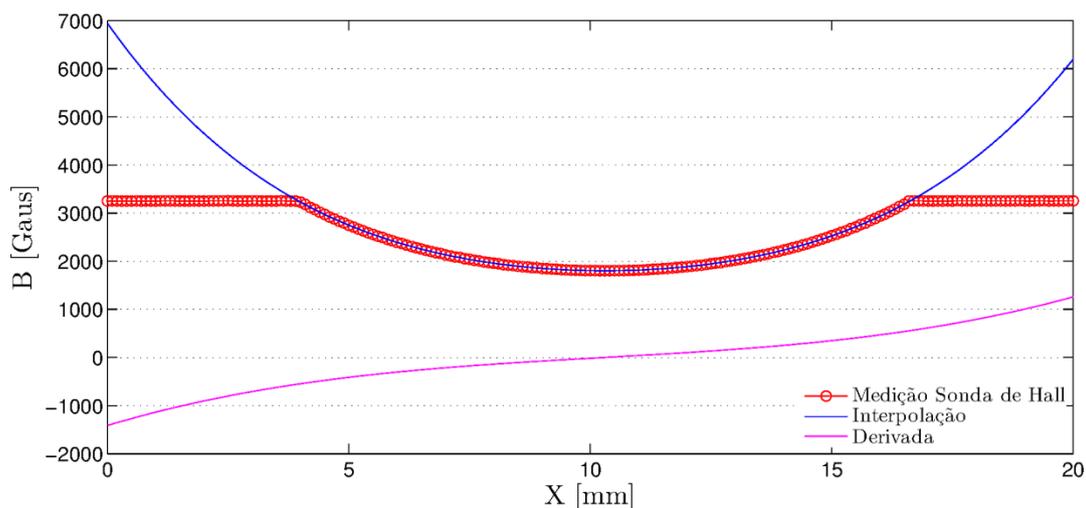


Figura 4.31 – Interpolação e derivada dos resultados experimentais da intensidade do campo magnético $B(x)$.

Na caracterização do campo magnético do equipamento para aplicação do campo magnético permanente triaxial foi utilizado a sonda nº 1, que mede campo magnético nas três direções X, Y e Z. Apresenta-se na Figura 4.32 a disposição da sonda de Hall. Foram caracterizadas seis configurações: campo magnético vertical gerado pelo íman de alnico e pelo íman de neodímio; o movimento composto entre a rotação do provete e a rotação do íman de alnico na vertical, com ímanes na horizontal, bem como a mesma configuração, mas com ímanes de neodímio; por fim, foi testado o módulo do movimento tipo pêndulo, com a caracterização do campo gerado apenas pelo seu movimento e do movimento composto com a rotação do provete em simultâneo. Note-se que, tal como foi referido no ponto 2.11.2, não existiram forças magnéticas sobre uma partícula de ferro que seja colocada na posição $x = 10$ mm, já que neste ponto, apesar do campo magnético ser elevado (aproximadamente 1800 Gauss), a derivada do campo em função do espaço é nula. Este facto mostra que no futuro se deverão utilizar apenas um íman permanente em vez de 2 ímanes, já que assim a derivado nunca será nula.

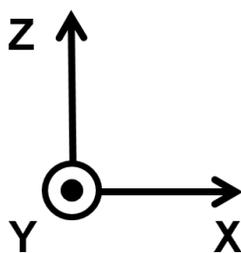


Figura 4.32 - Eixo de coordenadas para equipamento campo magnético triaxial.

Na primeira configuração, colocou-se o ímã a uma distância de 5mm da superfície superior da sonda de Hall. Foram prescritas 5 voltas, a 2 s por volta. Nas Figuras 4.33 e 4.34 os limites dos gráficos da intensidade do campo magnético são ± 200 Gauss.

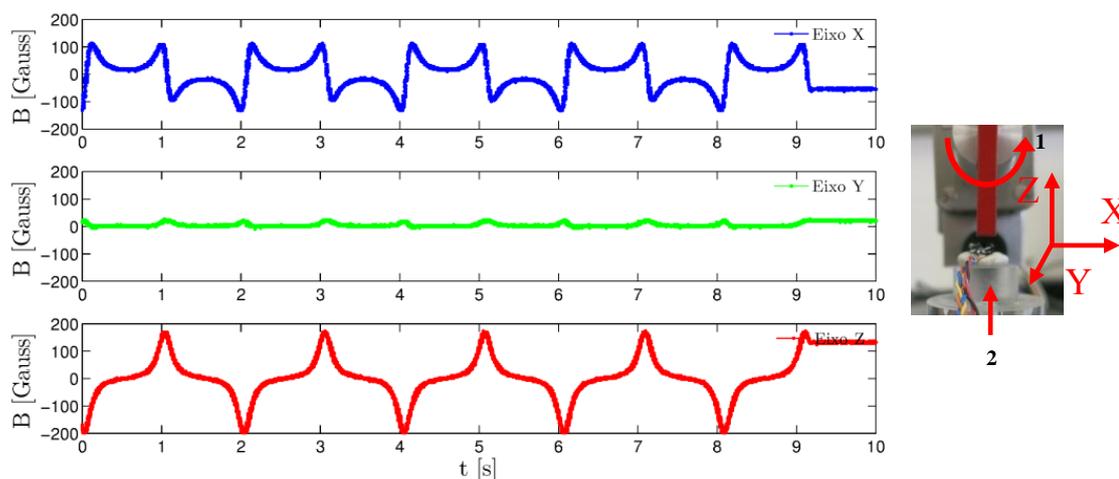


Figura 4.33 - Campo magnético com rotação do ímã vertical a 5 mm do provete - Ímã Alnico.

Legenda: 1) Rotação do campo magnético no plano vertical, 2) Sem movimento.

O campo magnético obtido situou-se nos ± 200 Gauss, mas, devido a geometria do ímã (forma rectangular), obtiveram-se curvas de campo magnético com intensidade alternada periódica e variações acentuadas ao longo do tempo. Esta forma da onda pode ser favorável do ponto de vista de dinâmica das bactérias.

Para o segundo ensaio foi utilizado o mesmo procedimento descrito no primeiro ensaio, mas com a substituição do ímã de alnico pelo de neodímio em forma de toro.

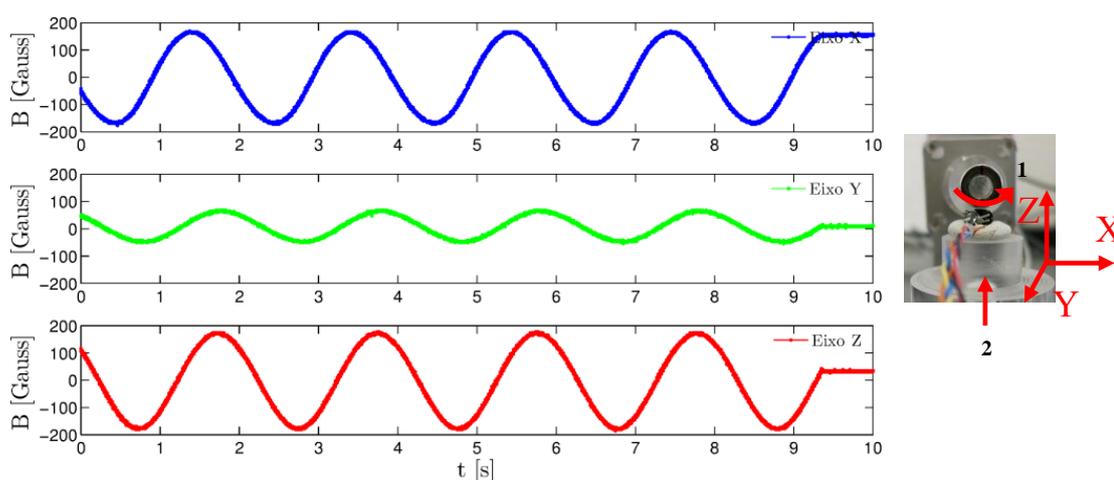


Figura 4.34 - Campo magnético com rotação do ímã vertical a 5 mm do provete - Ímã Nd.

Legenda: 1) Rotação do campo magnético no plano vertical, 2) Sem movimento.

O ímã de neodímio tem uma forma em anel e, devido à sua polarização, originou campo magnético com a forma de onda sinusoidal, com uma frequência de 0,5 Hz, relacionando implicitamente o tempo de cada volta com a frequência. Assim demonstra-se que o campo não é estático, apesar da utilização de ímãs permanentes. A intensidade do campo rondou os ± 200 Gauss, com onda tipo senoidal.

No terceiro ensaio, o movimento é composto pela rotação do ímã vertical e pela rotação do provete na horizontal. Foram definidas 5 voltas, com velocidade de 2 s por volta, para ambos os motores. O ímã vertical foi colocado à distância de 5 mm da superfície do provete e os ímãs na horizontal foram afastados em 37 mm. Os limites dos gráficos da intensidade do campo magnético na Figura 4.35 e 4.36 são ± 1000 Gauss. Utilizaram-se ímãs de alnico e neodímio.

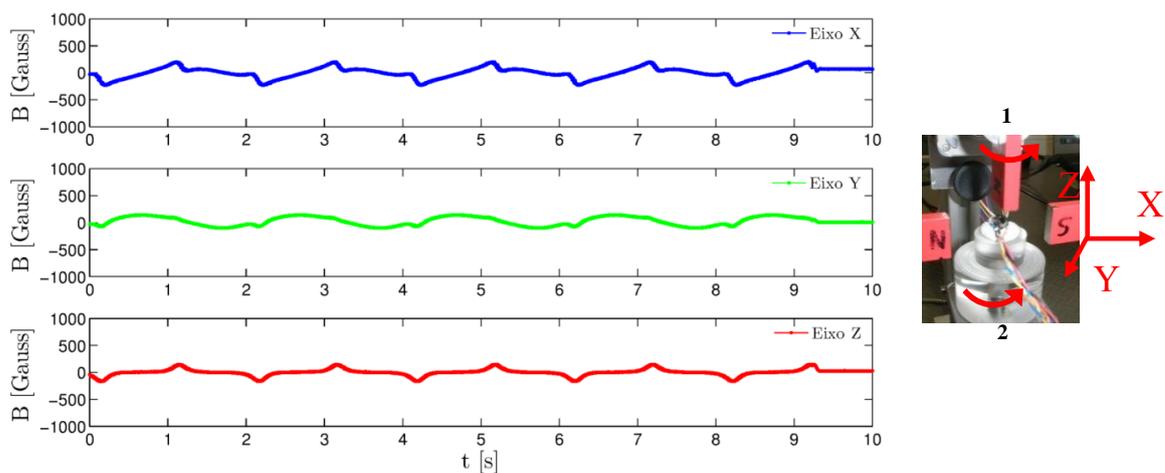


Figura 4.35 - Campo magnético com rotação horizontal e vertical - Ímã Alnico.

Legenda: 1) Rotação do campo magnético no plano vertical, 2) Rotação do provete no plano horizontal.

O resultado apresentado na figura 4.35 mostra curvas alternadas periódicas, resultantes da adição e subtração dos campos gerados pelo ímã vertical e horizontal, aliados à rotação. De salientar que a intensidade do campo magnético medida está na ordem dos ± 200 Gauss.

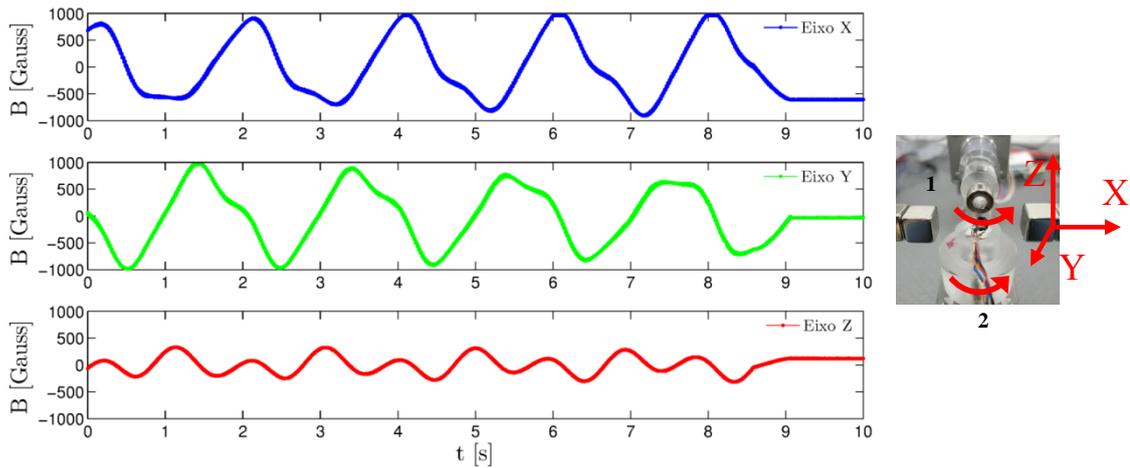


Figura 4.36 - Campo magnético com rotação horizontal e vertical - Íman Nd.

Legenda: 1) Rotação do campo magnético no plano vertical, 2) Rotação do provete no plano horizontal.

Novamente, os campos obtidos para o movimento composto com ímãs de neodímio resultaram em curvas alternadas periódicas, mas com mais intensidade de campo magnético, cerca de ± 1000 Gauss, resultante da mudança dos ímãs.

Para a configuração do movimento tipo pêndulo vertical foram efectuados três ensaios, variando apenas os ângulos de oscilação. O íman foi colocado a 5 mm do sensor e a velocidade de cada ciclo foi definida por 2 s por volta. Os limites dos gráficos da intensidade do campo magnético nas Figuras 4.36 a 4.40 são ± 200 Gauss.

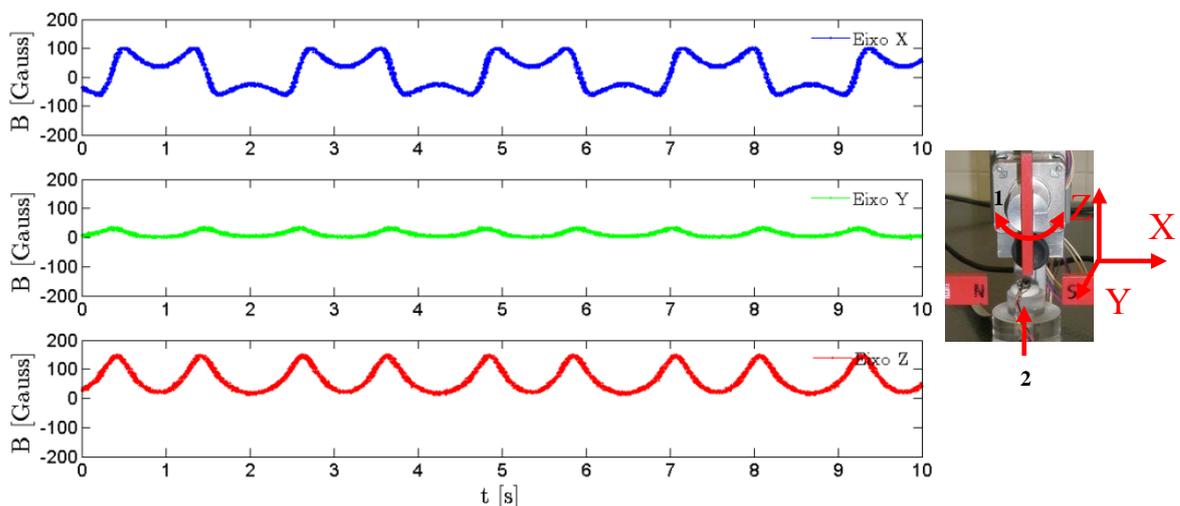


Figura 4.37 – Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 45° .

Legenda: 1) Movimento tipo pêndulo 2) Sem movimento.

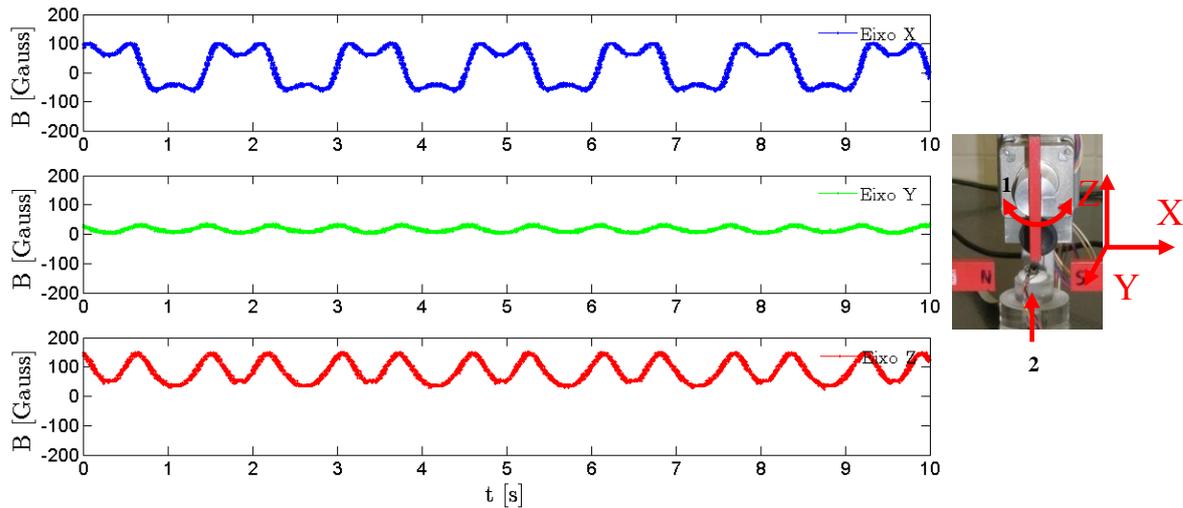


Figura 4.38 – Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 30° .

Legenda: 1) Movimento tipo pêndulo 2) Sem movimento.

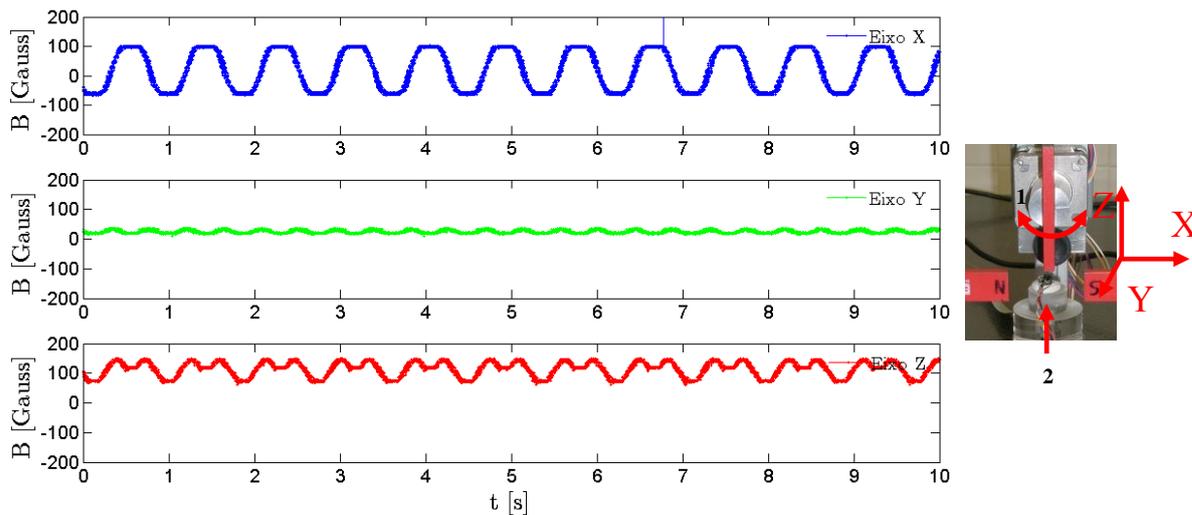


Figura 4.39 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 15° .

Legenda: 1) Movimento tipo pêndulo 2) Sem movimento.

Os resultados obtidos com movimento do íman tipo pêndulo mostram que o campo magnético é alternado periódico. É perceptível uma semelhança na forma do campo para os três movimentos, mas com frequências diferentes. Por último, testou-se o movimento tipo pêndulo do íman vertical com o suporte do provete a rodar a velocidade de 2 s por volta.

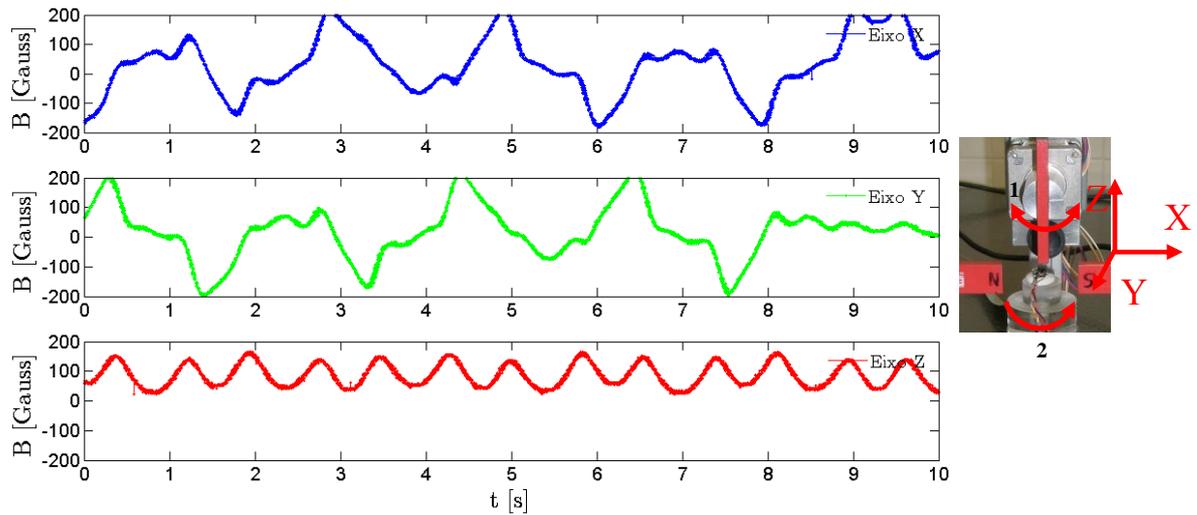


Figura 4.40 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 30° .

Legenda: 1) Movimento tipo pêndulo 2) Com rotação do provete.

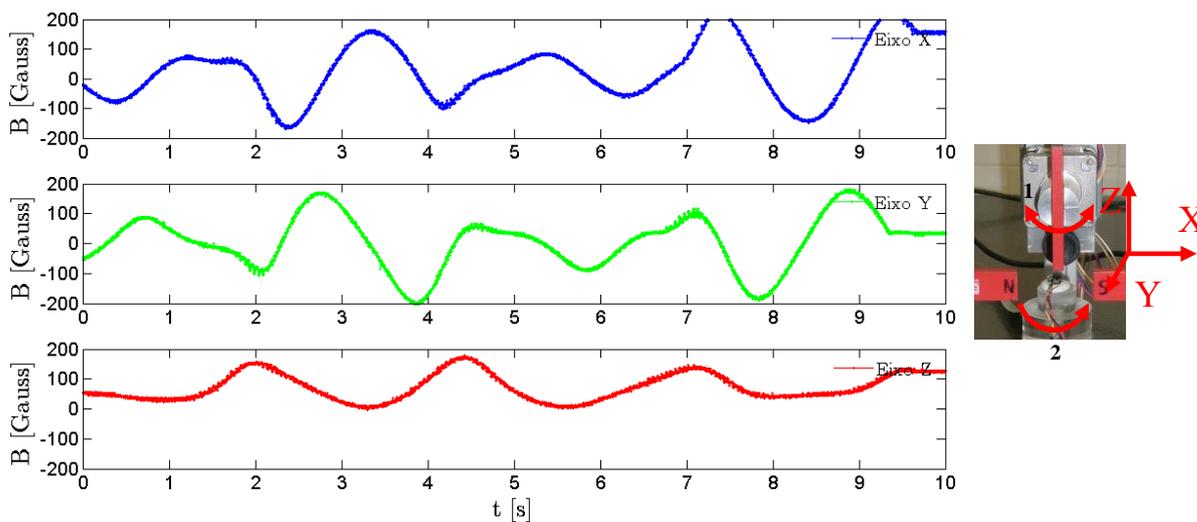


Figura 4.41 - Intensidade $B(t)$ para movimento tipo pêndulo vertical 45° .

Legenda: 1) Movimento tipo pêndulo 2) Com rotação do provete.

A configuração caracterizada apresentou formas do campo magnético de difícil análise, mas a sua particularidade deve-se essencialmente à adição e subtração dos campos magnéticos devido à dinâmica entre os ímãs e o provete. Apesar da forma complexa, o campo é periódico com as componentes X e Y a demonstrarem algum desfasamento entre as curvas.

4.6 TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Com as sondas de Hall foi possível quantificar a intensidade do campo, mas não permitiu a visualização das linhas de campo. Para isso, existe um outro método muito utilizado, as

partículas de ferro, que se orientam consoante o campo magnético a que estão sujeitas como apresentado na Figura 4.42. As partículas têm uma forma cilíndrica, o que possibilita a orientação preferencial numa direcção. Esta técnica é mais adequada para equipamentos com campo magnético estático, também podendo ser usada com campos variáveis no tempo para a criação de vídeos.

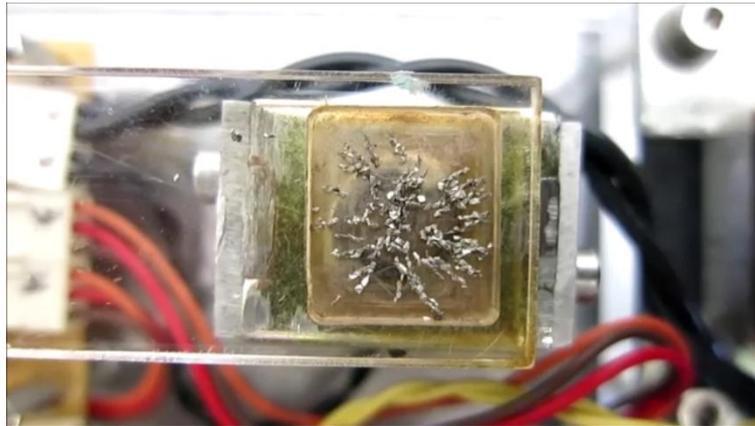


Figura 4.42 - Visualização de campo magnético com partículas de ferro

Foi também utilizado ferrofluido, uma solução líquida constituída por nanopartículas de ferro com uma dimensão de 10 nm, misturadas num óleo preto, formando assim uma solução que responde activamente quando sujeita a um campo magnético. Apesar de maior dificuldade na visualização das linhas de campo com este método, proporciona a percepção do campo em três dimensões. É apresentado na Figura 4.43 um exemplo de aplicação da técnica.



Figura 4.43 - Visualização de campo magnético com ferrofluido

Por último, utilizou-se um filme de visualização de campo magnético constituído por partículas de níquel numa suspensão viscosa, com o intuito de mostrar campo magnético

estacionário ou ainda mudanças no campo a baixas frequências. É um método de visualização no plano que permite avaliar, principalmente, o campo magnético perpendicular ao filme.

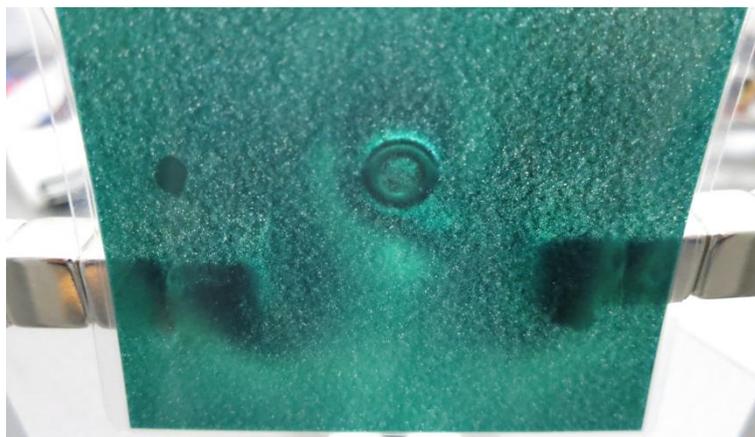
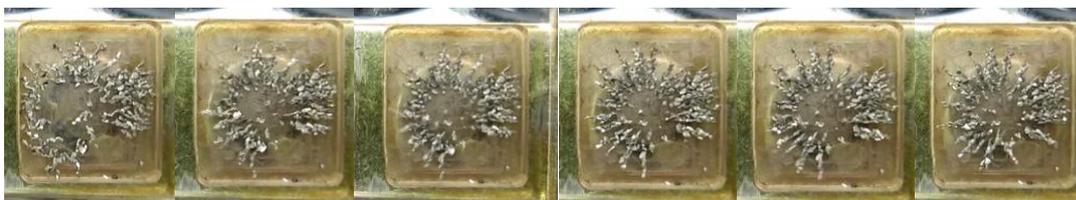


Figura 4.44 – Filme de visualização de campo magnético.

4.6.1 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL E VERTICAL

No equipamento para aplicação de campo magnético horizontal e vertical foi possível utilizar as três técnicas descritas anteriormente para visualizar as linhas de campo magnético, bem como o efeito no campo magnético para diferentes frequências. Nas Figuras 4.45 à 4.47 apresentam-se as várias visualizações ao longo do tempo com *frames* retirados dos vídeos produzidos.



→ t [s]
Figura 4.45 – Visualização do campo ao longo do tempo com partículas de ferro



→ t [s]
Figura 4.46 - Visualização do campo ao longo do tempo com ferrofluido.

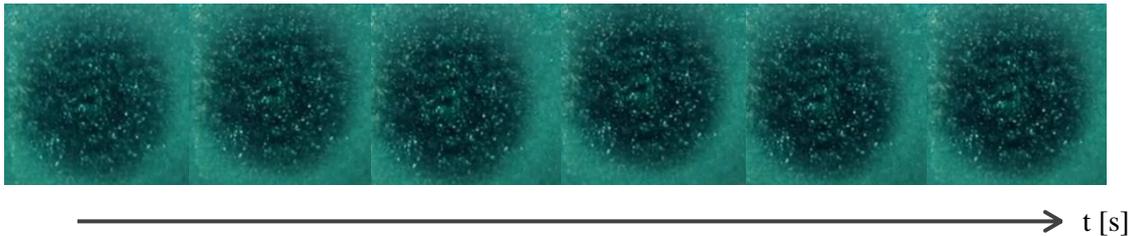


Figura 4.47 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.

4.6.2 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO TRIAXIAL

Utilizaram-se duas técnicas para visualizar os campos no equipamento para aplicação de campo magnético triaxial: as partículas de ferro e o filme de visualização de campo magnético. Na Figuras 4.48 e 4.49 apresentam-se vários *frames* retirados dos vídeos produzidos.

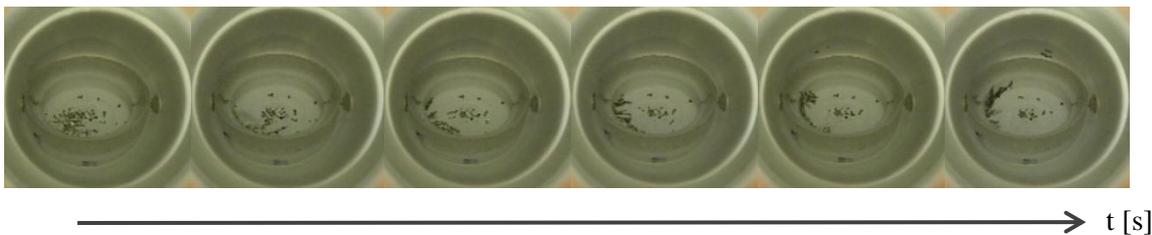


Figura 4.48 - Visualização do campo ao longo do tempo com partículas de ferro.

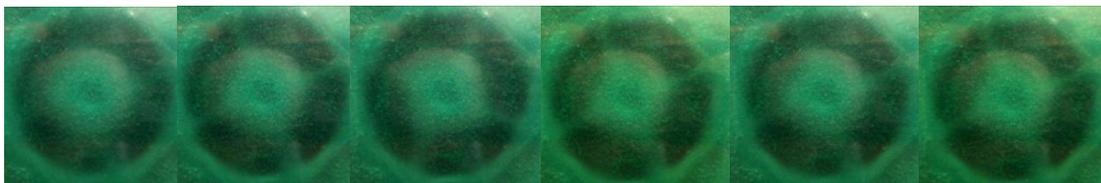


Figura 4.49 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.

4.6.3 EQUIPAMENTO PARA APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PERMANENTE TRIAXIAL

Neste equipamento, apenas foi possível utilizar a técnica de filme de visualização de campo magnético, porque a grande intensidade gerada pelos ímanes, caracterizada no ponto 4.5.5, atraiu imediatamente as partículas de ferro e o ferrofluido para a superfície dos ímanes, impossibilitando assim a visualização do campo magnético na zona de colocação do provete. Na Figura 4.50 apresentam-se vários *frames* retirados dos vídeos produzidos.



Figura 4.50 - Visualização do campo ao longo do tempo com filme de visualização de campo magnético.

5. MODELAÇÃO ANALÍTICA DO COMPORTAMENTO DAS BACTÉRIAS

5.1 INTRODUÇÃO

Conforme referido anteriormente, os trabalhos de Bruno Mateus [2] e Diogo de Carvalho [3] demonstraram experimentalmente que a utilização de campos magnéticos ou eléctricos durante a fase de penetração da bactéria melhora os resultados obtidos, nomeadamente verificou-se que existe uma maior penetração das bactérias em superfícies rugosas e que é possível diminuir o limiar de detectabilidade dos defeitos, ou seja, é possível detectar defeitos de menor dimensão. Atribui-se este resultado ao facto de as bactérias com propriedades magnéticas ou eléctricas sofrerem uma mobilidade adicional resultante das forças a que estão sujeitas, devido aos campos aplicados. Com efeito, se existir uma agitação das bactérias sobre as zonas de micro-defeitos, combinado com força de direcção vertical, é expectável que uma maior quantidade de bactérias penetre nos defeitos, aumentando a capacidade de detecção de defeitos menores. É também expectável que a utilização de campos eléctricos ou magnéticos com diferentes parâmetros tenha efeito sobre os resultados finais, isto é, deverão existir valores óptimos de intensidade, direcção e frequência dos campos aplicados. Contudo, este conhecimento processual e os aspectos fenomenológicos associados são desconhecidos. Existe alguma evidência experimentais de que frequência da ordem de 4 – 20 Hz e forças perpendiculares à superfície do provete são os parâmetros que estão na base dos melhores resultados.

Neste contexto, o desenvolvimento de modelos analíticos e numéricos do comportamento dinâmico da bactéria é uma tarefa de extrema importância para ajudar a compreender e justificar os resultados experimentais, mediante um adequado conhecimento fenomenológico dos mecanismos de mobilidade das bactérias durante a fase de penetração. Por outro lado, os

modelos analíticos e numéricos permitem prever os efeitos que a alteração de parâmetros terá no resultado final do ensaio, e desta forma, determinar os parâmetros óptimos para cada situação de inspecção.

No âmbito do presente trabalho, pretende-se lançar as bases para o desenvolvimento de tais modelos. O modelo analítico proposto consiste em estabelecer uma analogia entre a vibração forçada amortecida de uma partícula e a dinâmica das bactérias em meio aquoso sujeitas a forças harmónicas eléctricas ou magnéticas. Desta forma será possível conhecer a posição da bactéria em função do tempo $x(t)$ para diferentes parâmetros do ensaio, nomeadamente: dimensão e massa das bactérias, viscosidade do fluido, intensidade e frequência dos campos aplicados. Deve referir-se que para este propósito são indispensáveis os valores da intensidade do campo em cada direcção X,Y, Z medidos experimentalmente, conforme descrito no capítulo anterior

O modelo numérico, actualmente num estado incipiente, consiste em simular algumas propriedades dos campos em função de alguns parâmetros geométricos, designadamente pretende-se conhecer a intensidade, extensão e perturbação desses campos juntos aos provetes a ensaiar. Pretende-se lançar as bases para a simulação das forças a que as bactérias estão sujeitas nesses campos e a sua respectiva trajectória em função do tempo.

5.2 SIMULAÇÃO ANALÍTICA

5.2.1 MODELO DA BACTÉRIA

Um dos objectivos deste trabalho consistiu na simulação do comportamento da bactéria, dado que se concluiu que era necessário criar um modelo para aprofundar o conhecimento nesta área. O movimento da bactéria é afectado por vários parâmetros de ensaio, como a frequência do campo, a sua intensidade e o tempo de exposição ao campo. Um melhor conhecimento do movimento da bactéria permite seleccionar os melhores parâmetros referidos de forma objectiva.

A modelação dinâmica do comportamento das bactérias terá duas componentes: a simulação analítica e a numérica. Foi realizada uma primeira abordagem ao problema e proposto um modelo analítico para o movimento das bactérias.

Forma da bactéria

Existem várias morfologias de bactérias e estas estão divididas segundo a sua forma. O primeiro grupo é constituído por bactérias esféricas, *cocci*, e o segundo por bactérias elipsoidais, *Bacilli*. Para efeito do estudo pretendido, existem 4 formas com particular interesse, a forma *coccus*, *Staphylococci*, *coccobacillus* e *bacillus* conforme se representa na Figura 5.1

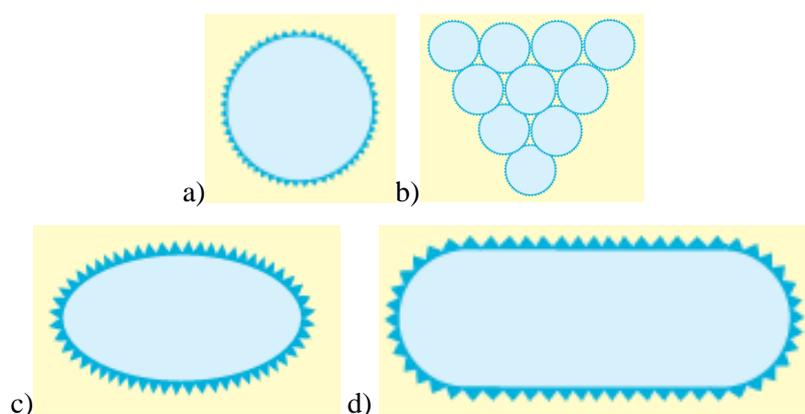


Figura 5.1 – Morfologias das bactérias: a) *Coccus*, b) *Staphylococci*, c) *Coccobacillus*, d) *Bacillus*.

Densidade da bactéria

Para efeitos de simulação são considerados dois modelos de densidade para a bactéria. O primeiro modelo baseia-se no facto de a bactéria ser constituída em todo o seu volume por água e, no segundo modelo, foi considerado que a bactéria é constituída por água e ferro, definindo-se as proporções de ferro e água consoante os resultados da simulação. Estes modelos têm

particular interesse para se definir a intensidade das forças a aplicar sobre a bactéria, que está implicitamente relacionada com a intensidade do campo magnético e campo eléctrico. Na Figura 5.2 são representados os dois tipos de modelos simplificativos da densidade da bactéria.

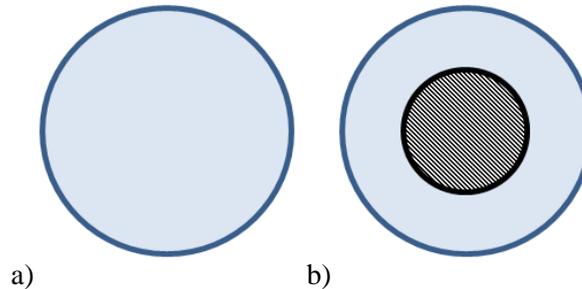


Figura 5.2 - Modelos de densidade da bactéria: a) 1º Modelo, b) 2º Modelo.

5.2.2 FORÇAS APLICADAS

Forças externas

As forças externas aplicadas sobre a bactéria são produzidas pelo campo magnético e pelo campo eléctrico, daí que se considere que as forças existentes sobre a bactéria são forças magnéticas e forças eléctricas. Apresentam-se as intensidades e frequências que os equipamentos existentes conseguem gerar.

Campo eléctrico: $\Delta V = [0 - 10\ 000]$ V
 $d = [0 - 0,03]$ m

Campo magnético: $B = [0 - 3000]$ Gauss
 $f = [0 - 100]$ Hz
 Onda quadrada e sinusoidal

Força de atrito

Pelo facto de as bactérias se tratarem de partículas de pequena dimensão, moverem-se num fluido viscoso contínuo e com baixo número de Reynolds, a força de atrito é obtida pela lei de Stokes, em que F_a [N] é a força de atrito, r [m] é o raio da bactéria, μ [N.s/m²] é a viscosidade dinâmica e v [m/s] é a velocidade da bactéria.

$$F_a = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot v \quad (5.1)$$

5.2.3 MODELO PROPOSTO

Para melhorar o entendimento da interacção das bactérias com os parâmetros em cada ensaio foi necessário criar um modelo analítico. A bactéria foi aproximada a uma carga pontual, sujeita a força magnética ou eléctrica, força de atrito e força de inércia.

No diagrama de forças da Figura 5.3, identificam-se as principais forças exercidas sobre a bactéria.

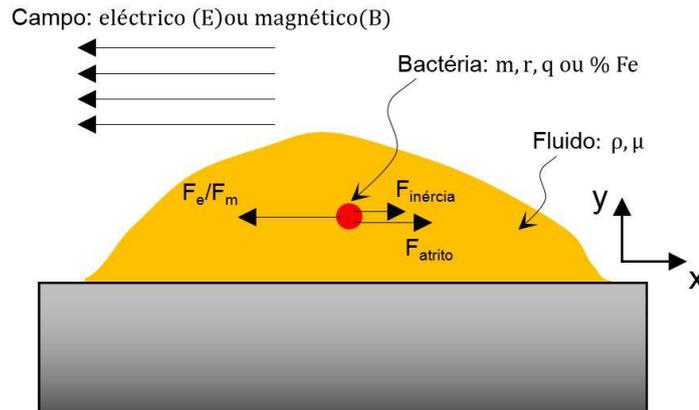


Figura 5.3 - Diagrama de forças.

No diagrama da Figura 5.3, a força que promove o movimento da bactéria foi identificada como força F , que pode ser eléctrica ou magnética, dependendo do equipamento e do tipo de bactéria utilizado, visto que existem bactérias com carga eléctrica positiva ou negativa, ou ainda com propriedades magnéticas. Existem duas forças que se opõem ao movimento: a força de atrito e a força de inércia. Nenhuma outra força foi considerada neste modelo.

Uma vez identificadas as forças que actuam na bactéria, foi possível escrever a equação de equilíbrio de forças, em que F [N] é a força externa, ω [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] é a frequência de excitação, t [s] é o tempo, r [m] é o raio de Stokes, μ [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] é a viscosidade dinâmica, \dot{x} [m/s] é a velocidade, m [kg] é a massa da partícula e \ddot{x} [m/s^2] é a aceleração da partícula:

$$-F \cdot \sin(\omega t) + m \cdot \ddot{x} + 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot \dot{x} = 0 \quad (5.2)$$

Reorganizando a Equação 5.2:

$$m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = F \cdot \cos(\omega t) \quad (5.3)$$

A equação obtida é a equivalente à equação da vibração forçada amortecida. Desse modo a equação pode ser simplificada para forma:

$$A \cdot x''(t) + B \cdot x'(t) = C \cdot \cos(\omega t) \quad (5.4)$$

Onde:

$$A = m; B = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu; C = F;$$

Resolvendo a equação diferencial de 2ª ordem temos:

$$x(t) = \frac{B \cdot C \cdot \sin(\omega t) - A \cdot C \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{A^2 \cdot \omega^3 + B^2 \cdot \omega} + \frac{A \cdot c_2 \cdot e^{\frac{-B \cdot t}{A}}}{B} + c_1 \quad (5.5)$$

Admitindo condições iniciais:

$$M \cdot x''(t) + C \cdot x'(t) = Q \cdot \cos(\omega t); x(0) = 0; x'(0) = 0$$

A amplitude do movimento da bactéria é:

$$x(t) = \frac{-C^2 \cdot Q \cdot \cos(\omega t) C^2 \cdot Q + C^2 \cdot Q - M^2 \cdot Q \cdot \omega^2 \cdot e^{\frac{-C \cdot t}{M}} - C \cdot M \cdot Q \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + M^2 \cdot Q \cdot \omega^2}{C^3 \cdot \omega + C \cdot M^2 \cdot \omega^3} \quad (5.6)$$

Com o conhecimento da equação que define a amplitude do movimento da bactéria é possível prever e entender o efeito dos parâmetros no movimento da bactéria.

Na fase inicial da simulação, para interpretar o movimento das bactérias, foi assumido que a massa da bactéria é composta por 99,5% de água e 0,5% de ferro. Admitiu-se ainda que a bactéria tem uma forma esférica de 1µm de diâmetro, inserida num meio aquoso com viscosidade e densidade igual à da água, sujeita a uma força magnética, descrita no ponto 2.11.

O valor da força magnética exercida sobre a bactéria foi obtido analiticamente, em função da intensidade do campo magnético, para uma distância de 1,7 mm da bactéria ao solenóide, tendo sido representada a força para 3 percentagens de massa de ferro presente na bactéria. Na Figura 5.4 representa-se a força exercida sobre a bactéria em função do campo magnético aplicado por um solenóide.

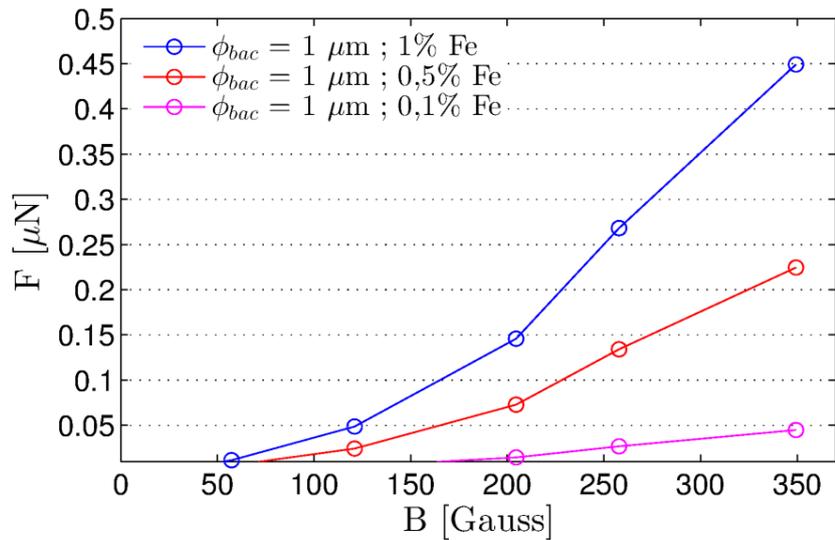


Figura 5.4 - Gráfico da força exercida sobre a bactéria em função do campo magnético gerado por solenóide.

Com o conhecimento da força exercida sobre a bactéria e de todas as outras variáveis, substitui-se na Equação 5.6, obtendo-se a posição da bactéria em função do tempo, conforme se representa na Figura 5.5.

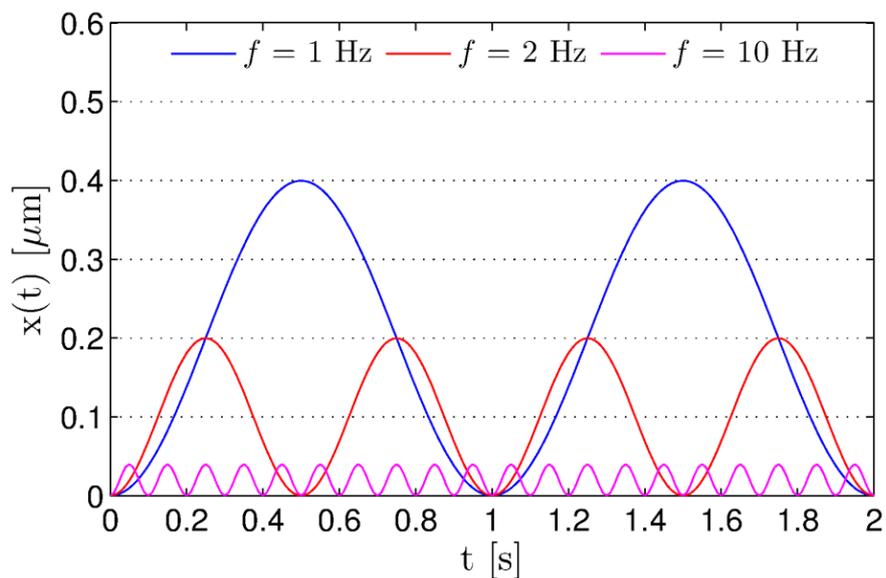


Figura 5.5 – Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$.

Foi realizada também a simulação analítica do movimento da bactéria para quando os campos magnéticos são gerados por ímã permanente. Para esta situação, representam-se na Figura 5.6 a força exercida sobre a bactéria para 3 percentagens de ferro na bactéria.

Novamente, substituiu-se a força magnética na Equação 5.6 e obteve-se a posição da bactéria em função do tempo, como se representa na Figura 5.7

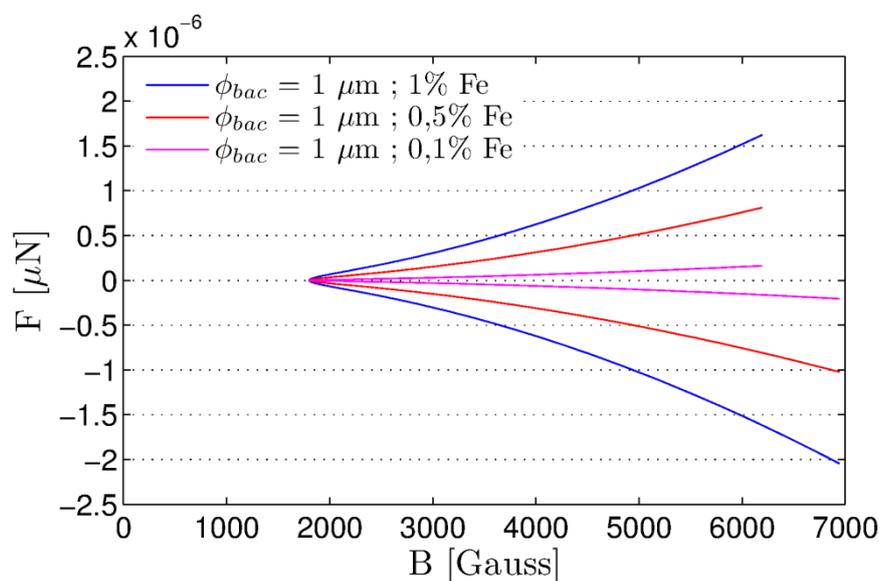


Figura 5.6 - Gráfico da força exercida sobre a bactéria em função do campo magnético gerado por ímãs permanentes.

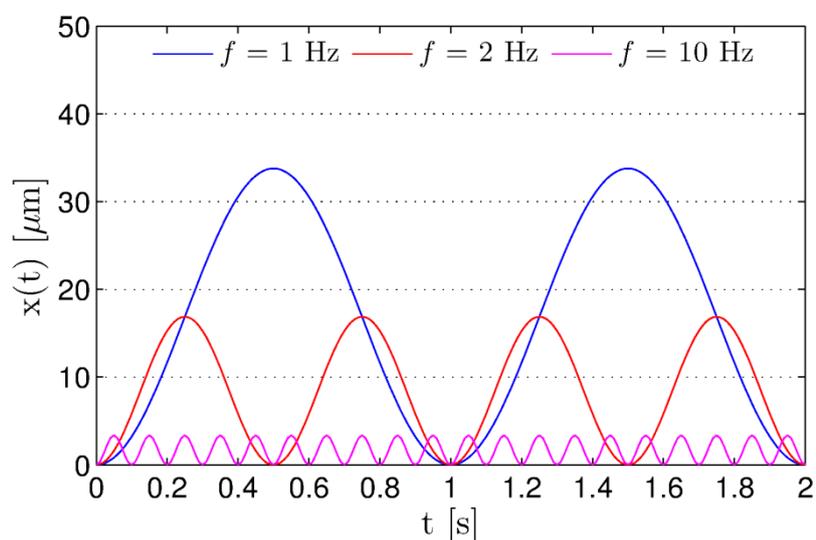


Figura 5.7 - Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força magnética gerada por ímã permanente.

Conclui-se que a amplitude do movimento foi cerca de 100 vezes superior para o campo aplicado com ímãs permanentes do que no caso do solenóide e que não é aconselhado colocar o provete na zona central entre os ímãs, porque, apesar de o campo magnético não ser nulo, a

força magnética é nula dado que o produto do campo com a derivada do campo no espaço nesse ponto é zero.

Outro resultado pretendido era simular a força eléctrica exercida sobre a bactéria quando sujeita a um campo eléctrico. Foram estimados três valores para a carga eléctrica da bactéria. Na figura 5.8 apresenta-se o gráfico da força em função do campo eléctrico. Substituindo o valor da força na Equação 5.6, obtêm-se a posição da bactéria em função do tempo.

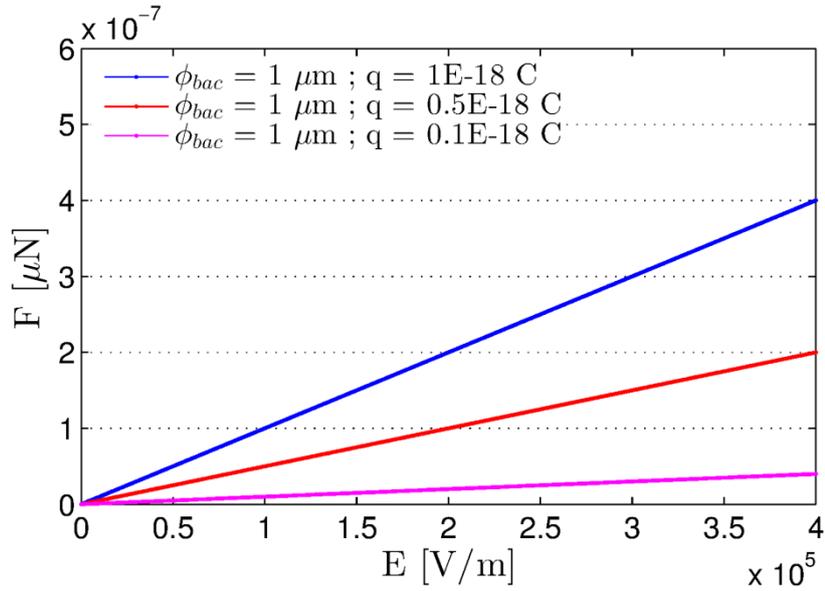


Figura 5.8 – Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força eléctrica

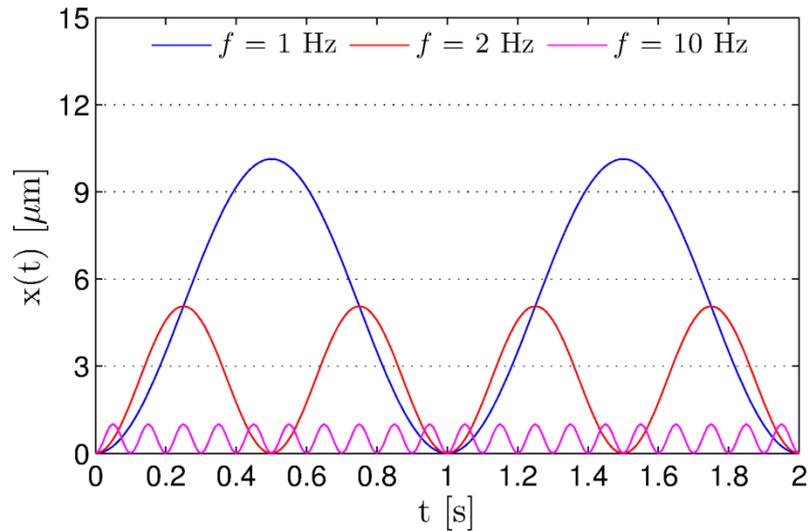


Figura 5.9 - Amplitude do movimento da bactéria em função do tempo $x(t)$ para força eléctrica.

5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO ELÉCTRICO

5.3.1 MODELO DO CONDENSADOR PLACAS PLANAS PARALELAS

O equipamento utilizado para aumentar a mobilidade da bactéria com campo eléctrico é o equipamento de campo eléctrico horizontal e vertical, desenvolvido no trabalho de Bruno Mateus [4]. Foi produzido um condensador de placas planas paralelas, em que o material dieléctrico entre as placas é o ar. Utilizaram-se duas placas quadradas de alumínio, com 3 mm de espessura, 55 mm de lado e uma distância variável entre as placas de 0 a 30 mm. Apresenta-se na Figura 5.5 o esquema do condensador.

Este tipo de configuração cria uma distribuição uniforme do campo eléctrico no volume de ar entre as placas, enquanto nos bordos das placas existem umas não uniformidades.

Para efeitos de simulação, foi considerada uma diferença de potencial entre as placas de 8 kV, em que uma placa está ao potencial 0V e outra tem um potencial 8 kV.

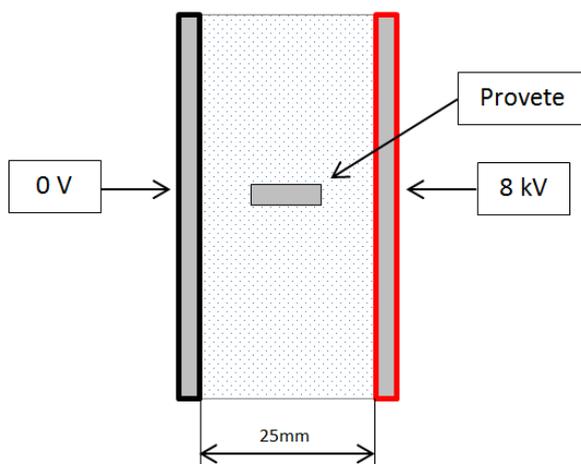


Figura 5.10 - Configuração do modelo

Para caracterizar a perturbação provocada pelo provete, foi considerado que o provete se encontra no centro do condensador, com 10x10x3 mm de dimensão. Foram assumidos 3 tipos de materiais do provete para as simulações. O primeiro material consiste num perfeito condutor eléctrico, que simula a presença de materiais como o cobre e alumínio, que têm uma boa condutibilidade eléctrica. Para o segundo material foi assumido que o material é isolante e que tem uma constante dieléctrica idêntica à dos polímeros em geral. Por último, considerou-se que o provete era constituído por ar, permitindo avaliar o campo eléctrico sem perturbações devido ao provete.

Como o modelo em estudo é um problema electrostático, foi utilizado um *software* de elementos finitos dedicado à simulação de problemas estáticos e de baixa frequência.

Uma malha com elementos tetraédricos foi usada com dimensão mínima de 1,11 mm e máxima de 5,76 mm, tendo resultado cerca de 360 000 elementos no total, conforme se representa na Figura 5.11

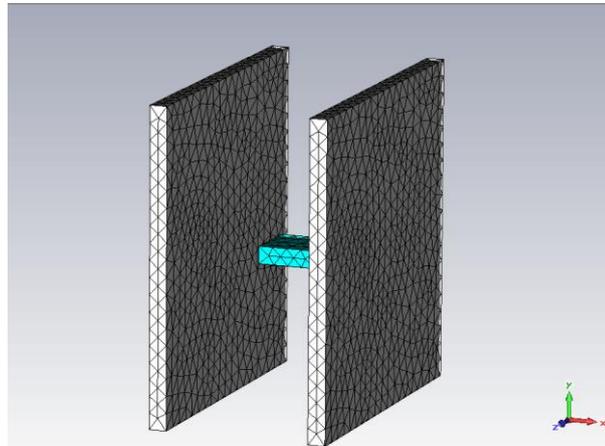


Figura 5.11 – Visualização da malha tetraédrica do modelo

5.3.2 RESULTADOS

Um dos objectivos desta simulação foi conhecer o campo eléctrico (intensidade e extensão) entre as placas, de modo a avaliar a existência ou não de perturbação do campo quando é colocado um provete no centro das placas. A simulação com o provete de ar, ou seja, sem provete foi considerada a referência para comparação. Apresentam-se na Figura 5.12 à 5.14 a distribuição de potencial eléctrico do condensador.

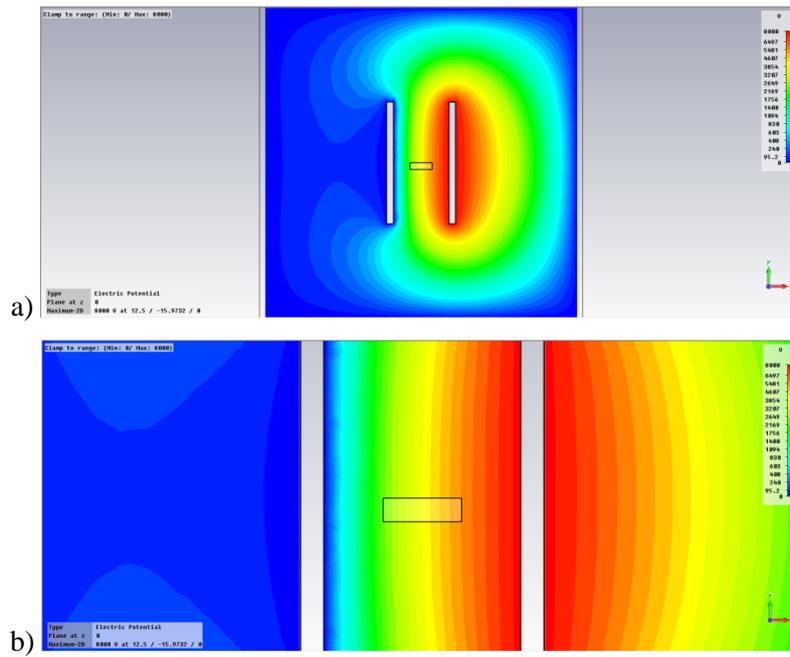


Figura 5.12 – Potencial eléctrico com provete em ar: a) Vista geral, b) Vista de pormenor.

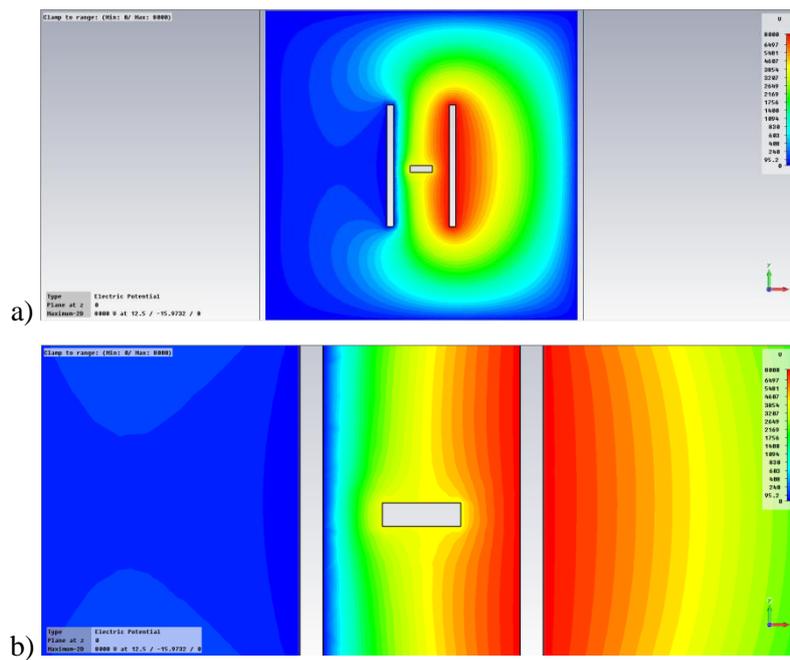


Figura 5.13 - Potencial eléctrico com provete em perfeito condutor eléctrico: a) Vista geral, b) Vista de pormenor.

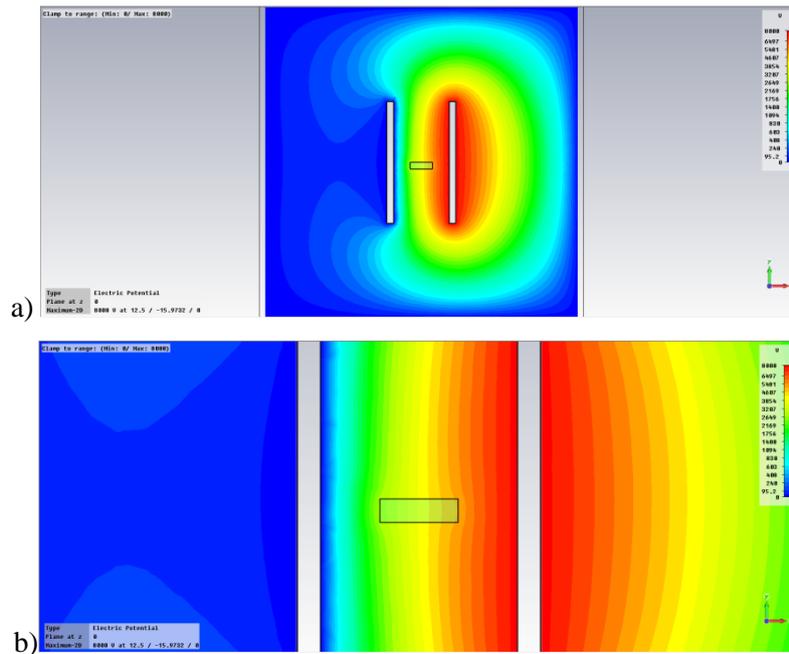


Figura 5.14 - Potencial eléctrico com provete de material isolante ($\epsilon=3$):
a) Vista geral, b) Vista de pormenor.

Conclui-se então que o campo eléctrico entre as placas para o caso do provete de ar é linear, não se observando o mesmo resultado nas outras simulações com diferentes materiais. Para o caso do provete em material perfeito condutor eléctrico, verificou-se a maior perturbação no campo eléctrico, devendo-se à definição de condutor eléctrico, onde as cargas eléctricas movem-se livremente no interior do material, o que origina o mesmo potencial em todo o volume do provete. No caso do provete em material isolante, o campo foi ligeiramente afectado, devido a imobilização das cargas eléctricas no interior deste tipo de materiais.

Outro resultado pretendido com a simulação numérica foi o conhecimento das linhas de campo eléctrico no interior do condensador, bem como a definição de uma zona onde o campo é uniforme e onde não existe uniformidade. Apresentam-se nas Figuras 5.15 a 5.17 os resultados obtidos para o caso descrito:

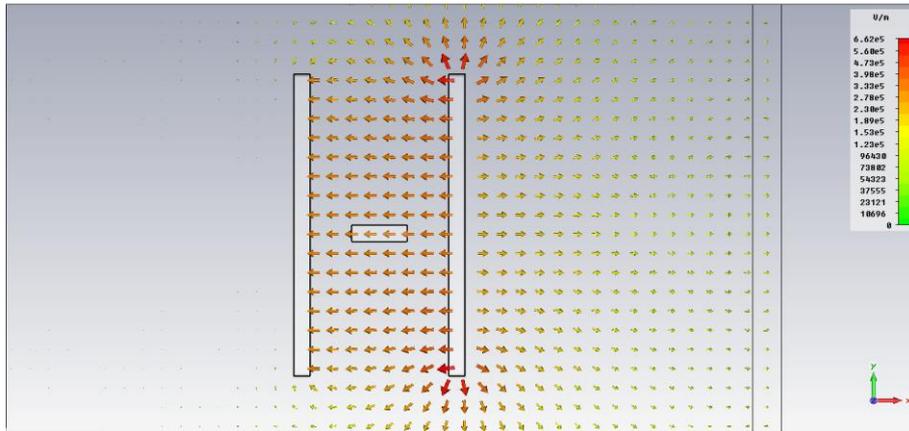


Figura 5.15 – Linhas campo eléctrico com provete de ar.

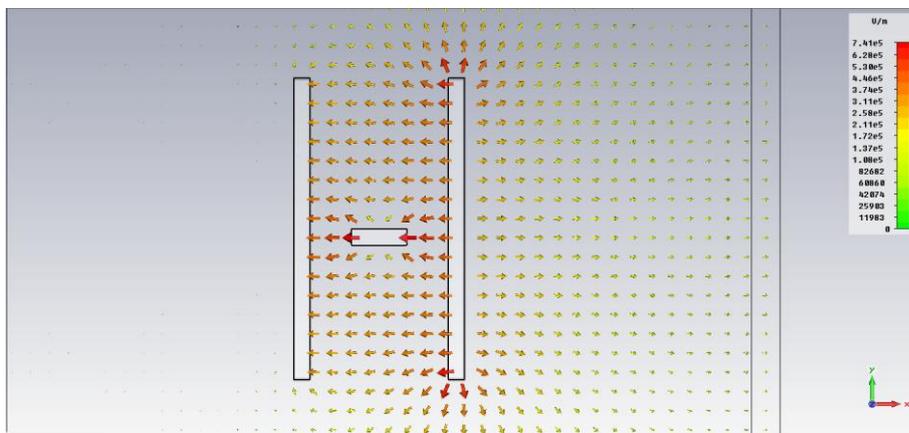


Figura 5.16 - Linhas campo eléctrico com provete de perfeito condutor eléctrico.

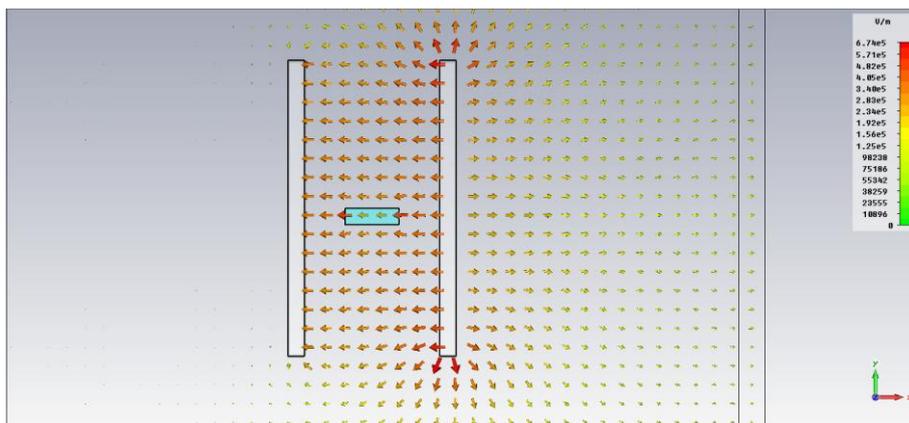


Figura 5.17 - Linhas campo eléctrico com provete de material isolante.

Na simulação do provete de ar, o campo eléctrico é aproximadamente uniforme em todo o volume. O efeito de bordo só exerce efeito significativo a uma distância muito próxima do bordo, observando-se maior intensidade de campo nas arestas das placas. Para o modelo com provete de material perfeito condutor eléctrico as linhas de campo eléctrico são afectadas pelo provete, existindo linhas de campo a fechar para o provete. Não existe campo eléctrico no

interior do provete, porque todas as cargas eléctricas se encontram no mesmo potencial eléctrico. Para o provete em material isolante, existe uma ligeira perturbação das linhas devido ao material polarizar à superfície, não possuindo o mesmo potencial em todo o seu volume. Por isso, para o caso do material isolante existe campo eléctrico no interior do provete.

6. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

6.1 INTRODUÇÃO

Após os desenvolvimentos experimentais e instrumentação do equipamento, e com o conhecimento recentemente adquirido acerca dos campos magnéticos e eléctricos, inicia-se a fase da validação experimental. Foram produzidos vários provetes com defeitos padrão em novos materiais, para além do alumínio AA1100, aço inox 304 e cobre já testados em trabalhos anteriores, nomeadamente o titânio, NiTi, chumbo, magnésio AZ31, Grafite IC5, fibra de carbono e GLARETM (§6.2). Testaram-se provetes de ensaios de tracção uniaxial produzidos por *powder injection moulding* com defeitos reais (§6.3). Os provetes foram testados com a técnica END utilizando células bacterianas e posteriormente avaliados (§6.5) Os defeitos nos provetes produzidos por *powder injection moulding* foram identificados no microscópio electrónico de varrimento (§6.6).

6.2 FABRICO DE PROVETES COM DEFEITOS PADRÃO

Os novos materiais testados têm especial interesse por serem materiais com elevada procura em novas aplicações industriais. As principais propriedades físicas, mecânicas, eléctricas, magnéticas e térmicas são apresentadas na Tabela 6.1 [35].

Tabela 6.1 - Propriedades dos materiais.

Propriedades								
Materiais	Físicas	Mecânicas				Eléctricas	Magnéticas	Térmicas
	Densidade [kg/m ³]	Dureza Vickers	Tensão de Ruptura [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Conductivida de eléctrica [S.m]	Permeabilida de magnética	Conductividad e térmica [W/m·K]
AA – 1100	2700	105	110	75	68,9	3,3x10 ⁷	1.000022	220
Aço 304	8000	250	505	215	193	1,38 x10 ⁶	1,020	16,2
Cobre	8930	50	210	33,3	110	5.88x10 ⁷		385
Ti-6Al-4V	4510	223	344	276 - 448	103	1,92 x10 ⁶	1,00005	16.4
NiTi	6450	369	754 -960	100	28	1,32 x10 ⁶		10
Chumbo	11350	6,5	18	14		4,84 x10 ⁶		33
Magnésio AZ31	1770	63	290	220	45	1,08 x10 ⁷		96

Os provetes produzidos seguiram a mesma metodologia adoptada na tese de Diogo Carvalho [3], na qual os provetes são previamente polidos, tornando a superfície o mais plana possível, para garantir a mesma condição superficial junto dos defeitos produzidos. As cargas do indentador variam entre 0,01 Kg e 1Kg, tendo sido estabelecida uma relação com o tamanho do defeito produzido. Assim, A é o maior defeito, enquanto H é o menor, conforme se descreve na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Escala de dimensão dos defeitos

Carga [Kg]	1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,01
Defeito	A	B	C	D	E	F	G	H

Em cada provete foram criadas 2 matrizes, conforme se representa na Figura 6.1

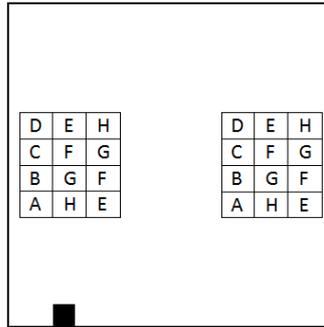


Figura 6.1 –Matriz de indentações

O tipo de defeito criado pelo indentedor tem a forma de uma pirâmide com base quadrada, denominada pirâmide de Vickers. Para obter a dureza do material, seria necessário medir a diagonal da pirâmide e assim obter um valor de dureza. No caso da criação de defeitos com o indentedor, os defeitos seriam caracterizados através das diagonais. No entanto, neste caso, para a caracterização do defeito optou-se por indicar a dimensão do lado (L) e da profundidade (P). É possível obter uma relação entre o lado (L [μm]) da base com a profundidade (P [μm]) sabendo que as faces opostas têm um ângulo entre elas de 136 °, resultando na seguinte relação:

$$L = P \cdot 2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{136}{2}\right) \quad (5.1)$$

A forma do defeito padrão é apresentada na Figura 6.2 [36].

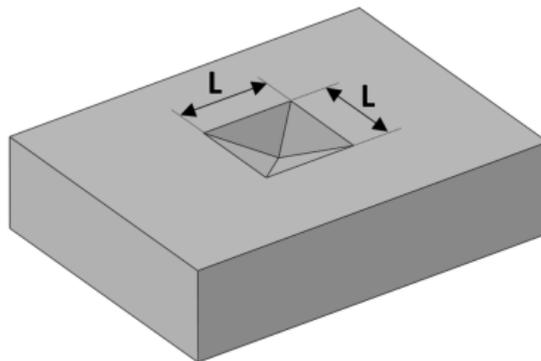


Figura 6.2 - Forma do defeito padrão.

A Tabela 6.2 indica as dimensões L e P de cada uma das indentações produzidas com as diferentes cargas nos vários materiais ensaiados.

Tabela 6.3 – Dimensão dos defeitos nos diferentes materiais.

Material		Dimensões do defeito							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Alumínio	L [μm]	94,71	67,41	51,87	42,50	29,86	21,46	15,74	8,42
	P [μm]	19,1	13,6	10,5	8,6	6,0	4,3	3,2	1,7
Aço Inox	L [μm]	62,48	41,06	32,10	27,08	17,68	13,93	9,65	5,71
	P [μm]	12,6	8,3	6,5	5,5	3,6	2,8	1,9	1,2
Cobre	L [μm]	103,9	74	57,3	47,1	33,4	24,6	17,3	9,7
	P [μm]	21,0	15	11,6	9,5	6,8	5,0	3,5	2,0
Titânio	L [μm]	71,5	49,7	37,8	30,5	21,1	13,9	9,1	5,5
	P [μm]	14,4	10,0	7,6	6,2	4,3	2,8	1,8	1,1
NiTi	L [μm]	53,4	36,2	27,3	22,2	15,8	11,3	7,8	3,9
	P [μm]	10,8	7,3	5,5	4,5	3,2	2,3	1,6	0,8
Chumbo	L [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0	126,7	87,3	54,6	30,5
	P [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0	25,6	17,6	11,0	6,2
Magnésio	L [μm]	121,9	86,9	65,8	55,0	36,6	27,0	19,4	10,6
	P [μm]	24,6	17,6	13,3	11,1	7,4	5,5	3,9	2,1
GLARE	L [μm]	80,5	57,6	43,2	35,2	23,8	18,1	12,8	7,0
	P [μm]	16,3	11,6	8,7	7,1	4,8	3,7	2,6	1,4

Apresenta-se na Figura 6.3 os provetes produzidos nos novos materiais.

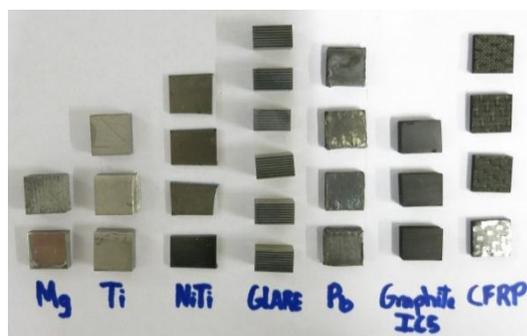


Figura 6.3 – Provetes produzidos em diferentes materiais

6.3 PROVETES DE ENSAIO DE TRACÇÃO

Para além dos defeitos padrão descritos no ponto anterior, foram fornecidos provetes de ensaios de tracção uniaxial em aço 304 produzidos por *powder injection moulding* (PIM) pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. O objectivo foi caracterizar os defeitos existentes nos provetes previamente caracterizados através de imagem do microscópio electrónico de varrimento (SEM) com a técnica END utilizando células

bacterianas. Os provetes apresentam três tipos de acabamento superficial, nomeadamente lixa P2400, panos de 3 µm e sílica, existindo quatro provetes de cada tipo de acabamento. É apresentado na Figura 6.4 um exemplo de um provete de tracção uniaxial.



Figura 6.4 – Exemplo de um provete fornecido.

6.4 BACTÉRIAS

A escolha apropriada das características das bactérias torna-se essencial para que um ensaio com um determinado equipamento reproduza bons resultados. As propriedades das bactérias utilizadas para os ensaios com equipamento são apresentadas na Tabela 6.4 [3]:

Tabela 6.4 - Propriedades das bactérias utilizadas nos ensaios laboratoriais.

Nome	Gram	Dimensão (µm)	Prop. Eléctrica/Magnética	Condições de sobrevivência	Tensão superficial do meio (mN/m)	Fonte de Carbono
<i>R. erythropolis</i>	Positiva	0,92	Eléctrica	24 °C – 35 °C	22 (Crescida em hexadecano)	Etanol ou Hexadecano
<i>S. aureus</i>	Positiva	1,24	Magnética	8 °C – 45 °C	n.d.	Glucose
<i>S. hominis</i>	Positiva	0,57	Magnética	24 °C – 35 °C	n.d.	Glucose

Nota: todas as bactérias apresentam morfologia *coccus* e temperatura ideal de 28 °C

6.5 ENSAIOS COM PROVETES PADRÃO

Foram realizados vários ensaios utilizando os materiais e bactérias descritos anteriormente para averiguar se a técnica é viável num leque de materiais mais abrangente.

Novos materiais, como o titânio, NiTi, GLARETM e liga de Magnésio AZ31, com forte interesse industrial, foram adicionados aos já previamente testados (aço inox, alumínio e cobre).

Os equipamentos utilizados para promover a penetração e mobilidade das bactérias na realização dos ensaios foram: o equipamento de aplicação de campo eléctrico e o novo equipamento de aplicação de campo magnético triaxial com ímanes permanentes, desenvolvido

no âmbito deste trabalho. A Tabela 6.3 descreve o plano de ensaios realizados, assim como o lado (L) e a profundidade (P) do menor defeito que foi possível detectar em cada ensaio. Os ensaios realizaram-se nas instalações do Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia (IBB) do Instituto Superior Técnico (IST). A Tabela 6.5 descreve o plano de ensaios realizados, assim como o lado (L) e a profundidade (P) do menor defeito que foi possível detectar em cada ensaio.

Da Tabela 6.6 à 6.15 são apresentados os ensaios, nos quais são comparados os resultados obtidos com os diferentes equipamentos, bem como com os diferentes tipos de bactérias. Os parâmetros dos ensaios foram constantes para todos os materiais, sendo prescrito $t = 4$ min e $\Delta V = 8$ kV para o equipamento de aplicação de campo eléctrico horizontal e vertical, e para o equipamento de aplicação de campo magnético permanente triaxial foi prescrito $t = 4$ min, com velocidade de rotação do íman vertical e do provete de 5 s por volta.

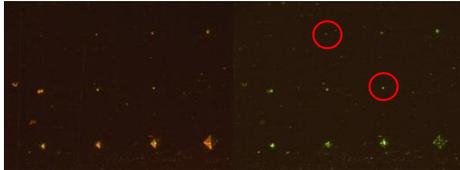
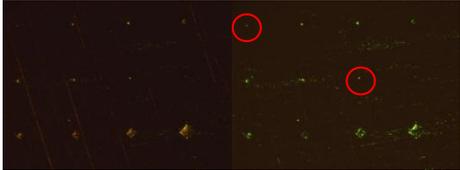
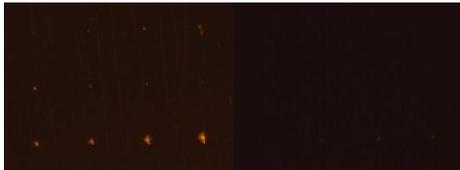
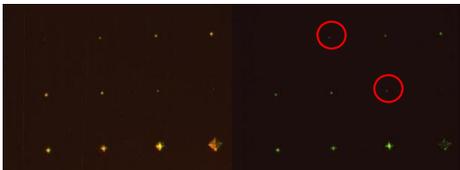
Note-se que todas os ensaios realizados sem campo(ϕ), devido a um incidente experimental, foram realizadas duas vezes no mesmo provete, pelo que se veio a verificar que os resultados melhoram, mas consequentemente, não se pode comparar em pé de igualdade com os ensaios com campos eléctricos e magnéticos.

Tabela 6.5 – Planificação dos ensaios efectuados e dimensão L [μ m] /P[μ m] do menor defeito detectado em cada ensaio.

Material	Bactéria											
	R. erythropolis +			R. erythropolis -			S. Aureus			S. Hominis		
	ϕ	E	B	ϕ	E	B	ϕ	E	B	ϕ	E	B
Aço Inox 304	27,08 5,5	27,08 5,5	17,68 3,6	13,93 2,8	13,93 2,8	5,71 1,2	-	-	-	-	-	-
Alumínio	-	15,74 3,2	29,86 6,0	-	15,74 3,2	*	-	-	*	-	-	*
Cobre	9,7 2,0	24,6 5,0	24,6 5,0	24,6 5,0	9,7 2,0	*	-	-	-	-	-	-
Fibra de Carbono	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
GLARE	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
Grafite IC5	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
Magnésio	-	36,6 7,4	27,0 5,5	-	*	*	-	-	-	-	-	-
NiTi	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
Chumbo	-	54,6 11,0	87,3 17,6	-	*	*	-	-	-	-	-	-
Titânio	13,9 2,8	13,9 2,8	37,8 7,6	9,1 1,8	21,1 4,3	9,1 1,8	-	-	*	-	-	*

Nota: ϕ – Sem campo, E – Campo eléctrico, B – Campo magnético, * - Ensaios inconclusivo.

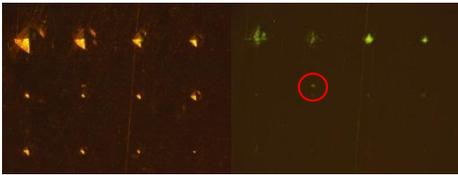
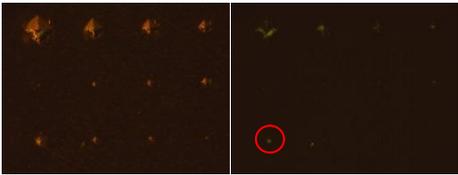
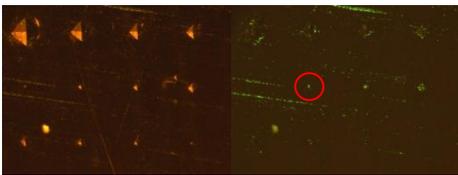
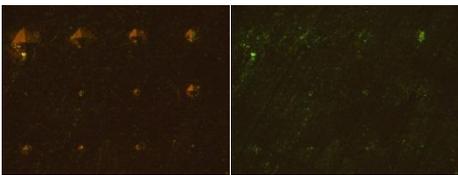
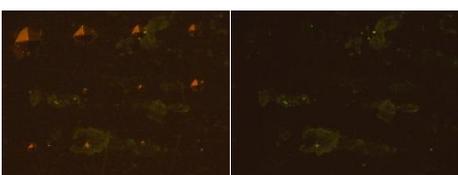
Tabela 6.6- Ensaio em provetes de aço inox.

Aço Inox	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R.</i> <i>erythropolis</i> +	 Fluorescence image showing bacterial activity under an electric field. A red circle highlights a small defect.	 Fluorescence image showing bacterial activity under a permanent triaxial magnetic field. A red circle highlights a small defect.
<i>R.</i> <i>erythropolis</i> -	 Fluorescence image showing bacterial activity under an electric field. Two red circles highlight defects.	 Fluorescence image showing bacterial activity under a permanent triaxial magnetic field. Two red circles highlight defects.
<i>R.</i> <i>erythropolis</i> + s/ campo	 Fluorescence image showing bacterial activity without any field.	 Fluorescence image showing bacterial activity under a permanent triaxial magnetic field. A red circle highlights a defect.
<i>R.</i> <i>erythropolis</i> - s/ campo	 Fluorescence image showing bacterial activity without any field. A red circle highlights a defect.	 Fluorescence image showing bacterial activity under a permanent triaxial magnetic field. Two red circles highlight defects.

Para o aço inox é visível que as bactérias com potencial eléctrico positivo apresentaram piores resultados do que as bactérias de potencial negativo, mas têm melhor resposta a campo eléctrico do que a campo magnético. O melhor resultado é conseguido com a bactéria de potencial negativo na presença de campo magnético permanente, em que os dois defeitos de menor dimensão, H, foram detectados. No campo eléctrico com a bactéria de potencial negativo o menor defeito detectado foi o G.

Ainda de destacar que foram obtidos resultados interessantes quando o provete não foi sujeito a nenhum tipo de campo, embora não sejam comparáveis aos obtidos com campo magnético ou eléctrico. Este tipo de abordagem permite-nos explorar a possibilidade de realizar vários ensaios no mesmo provete o que, até a data do ensaio, se desconhecia ser vantajosa. Com este procedimento verificou-se ainda que os resultados com a bactéria de potencial negativo tendem a ser melhores do que as positivas.

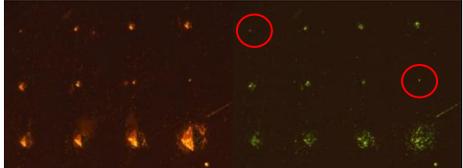
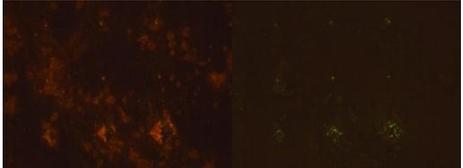
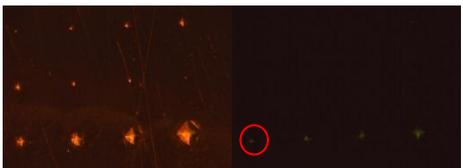
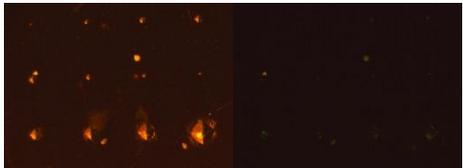
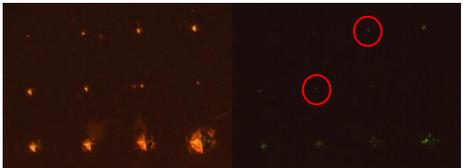
Tabela 6.7 Ensaio em provetes de alumínio.

Alumínio	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		
<i>S. Aureus</i>		
<i>S. Hominis</i>		

Nos ensaios com provetes de alumínio constatou-se novamente que a bactéria *R. erythropolis*, com potencial eléctrico positivo, obteve melhores resultados com o equipamento de campo eléctrico do que o magnético, não havendo desta vez uma grande diferença de resultados entre bactérias de potencial positivo e negativo. De facto, comparando com resultados de trabalhos anteriores, o limiar de detectabilidade ficou muito aquém do esperado.

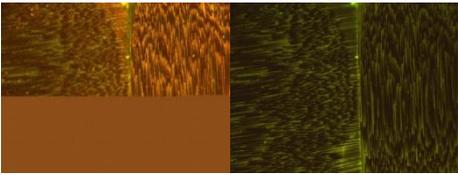
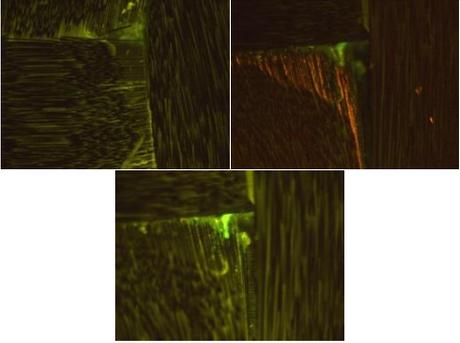
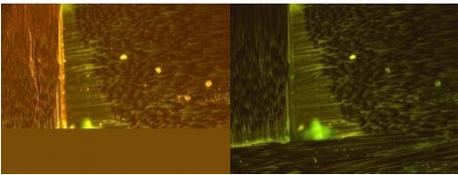
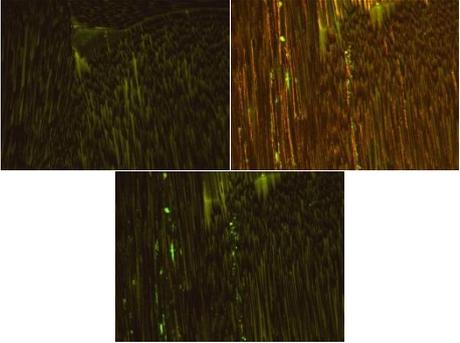
A utilização das bactérias *S. Hominis* e *S. aureus*, bactérias com propriedades magnéticas, não revelaram melhores resultados do que as bactérias eléctricas. As bactérias não entraram preferencialmente nos defeitos, observando-se muitas bactérias à superfície e pouca definição dos bordos dos defeitos.

Tabela 6.8 - Ensaio em provetes de cobre.

Cobre	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen under an electric field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. Two red circles highlight specific green spots on the right side.	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen under a triaxial permanent magnetic field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. Two red circles highlight specific green spots on the right side.
<i>R. erythropolis</i> -	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen under an electric field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. Two red circles highlight specific green spots on the right side.	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen under a triaxial permanent magnetic field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots.
<i>R. erythropolis</i> + s/ Campo	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen without any field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. One red circle highlights a specific green spot on the right side.	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen without any field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. One red circle highlights a specific green spot on the right side.
<i>R. erythropolis</i> - s/ Campo	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen without any field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots.	 Fluorescence image showing bacterial distribution on a copper specimen without any field. The image is split vertically. The left side shows orange and green spots, while the right side shows a higher density of green spots. Two red circles highlight specific green spots on the right side.

O uso de bactérias *R. erythropolis* negativas no equipamento de campo eléctrico no cobre revelou-se a melhor configuração de ensaio para o cobre. As bactérias preencheram todos os defeitos, o que é um resultado importante devido ao efeito antibacteriano do cobre. As bactérias positivas também demonstraram bons resultados, mas não tão eficazes e precisas como as negativas. Com a aplicação de campo magnético não se evidenciou bons resultados, havendo apenas um preenchimento ténue de bactérias nos defeitos maiores. Quando não se aplicou campo às bactérias, os resultados não foram muito satisfatórios, apenas o resultado do ensaio no equipamento de campo magnético revelou-se mais eficaz que o do equipamento do campo eléctrico. Este efeito pode dever-se à vibração existente na rotação do motor passo-a-passo.

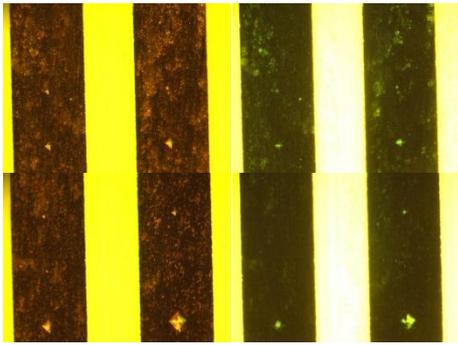
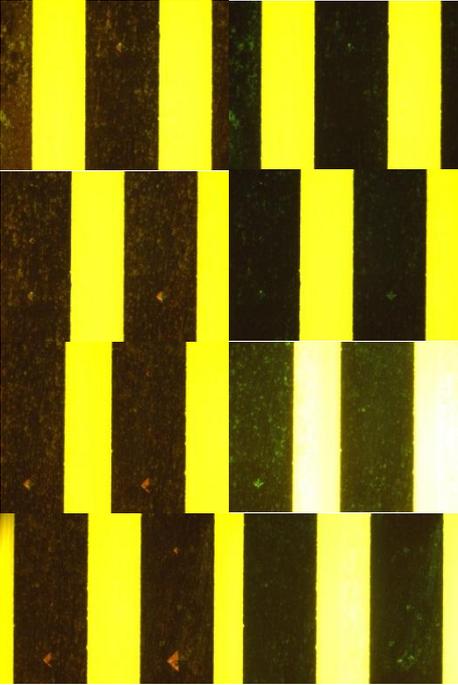
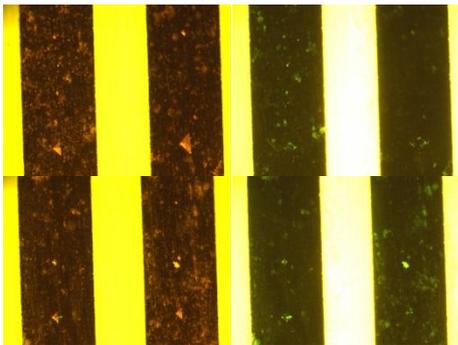
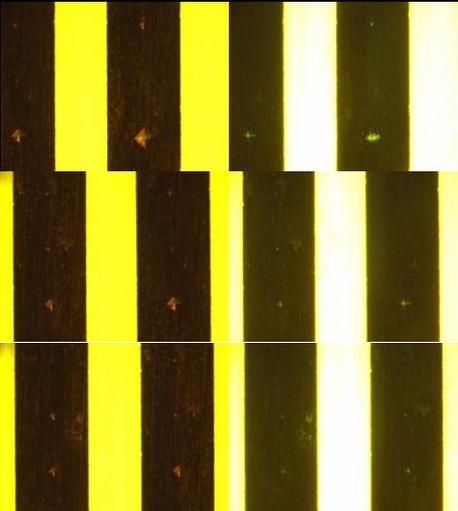
Tabela 6.9 - Ensaio em provetes de fibra de carbono.

Fibra de Carbono	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		

Eram expectáveis dificuldades na implementação da técnica de filme de células bacterianas na fibra de carbono, devido à sua especificidade. Durante o fabrico dos defeitos padrão, não foi possível visualizar as indentações ao microscópio prevendo-se assim dificuldade na localização dos defeitos utilizando as bactérias.

As bactérias alojam-se nos vazios criados pela malha da fibra, não detectando nenhum dos defeitos padrão. Observou-se uma alteração da fluorescência da resina devido ao contacto com as células bacterianas. Para um futuro ensaio, é imperativo testar numa fibra de carbono com malha mais reduzida, com o objectivo de avaliar se a técnica de filme de células bacterianas é viável ou não para este tipo de material.

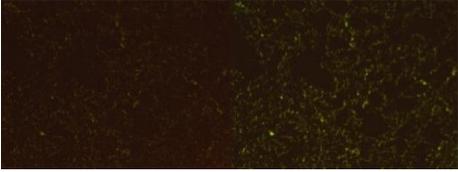
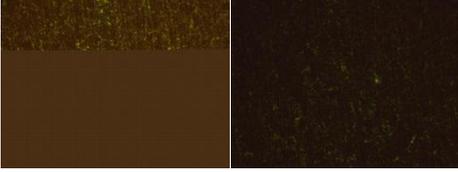
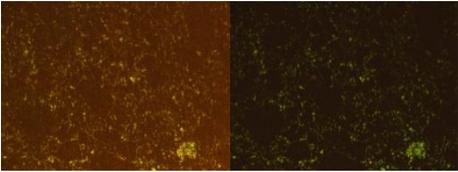
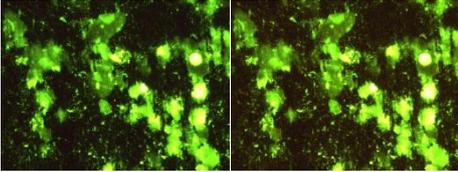
Tabela 6.10 - Ensaio em provetes de GLARE™

GLARE™	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +	 <p>Microscopy images showing the distribution of <i>R. erythropolis</i> + bacteria on a GLARE™ specimen under an electric field. The images are arranged in a 2x2 grid. The top-left image shows a dark background with some green spots. The top-right image shows a dark background with some green spots. The bottom-left image shows a dark background with some green spots. The bottom-right image shows a dark background with some green spots.</p>	 <p>Microscopy images showing the distribution of <i>R. erythropolis</i> + bacteria on a GLARE™ specimen under a triaxial permanent magnetic field. The images are arranged in a 2x2 grid. The top-left image shows a dark background with some green spots. The top-right image shows a dark background with some green spots. The bottom-left image shows a dark background with some green spots. The bottom-right image shows a dark background with some green spots.</p>
<i>R. erythropolis</i> -	 <p>Microscopy images showing the distribution of <i>R. erythropolis</i> - bacteria on a GLARE™ specimen under an electric field. The images are arranged in a 2x2 grid. The top-left image shows a dark background with some green spots. The top-right image shows a dark background with some green spots. The bottom-left image shows a dark background with some green spots. The bottom-right image shows a dark background with some green spots.</p>	 <p>Microscopy images showing the distribution of <i>R. erythropolis</i> - bacteria on a GLARE™ specimen under a triaxial permanent magnetic field. The images are arranged in a 2x2 grid. The top-left image shows a dark background with some green spots. The top-right image shows a dark background with some green spots. The bottom-left image shows a dark background with some green spots. The bottom-right image shows a dark background with some green spots.</p>

Utilizou-se GLARE™, um compósito de alumínio e fibra de vidro, com o propósito de compreender o movimento das bactérias quando presente numa superfície com dois materiais simultaneamente, e se existia uma preferência da bactéria por algum dos materiais. Para o caso de ser indiferente para bactéria a presença de dois materiais, pretendia-se observar se as bactérias presentes no provete apresentavam tendência de se alinhar longitudinalmente.

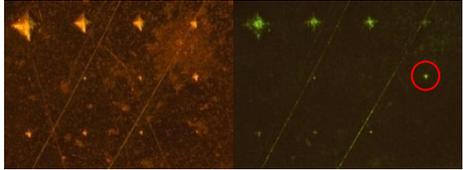
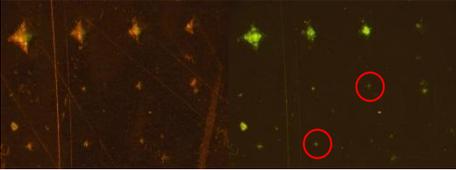
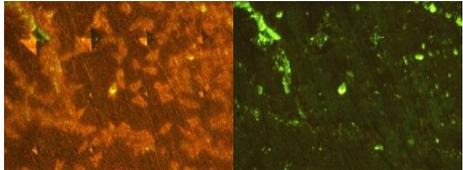
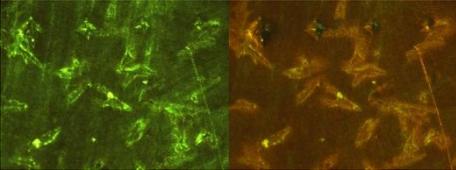
Verificou-se que as bactérias penetraram em alguns defeitos existentes no alumínio, mas não de uma forma eficaz, uma vez que, devido à rugosidade existente na superfície, entraram noutros defeitos existentes. Um resultado observado foi a mudança de fluorescência da fibra de vidro, que, após o ensaio, se alterou para o comprimento de onda próximo do corante das bactérias, impossibilitando a visualização de feitos na fibra de vidro. Os resultados foram inconclusivos em relação ao melhor tipo de bactéria para este material.

Tabela 6.11- Ensaio em provetes de grafite IC5.

Grafite IC5	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		

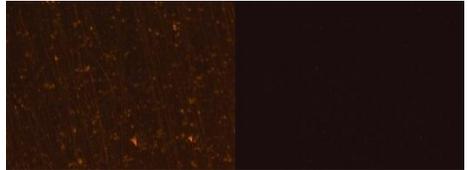
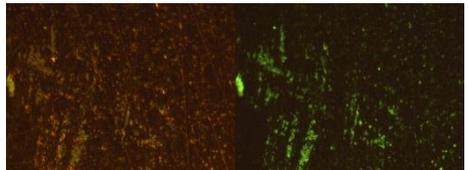
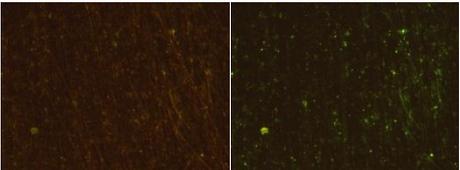
Na grafite previam-se dificuldades em detectar os defeitos padrão produzidos. De facto, nenhum dos defeitos criados foi detectado, ficando apenas a rugosidade revelada.

Tabela 6.12 - Ensaio em provetes de Magnésio.

Magnésio	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		

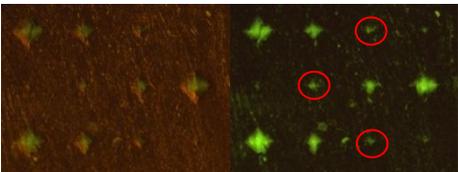
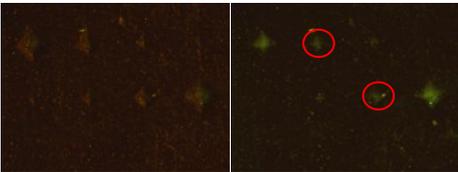
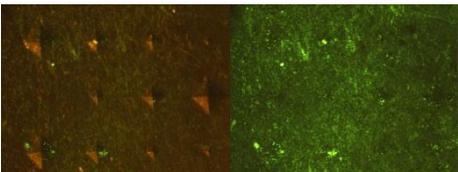
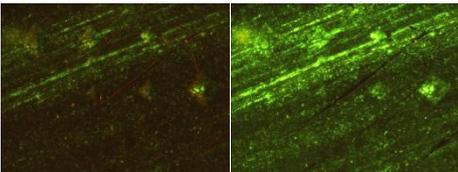
O primeiro resultado retirado dos ensaios no magnésio foi que as bactérias com carga negativa reagem com o magnésio, o que não acontece com as bactérias positivas. As bactérias positivas obtiveram um bom resultado com o campo magnético, tendo detectado o defeito F. Devido à grande reactividade do magnésio, o provete oxidou durante o tempo decorrido entre a sua produção e inspecção.

Tabela 6.13 - Ensaio em provetes de NiTi.

NiTi	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		

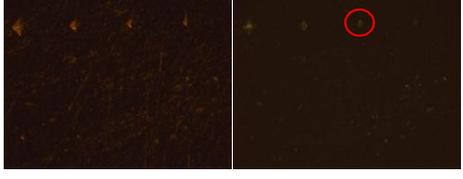
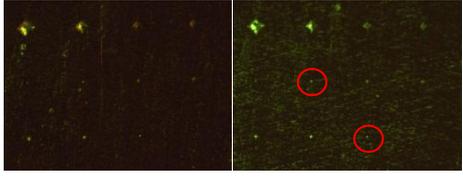
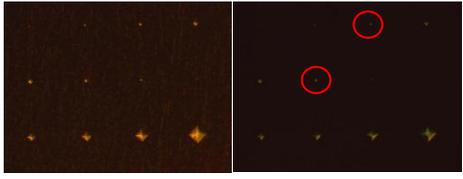
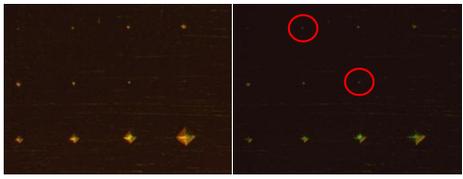
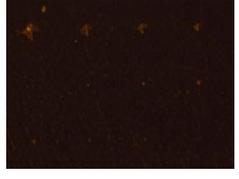
Os resultados dos ensaios END com células bacterianas foram insatisfatórios para o provete de NiTi, não sendo detectado defeitos padrão por estarem mascarados pela rugosidade existente na superfície. Devido às propriedades do NiTi, a preparação da amostra para os ensaios não foi a mais adequada, ficando um novo ensaio dependente da qualidade da preparação de futuras amostras.

Tabela 6.14 - Ensaio em provetes de Chumbo.

Chumbo	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		

A configuração da matriz de defeitos para o chumbo foi alterada devido a sua baixa resistência mecânica e grande ductilidade, por isso usou-se apenas as 4 menores cargas do micro-indentador. Um dos resultados deste ensaio, foi que as bactérias positivas entraram maioritariamente nos defeitos, o mesmo não se observa com as negativas que ficaram dispersas por toda a superfície. O equipamento de campo eléctrico obteve melhor resultado que o equipamento de campo magnético. As bactérias detectaram o defeito G, determinando o limiar de detectabilidade da técnica no chumbo.

Tabela 6.15 - Ensaio em provetes de titânio.

Titânio	Equipamento para aplicação de campo eléctrico	Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial
<i>R. erythropolis</i> +		
<i>R. erythropolis</i> -		
<i>R. erythropolis</i> + s/ Campo		
<i>R. erythropolis</i> - s/ Campo		
<i>S. aureus</i>		
<i>S. hominis</i>		

O Titânio obteve um bom resultado, tanto com bactérias de potencial eléctrico positivo, como com potencial negativo. As bactérias com potencial negativo sujeitas a campo magnético detectaram os defeitos padrão, bem como a rugosidade na superfície da amostra. Para a bactéria

R. erythropolis, é ainda de destacar os bons resultados obtidos na ausência de campo eléctrico ou magnético devido a repetição dos ensaios múltiplas vezes.

Tabela 6.16 – Tabela com melhores resultados.

Material	Bactéria	Equipamento	Limiar de detectabilidade	
			Lado [μm]	Profundidade [μm]
Aço Inox 304	<i>R. erythropolis</i> -	Eq. \vec{B} triaxial com íman permanente	5,71	1,2
Alumínio	<i>R. erythropolis</i> -	Eq. \vec{E} horizontal e vertical	15,74	3,2
Cobre	<i>R. erythropolis</i> -	Eq. \vec{E} horizontal e vertical	9,7	2,0
Magnésio	<i>R. erythropolis</i> +	Eq. \vec{B} triaxial com íman permanente	27,0	5,5
Chumbo	<i>R. erythropolis</i> +	Eq. \vec{E} horizontal e vertical	54,6	11,0
Titânio	<i>R. erythropolis</i> -	Eq. \vec{B} triaxial com íman permanente	9,1	1,8

6.6 ENSAIOS COM PROVETES DE ENSAIO DE TRACÇÃO

Realizaram-se os ensaios para detecção de defeitos reais de provetes em aço 304 produzidos por PIM. Após os ensaios os provetes foram enviados para a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra para avaliar a penetração das bactérias nos defeitos no SEM. Com base nos resultados descritos no ponto anterior, optou-se por utilizar preferencialmente as bactérias *R. erythropolis* com potencial eléctrico negativo, pois foram as que apresentaram melhores resultados. Apresenta-se na Tabela 6.17 o plano dos ensaios realizados.

Tabela 6.17 - Planificação dos ensaios.

Provete	Bactéria							
	<i>R. erythropolis</i> -				<i>S. Aureus</i>			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Pl_a	X	-	-	-	-	-	-	-
Pl_b	-	X	-	-	-	-	-	-
Pl_c	-	-	X	-	-	-	-	-
Pl_d	-	-	-	-	-	-	-	X
Pp_a	X	-	-	-	-	-	-	-
Pp_b	-	X	-	-	-	-	-	-
Pp_c	-	-	X	-	-	-	-	-
Pp_d	-	-	-	-	-	X	-	-
Ps_a	X	-	-	-	-	-	-	-
Ps_b	-	X	-	-	-	-	-	-
Ps_c	-	-	X	-	-	-	-	-
Ps_d	-	-	-	-	X	-	-	-

Nota: **A** – Equipamento para aplicação de campo magnético permanente triaxial; **B**-Equipamento para aplicação de campo magnético triaxial; **C** – Equipamento para aplicação de campo eléctrico horizontal e vertical, **D** – Sem Equipamento.

Apresenta-se na Figura 6.5 as imagens obtidas por SEM e microscópio.

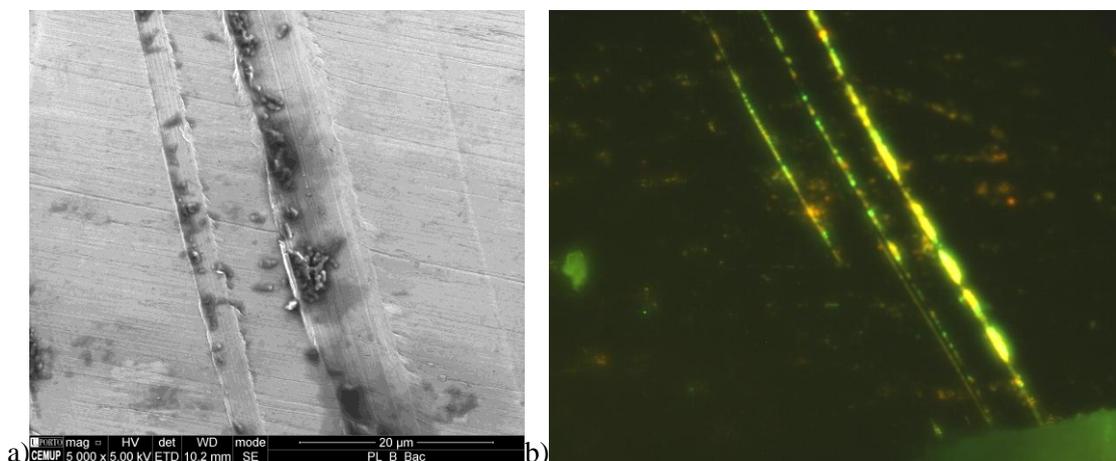


Figura 6.5 – Defeito no provete PL_B: a) Imagem SEM, b) Imagem microscópio.

Na Figura 6.5 a) é possível observar ao pormenor que as bactérias aderem preferencialmente aos defeitos e que não se encontram à superfície. Na Figura 6.5 b) é visível a fluorescência das bactérias, que proporciona um maior contraste entre a superfície e os defeitos.

7. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados dos capítulos da instrumentação e caracterização dos campos magnéticos (§4), da modelação analítica do comportamento das bactérias (§5) e da validação experimental (§6).

No decorrer deste trabalho desenvolveu-se equipamento dedicado para a aplicação de campo magnético, bem como a instrumentação e caracterização dos campos magnéticos. Simulou-se o comportamento da bactéria sujeita a força magnética e eléctrica em meio aquoso, e por fim validou-se experimentalmente a nova técnica de END utilizando diferentes células bacterianas em diferentes materiais de engenharia.

Relativamente ao equipamento para aplicação de campos magnéticos, pode concluir-se que a concepção e a solução construtiva adoptadas cumprem eficazmente os requisitos de projecto inicialmente estabelecidos, nomeadamente em termos da natureza triaxial do campo, possibilidade de variar a frequência e a intensidade em cada eixo, possibilidade de parametrizar diferentes curvas de campo em função do tempo, nos planos horizontal e vertical, e de forma independentemente.

A instrumentação realizada permitiu caracterizar e quantificar adequadamente a intensidade dos campos magnéticos em cada equipamento, nas três direcções espaciais, e para quaisquer parâmetros de ensaio. Verificou-se que na posição em que os provetes são colocados nos equipamentos, o campo magnético gerado pelos solenóides é inferior a 350 Gauss, enquanto o campo gerado pelos ímanes permanentes é superior a 1000 Gauss, podendo aumentar consideravelmente mediante pequenas acções correctivas.

As três técnicas complementares de caracterização qualitativa dos campos magnéticos que foram utilizadas (ferrofluido, partículas de ferro e filmes de visualização com partículas de níquel) também se mostraram muito úteis para a o conhecimento da extensão espacial dos campos.

O modelo analítico do comportamento dinâmico das bactérias baseado na analogia com a vibração forçada amortecida de uma partícula em meio aquoso sujeita a forças harmónicas revelou-se uma forma expedita para estimar a posição das bactérias em função do tempo, para diferentes parâmetros de ensaio. Embora ainda não sejam conhecidos todos os valores necessários ao modelo, foi possível concluir que para uma bactéria com um diâmetro de 1 μm , se se admitir uma percentagem de ferro no seu interior correspondente a 1% do seu volume, então essa bactéria ficará sujeita a uma força magnética de aproximadamente 0,45 μN quando a intensidade do campo magnético for de 350 Gauss (típico do equipamento com solenóides), o que corresponderá, por exemplo, a uma translação de 0,4 μm à frequência de 1 Hz. No entanto, para o caso do equipamento com ímanes permanentes (campos superiores a 1000 Gaus), a mesma bactéria ficará sujeita a uma força de 2 μN , o que corresponde a uma translação superior a 30 μm à mesma frequência de 1 Hz. Valores de translação idênticos serão obtidos com campos eléctricos se a bactéria apresentar carga eléctrica da ordem dos 1×10^{-18} C. O modelo confirma a intuição de que frequências mais baixas, tipicamente inferiores a 8 Hz, aumentam a mobilidade das bactérias, conforme alguns resultados experimentais anteriores já tintam demonstrado.

As principais conclusões a retirar acerca da simulação numérica do campo eléctrico são que o campo é uniforme aproximadamente em todo o seu volume na ausência de provete, que existe uma maior perturbação do campo quando o provete é condutor eléctrico, enquanto para o caso do material isolante a perturbação é tanto menor, quanto menor for a constante dieléctrica.

Conclui-se que o melhor resultado obtido foi para o provete de aço inox 304, onde se detectou o defeito padrão H, com uma largura de 5,71 μm e uma profundidade de 1,2 μm com bactérias *R. erythropolis* negativas. Identificou-se também o defeito G nos dois equipamentos de excitação, com a bactéria *R. erythropolis* negativa. O resultado obtido com os provetes de alumínio revelou-se insatisfatório, pois a fiabilidade foi inferior à das teses anteriores, não sendo encontrada a causa para este resultado. O ensaio no provete em cobre, com campo eléctrico e bactérias *R. erythropolis* negativas apresentaram bons resultados, tendo as bactérias preenchido uniformemente a superfície e possibilitado a detecção do menor defeito, ou seja o H.

Os resultados não foram satisfatórios nos provetes de fibra de carbono e grafite, porque a fibra de carbono apresenta uma malha muito larga e a grafite, apesar de polida, revelou apenas a porosidade e não os defeitos padrão. Os resultados dos provetes em GLARETM, mostram que o filme de células bacterianas preencheu alguns defeitos, mas também permaneceu na superfície, não contrastando o suficiente de forma a identificar os defeitos com fiabilidade. Não foram detectados defeitos no provete de NiTi, principalmente devido a difícil preparação da superfície do provete, que tinha apenas uma espessura de 1 mm dificultando a sua fixação para o polimento. Nos provetes de magnésio ocorreu uma reacção entre a bactéria negativa e o magnésio, o que era esperado segundo a revisão do estado da arte. O menor defeito detectado foi o F, com o equipamento campo magnético permanente. Por último o ensaio com os provetes de chumbo, detectaram o defeito G, mas que comparativamente ao tamanho do defeito da mesma escala no aço, é 5x maior.

Em termos de bactérias, a melhor foi a *R. erythropolis* negativa, quer para campo eléctrico, como magnético. As bactérias com propriedades magnéticas, a *S. aureus* e a *S. hominis* não detectaram qualquer defeito.

Em suma, os melhores resultados experimentais mostraram que é possível identificar defeitos artificiais com profundidades de 1,2, 3,2, 2,0 e 1,8 μm em AISI 304L, AA1100, cobre, e Ti6Al4V, respectivamente. As imagens de microscópio electrónico de varrimento evidenciaram a presença de bactérias no interior de defeitos com 5 μm nos provetes microfabricados. Os diversos resultados permitiram aprofundar o conhecimento processual e fenomenológico da técnica de END baseada em células bacterianas.

Desenvolvimentos Futuros

Com base no trabalho realizado, futuros equipamentos a produzir para aplicação de campo magnético deverão de utilizar apenas um íman permanente.

Para continuar com o desenvolvimento na área da simulação analítica, será necessário obter os valores reais de carga e ferro das bactérias para colocar no modelo analítico, aproximando-o mais da realidade. Este conhecimento será indispensável para que no futuro se possa estabelecer melhor a relação entre os resultados obtidos e os parâmetros de ensaio que lhe dão origem, tendo em vista, nomeadamente, a otimização desses parâmetros.

Para validar os resultados provenientes da simulação analítica, um modelo para simulação numérica deve ser desenvolvida em paralelo.

A procura dos parâmetros óptimos é ainda uma necessidade, porque apesar de se ter obtido bons resultados com o aço inox, cobre, titânio e magnésio, os ensaios com o alumínio mostraram o contrário.

Referências Bibliográficas

- [1] João P. dos S. Borges, “Desenvolvimento de Técnicas Baseadas em Filmes de Células Bacterianas para Aplicação em Ensaaios Não Destrutivos de Materiais de Engenharia”, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal 2011.
- [2] Bruno S. Mateus, "Desenvolvimento e Aplicação de Equipamento Para Detecção de Defeitos Através de Suspensão de Células Bacterianas em Componentes Microfabricados," Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal 2012
- [3] Diogo Carvalho, "Desenvolvimento e Aplicação de Técnicas Inovadoras de Ensaaios Não Destrutivos (END) com Células Bacterianas ", Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Nova de Lisboa, Almada, Portugal, 2012.
- [4] The American Society for Nondestructive Testing, Inc. - ASNT –disponível em < <https://www.asnt.org/MajorSiteSections/NDT-Resource-Center> >. Acesso Março de 2014.
- [5] World Federation of NDE Centers – WFNDEC - disponível em < <http://www.wfndec.org/evolution.htm> >. Acesso Março de 2014.
- [6] Almeida, F. P., Barata, J., Barros, P., *Ensaaios Não Destrutivos*, 1ª Edição, Edições Técnicas ISQ,1992
- [7] Telmo G. Santos, "Aula – PAFEND, Líquidos Penetrantes (LP)", Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2012.
- [8] Charles J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, 2003
- [9] Komkrit Chomsuwan, Sotoshi Yamada and Masayoshi Iwahara, “Bare PCB Inspection System With SV-GMR Sensor Eddy-Current Testing Probe”, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 5, MAY 2007
- [10] Sotoshi Yamada, Komkrit Chomsuwan and Masayoshi Iwahara, “Application of Giant Magnetoresistive Sensor for Nondestructive Evaluation,2006.
- [11] Mario Pacheco and Deepak Goyal, “Detection and Characterization of Defects in Microelectronic Packages and Boards by Means of High-Resolution X-Ray Computed Tomography (CT)”, 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference, May 2011, pp.1263-1268
- [12] J V Zhitluchina, D V Perov, A B Rinkevich, Y G Smorodinsky, M Kröning and V S Permikin, “Characterisation of steels with microdefects using a laser interferometry technique” Insight Vol 49 No 5 May 2007.
- [13] ASM Handbook Committee, “Nondestructive Evaluation and Quality Control”, Volume 17, ASM Handbook, 1992
- [14] V. Mahendran, John Philip, “Naked eye visualization of defects in ferromagnetic materials and components”, NDT&E International 60 (2013) 100–109

- [15] Guosong Wu, Jamesh Mohammed Ibrahim, Paul K. Chu, “Surface design of biodegradable magnesium alloys—A review”, *Surface & Coatings Technology* 233 (2013) 2–12
- [16] Raghuvir Singh and Narendra B. Dahotre, “Corrosion degradation and prevention by surface modification of biometallic materials”, *J Mater Sci: Mater Med* (2007) 18:725–751
- [17] Joon Park, R.S. Lakes, “Biomaterials An Introduction”, Springer, Third Edition, 2007.
- [18] Peter Loskill *et al*, “Influence of the subsurface composition of a Material on the adhesion of Staphylococci”, *Langmuir* 2012, 28, 7274-7248.
- [19] Carla C.C.R. de Carvalho and Maria José Caramujo, “Ancient Procedures for the High-Tech World: Health Benefits and Antimicrobial Compounds from the Mediterranean Empires”, *The Open Biotechnology Journal*, 2008,2,235-246.
- [20] J.O. Noyce, H. Michels, C.W. Keevil, “Potential use of copper surfaces to reduce survival of epidemic meticillin-resistant Staphylococcus aureus in the healthcare environment”, *Journal of Hospital Infection*, 2006,63, 289-297.
- [21] Copper Development Association Inc., disponível em < http://www.copper.org/about/pressreleases/2006/pr2006_09_05.html >. Acesso em Fevereiro de 2014
- [22] Luka's ˇ Fojt *et al.*, “Comparison of the low-frequency magnetic field effects on bacteria Escherichia coli, Leclercia adecarboxylata and Staphylococcus aureus”, *Bioelectrochemistry*, 2004, 63, 337-341.
- [23] Paul A. Tipler, *Física – Electricidade e Magnetismo, ótica*, Volume 2, 4ª Edição, Livros Técnicos e Científicos, 2000
- [24] *Cobalt Facts*, © 2006 CDI, disponível em < <https://www.thecdi.com> >. Acesso Março 2014
- [25] H R Kirchmayr, “Permanent magnets and hard magnetic materials”, *J Phys. D: Appl. Phys.* 29 (1996) 2763 – 2778
- [26] Karl J. Strnat, “Modern Permanent Magnets for Application in Electro-Technology”, *Proceedings of the IEEE*, Volume 78, 6, Junho 1990.
- [27] *Standard specifications for Permanent Magnet Materials*, disponível em < <https://www.intl-magnetics.org> >. Acesso Março 2014
- [28] John Bird, *Electrical and Electronic Principles and Technology*, 3ª Edição, Newnes, 2000
- [29] Telmo G. Santos, "Aula – PAFEND, Partículas Magnéticas (PM)", Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2012.
- [30] *Standards-Based Management System – BrookHaven National Laboratory*, U.S Department of ENERGY, disponível em < <https://www.sbms.bnl.gov> >. Acesso em Fevereiro 2014

- [31] John G. Webster, “The Measurement Instrumentation and Sensors - Handbook”, CRC Press LLC, 1999
- [32] David Halliday e Robert Resnick, “Fundamentos de Física 3 – Electromagnetismo”, 8ª Edição, Livros Técnicos e Científicos, 2009
- [33] Harold Kirkham , “On the measurement of stationary electric fields in air”
- [34] K. Johansson, L. Walfridsson, U. Gäfvert, B. Källstrand, S. Hörnfeldt, “Probe for measurements of the DC electric field in air around high voltage apparatus”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2010
- [35] Matweb – Material Propertie Data disponível em < <https://www.matweb.com>>, Acesso em Fevereiro de 2014.
- [36] Telmo G. Santos, R.M. Miranda, Carla C.C.R. de Carvalho, “A new NDT technique based on bacterial cells to detect micro surface defects”, NDT&E International 63,2014, 43–49.