

PEDRO HENRIQUE ARRUDA ARAGÃO

BACTÉRIAS MAGNETOTÁCTICAS

Propriedades Magnéticas através do Estudo  
de Movimento em Função do Campo Magnético

Tese de  
MESTRADO

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rio de Janeiro

À Heliete,  
Taissa e Diego

"A coisa mais incompreensível  
acerca do mundo é que  
ele é compreensível."

A. Einstein (1949)

## AGRADECIMENTOS

Em especial, desejo expressar meu sincero agradecimento à minha orientadora Darci M.S. Esquivel e a Henrique G.P. Lins de Barros pela constante orientação e valiosas discussões, que tanto contribuíram na minha formação científica, e ao apoio dado nos bons e maus momentos pelos quais passei, enfim, por todo o desenvolvimento desse trabalho, meu muito obrigado!

Ao Marcos Farina, do Instituto de Biofísica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por ter se encarregado de todo o trabalho de microscopia eletrônica, assim como o Genilton, do Instituto Oswaldo Cruz, pelas fotografias em campo escuro e ao Roberto Eizemberg, pela ajuda técnica.

Também não poderia deixar de aqui expressar o apoio que recebi durante todos esses anos, dos meus colegas do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, em especial a Klemensas Juraitis, bem como Ulysses Sodré, do Departamento de Matemática, por suas sugestões e interesse pelas bactérias magnetotáticas. Ao Núcleo de Processamento de Dados, em especial à Elisa Alves Lima, pela dedicação e interesse nos programas BACFISPH. Ao Núcleo de Tecnologia Educacional, pelo apoio técnico.

Aos meus pais e irmãos pelo apoio, em especial a Heloísa Coelho Melhado, pela paciência, horas acordadas e interesse com que acompanhou todo o desenvolvimento/desenrolar dessa Tese.

Também à Heliete, minha mulher, e a meus filhos Taísa e Diego, pelas horas que ficamos separados em prol desse trabao

lho, assim como a força e tranquilidade que passavam a mim.

À TV Paranaense (Rede Globo) e à TV Tibagi (Sistema Brasileiro de Televisão) pela utilização das ilhas de edição em vídeo.

Ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, pelos cursos oferecidos, com os quais aumentei meu conteúdo e visão da Física. À CAPES/PICD-UEL, por fornecerem recursos financeiros à realização desse trabalho.

Meu reconhecimento por este belíssimo trabalho de dactilografia, realizado pela Myriam e pela exatidão dos desenhos feitos por Antonio Carlos Inagaki.

## RESUMO

Medimos a velocidade de migração em função do campo magnético de bactérias magnetotnácticas coletadas na região do Rio de Janeiro. Determinamos o valor do momento magnético total de várias bactérias através do ajuste com a curva de Langevin para o paramagnetismo; de medidas do tempo de reorientação de células e do diâmetro da volta em U.

Os resultados mostraram que bactérias magnetotácticas podem ser tratadas, em boa aproximação, como dipolos magnéticos paralelos à direção de movimento. As várias estimativas do momento magnético mostram-se em bom acordo entre si, enfatizando o fato do modelo utilizado ser adequado.

# SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	v
SUMÁRIO .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xi
INTRODUÇÃO .....	
CAPÍTULO I: ESTUDO DO MAGNETISMO .....	1
1.1: Magnetismo .....	1
1.1.1: Histórico .....	1
1.1.2: Propriedades Magnéticas da Matéria .....	5
1.1.3: Teoria Clássica do Paramagnetismo de Langevin..	11
1.1.4: Momento Magnético Permanente .....	17
1.1.5: Fundamentos da Teoria Quântica do Paramagnetis mo .....	22
1.1.6: Estrutura Cristalina de Magnetita .....	26
1.2: O Campo Geomagnético .....	31
1.2.1: Elementos do Campo Geomagnético .....	31
1.2.2: Variação do Campo Magnético da Terra .....	36
1.2.3: Características do Campo Geomagnético no Bra sil .....	38
1.3: Micro-organismos Magnetotáticos .....	39
1.3.1: Introdução ao Estudo dos Micro-organismos ....	39
1.3.2: Mecanismos de Orientação e Navegação Animal ..	41
1.3.3: Micro-organismos Magnetotáticos .....	42
CAPÍTULO II: DINÂMICA DE MICRO-ORGANISMOS MAGNETOTÁTICOS .....	62
2.1: Movimento Browniano .....	62
2.1.1: Teoria de Einstein e Smoluchowski do movimento Browniano .....	62
2.1.2: Movimento de Translação de Bactérias .....	67

2.2: Dinâmica de Micro-organismos Magnetotáticos ...	71
2.2.1: Grão de Orientação de Micro-organismos Magneto táticos no Campo Geomagnético .....	71
2.2.2: Modelo da Volta em U .....	74
 CAPÍTULO III: OBSERVAÇÃO EXPERIMENTAL .....	 82
3.1: Coleta de Amostras .....	82
3.2: Observação por Microscopia Ótica .....	83
3.3: Técnicas para Obtenção de Medidas .....	91
 CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....	 96
4.1: Resumo dos Resultados dos Micro-organismos Magne totáticos de Itaipú e Itaipuaçu .....	98
4.1.1: Caracterização dos Micro-organismos Magnetotác ticos .....	100
4.1.2: Comportamento das Bactérias Magnetotáticas ..	102
4.1.3: Medidas de Velocidade de Migração .....	107
4.1.4: Medidas de Movimento Através da Volta em U ...	109
4.2: Momento Magnético .....	111
4.2.1: Estimativa de Momento Magnético Através da Ve locidade de migração .....	111
4.2.2: Estimativa de Momento Magnético Realizada Atra vés do Modelo da Volta em U .....	114
4.2.3: Cálculo de Momento Magnético por Microscopia E letrônica de Transmissão .....	115
 CONCLUSÕES .....	 135
APÊNDICE A .....	141
APÊNDICE B .....	143
REFERÊNCIAS .....	145

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1.2.1: Magnetização ( $\vec{M}$ ) versus intensidade do Campo Magnético ( $\vec{H}$ ) .....	8
1.1.2.2: Variação da magnetização do ferro, níquel e cobalto com a temperatura .....	9
1.1.2.3: Variação da susceptibilidade magnética com a temperatura .....	10
1.1.2.4: Representação esquemática dos momentos magnéticos atômicos .....	11
1.1.3.5: Momento magnético ( $\vec{M}$ ) e sua projeção ( $M_H$ ) sobre o campo magnético ( $\vec{H}$ ) aplicado .....	12
1.1.3.6: Gráfico da função de Langevin para o paramagnetismo clássico .....	16
1.1.4.7: Momento magnético orbital ( $M_l$ ) e momento angular orbital ( $L$ ) do elétron .....	17
1.1.6.8: Representação esquemática de dois octantes da célula unitária da magnetita .....	28
1.1.6.9: Esquemática dos momentos magnéticos atômicos no cristal de magnetita .....	29
1.1.6.10: Cristal de magnetita octaédrico .....	30
1.1.6.11: Cristal de magnetita rombododecaédrico .....	29
1.2.1.12: O campo magnético de um dipolo situado no interior da Terra .....	32
1.2.1.13: Mapa de declinação magnética de 1968 (Cain & Cain, 1969) .....	33
1.2.1.14: Mapa de inclinação magnética de 1968 (Cain & Cain, 1969) .....	34
1.2.1.15: Intensidade do campo geomagnético em 1945 (Matsushita e Campbell, 1967) .....	35
1.2.1.16: Representação vetorial do campo geomagnético .....	35
1.2.2.17: Variação do momento magnético da Terra .....	38
1.2.1.18: Intensidade do campo geomagnético no Brasil .....	39
1.3.3.19: Tipos de micro-organismos magnetotáticos .....	47

1.3.3.20:	Espectroscopia Mössbauer de Aquaspirillum Magnetotacticum. a) células não magnetotáticas; b) células magnetotáticas e c) magnetita sintetizada em laboratório .....	49
1.3.3.21:	Microscopia eletrônica de transmissão de bactérias cocus encontradas na Lagoa Rodrigo de Freitas mostrando regiões de alta densidade. (A) cadeia em L; (B) cadeia em S; (C) cadeia linear. Barra = 1µm ...	54
1.3.3.22:	Fotografia em microscopia ótica de micro-organismos magnetotáticos de 6 µm de diâmetro encontrados na Lagoa Rodrigo de Freitas, concentrados na extremidade da gota .....	56
1.3.3.23:	Fotografia por microscopia eletrônica de micro-organismos magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas. a) imagem por microscópio de Varredura, Barra = 5 µm; b) imagem por microscópio de transmissão Barra = 1 µm .....	59
2.1.2.1:	Representação esquemática do flagelo da bactéria ..	68
2.2.1.2:	Representação esquemática de um micro-organismo magnetotático submetido à inversão de campo magnético ..	
2.2.2.3:	Microfotografia ótica obtida em campo escuro da trajetória de vários micro-organismos magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas. O tempo de exposição é de 3seg e velocidade de 200 µm em campo de 4,1 Gauss. Representação esquemática da volta em U ..	79
3.1.1.1:	Coletor de amostras .....	83
3.2.2:	Concentrador de micro-organismos magnetotáticos .	86
3.2.3:	Fotografia das bobinas de Helmholtz acopladas ao microscópio ótico .....	87
3.2.4:	Campo axial de uma bobina de Helmholtz .....	88
3.3.5:	Fotografia da câmara de vídeo acoplada ao sistema ocular do microscópio ótico .....	93
4.1.1.1.1:	Imagem de microscopia eletrônica de varredura de micro-organismos magnetotáticos encontrados na Lagoa de Itaipú. Barra = 10 µm .....	101

4.1.1.2:	Microscópio eletrônico de transmissão de bactérias magnetotáticas tipo cocus de sedimentos da região de Itaipuaçu com cadeias linear e não linear, com 22000 vezes de aumento .....	103
4.1.2.3:	Esquematisação das linhas de campo de uma bactéria magnetotática .....	104
4.1.2.4:	Trajetórias de micro-organismos magnetotáticos da região estudada, obtidas através de fotografias em microscopia ótica de campo escuro, com tempo de exposição de 1seg. ....	106
4.1.3.5:	Histograma de velocidade de migração em campo magnético de 7,9G de bactérias magnetotáticas da amostra de Itaipũ-1, obtido pela técnica de vídeo em slow-motion .....	108
4.1.4.6 (a,b,c,d):	Gráfico do tempo de reversão em função do campo magnético aplicado, de micro-organismos de Itaipũ e Itaipuaçu .....	119
4.2.1.7 (a,b,...,g):	Gráficos da velocidade de migração ( $v$ ) em função do campo magnético ( $H$ ) gerado, ajustado à curva de Langevin. Amostra coletada em Itaipũ e Itaipuaçu .....	123
4.2.2.8 (a,b,c,d):	Diâmetro ( $L$ ) da volta em U em função do campo magnético aplicado ( $H$ ), para cada amostra estudada. Apresentamos a equação correspondente ao ajuste da equação 4.2.2.6, com o coeficiente de correlação e o desvio padrão correspondente .....	130
A.1:	Esquematisação do Efeito Mössbauer .....	141

LISTA DE TABELAS

	Pág.
1.3.3.1: Momento magnético de micro-organismos magnetotáticos de algumas localidades .....	51
2.2.2.1: Características de micro-organismos magnetotáticos de várias localidades .....	81
3.3.1: Características de micro-organismos magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas obtidas com a técnica de filmagem em Super-8 .....	94
4.1.1: Caracterização da dinâmica de micro-organismos magnetotáticos da região de Itaipú e Itaipuaçu .....	118
4.2.1.2: Dados referentes às amostras de Itaipú 1-A, 1-B e 1-C onde $v_0$ - velocidade média de migração; $M_L$ - momento magnético calculado através do ajuste à curva de Langevin e $m_L H_T / kT$ a razão entre as energias magnética e térmica .....	113
4.2.3.3: Caracterização esquemática e parâmetros de bactérias magnetotáticas de Itaipuaçu obtidas através de microscopia eletrônica de transmissão com 22000 vezes de aumento .....	134

## INTRODUÇÃO

Há muito se discute a possibilidade de alguns organismos disporem de um sentido especial que lhes permite detectar o campo magnético da Terra. Entretanto, somente nas duas últimas décadas, experiências vêm demonstrando que a intensidade e a direção do campo magnético da Terra afetam o comportamento, em particular a orientação, de uma variedade de organismos aquáticos e terrestres. Um exemplo peculiar, e que tem despertado a nossa curiosidade, é o caso dos pombos-correios, em descobrir o caminho do pombal, distante alguns quilômetros. É provável que essas aves tenham mais de um sistema de orientação para determinar a direção a ser seguida. Há evidências de que possam detectar e responder a mudanças no campo magnético da Terra<sup>[1]</sup>.

Em 1975, em Woods Hole, Massachusetts, U.S.A., R. Blakemore observou, em amostras de bactérias, um tipo de tactismo, até então desconhecido, denominado de magnetotactismo ou magnetotaxia. As bactérias encontradas se caracterizavam por se orientarem e nadarem, preferencialmente, segundo a direção do campo magnético terrestre<sup>[2]</sup>.

A partir deste ano, surgiram estudos e pesquisas sobre bactérias magnetotáticas, das quais passamos a destacar alguns resultados:

- Bactérias magnetotáticas são bastante comuns, sendo encontradas nas formas esféricas (cocus), cilíndricas (bastonetes) ou espiraladas (spirillus);

- Estas bactérias são encontradas em sedimentos de água doce, salobra ou do mar, tanto do hemisfério Norte (Micro-organismos magnetotáticos do tipo norte), quanto do hemisfério Sul (Micro-organismos magnetotáticos do tipo sul). Na região do Equador magnético, são encontrados quantidades aproximadamente iguais dos dois tipos de micro-organismos<sup>[3]</sup>;

- A orientação desses micro-organismos é devida à existência, em sua estrutura intracitoplasmática, de uma cadeia de 20 cristais, aproximadamente, de magnetita,  $Fe_3O_4$ , com dimensões compreendidas na região do monodomínio magnético<sup>[4]</sup>. Em geral, essa cadeia se apresenta de forma linear, podendo também ocorrer distribuições em X, em L e em S. Estes cristais apresentam uma forma geométrica bem definida, cubos, em alguns casos, e prismas de base hexagonal, noutros.

- *Aquaspirillum magnetotacticum* é a única bactéria magnetotática isolada e cultivada num meio artificial. São bactérias micro-aeróbicas, o que mostra ser o mecanismo da magnetotaxia bastante eficiente para que o organismo alcance regiões em que haja pouca concentração de oxigênio<sup>[5,6]</sup>;

- Em amostras da cidade do Rio de Janeiro foi observado pela primeira vez, um organismo eucarioto, identificado como uma Alga-verde do gênero *Chlamydomona*<sup>[7,8]</sup>;

- A análise por microscopia eletrônica de transmissão e de varredura de micro-organismos, coletados na Lagoa Rodrigo de Freitas e Baía de Guanabara, com dimensões compreendidas entre 5 e 7  $\mu m$ , revelou uma estrutura interna muito complexa, podendo se tratar de uma colônia ou um agregado de células, havendo no inte

rior desses organismos, aproximadamente 1000 (mil) regiões de alta densidade, responsáveis pela magnetotaxia observada<sup>[9]</sup>;

- Na região de Fortaleza, além das bactérias magnetotáticas de ambas as polaridades, foi também encontrado um micro-organismo identificado como alga do gênero *Anisonema* (Euglenophyceae), com comportamento magnético semelhante ao das bactérias<sup>[10]</sup>.

Estes trabalhos mostram a importância do fenômeno da magnetotaxia, como forma eficiente de orientação e são, ao mesmo tempo, motivadores e orientadores, para o nosso trabalho, que se constitui em aprofundamento do estudo de micro-organismos magnetotáticos na região do Rio de Janeiro. Nesta perspectiva, apresentamos uma contribuição para a sistematização das propriedades destes micro-organismos magnetotáticos, através da:

- Determinação da velocidade média de migração em função do campo magnético externo.

- Determinação do tempo para realização da volta em "U" em função da inversão do campo magnético externo.

- Determinação do diâmetro da volta em "U" em função da inversão do campo magnético externo.

- Estimativas dos momentos magnéticos: por microscopia eletrônica de transmissão; pelo modelo da volta em "U" e pelo estudo da variação da velocidade em função do campo magnético usando a teoria de paramagnetismo de Langevin.

Este trabalho é constituído por quatro capítulos. No primeiro, resumimos e destacamos informações gerais sobre Magnetismo e campo geomagnético, sendo ainda apresentados em nível de

detalhe, diversos micro-organismos magnetotáticos - objeto central do nosso estudo. No segundo capítulo, desenvolvemos a dinâmica de movimento de micro-organismos magnetotáticos, com a apresentação do modelo da volta em "U". No terceiro, descrevemos os procedimentos, métodos e técnicas utilizadas na experimentação. Finalmente, no capítulo quatro discutimos as principais características dos micro-organismos magnetotáticos de Itaipú e Itaipuaçu analisados, apresentando os principais resultados obtidos.

# CAPÍTULO I

## ESTUDO DO MAGNETISMO

### 1.1 Magnetismo

#### 1.1.1 Histórico

As primeiras notícias a respeito do magnetismo, bem como de suas influências nos seres vivos, procedem dos tempos mais remotos da História. O fato do imã atrair determinada classe de substâncias desperta, em qualquer pessoa, curiosidade e interesse. Séculos antes da era Cristã, os gregos já conheciam uma pedra que hoje sabemos ser um mineral contendo óxido magnético de ferro - Magnetita. Este material já era mencionado por Thales de Mileto (624-548 A.C.), havendo citações também a respeito desse material, por Platão (427-347 A.C.), quando descreve o diálogo entre Ion e Sócrates. Em alguns trechos do trabalho de Hipócrates (460-377 A.C.) e Galeno (131-201) a magnetita é indicada como forma de tratamento de certas doenças<sup>[11]</sup>. Aristóteles (384-322 A.C.) não trata do magnetismo quando se refere à física porém, faz menção ao magnetismo em seu tratado sobre a Alma. Segundo ele, o magnetismo é um espírito que emana da pedra-imã e se apodera de forma invisível de determinados objetos<sup>[12]</sup>.

Desde as primeiras observações dos efeitos magnéti-

cos, por Thales de Mileto, até 1269, era atribuído ao magnetismo um caráter sobrenatural. Ainda hoje, os fenômenos paranormais são considerados inexplicáveis e geralmente os atribuímos a um "fantástico" magnetismo pessoal.

Não há registro concreto quando o imã foi utilizado pela primeira vez na navegação. Muitos autores afirmam que mil anos antes de Cristo, já se conhecia na China um aparelho mágico que apontava sempre para o sul. Sabe-se que, por volta de 1150, era obrigatório, em viagens marítimas e terrestres dos chineses, a utilização de uma agulha, uma pedra-imã e uma linha que, de forma geral, se constitui no embrião da "bússola".

Não se sabe com certeza como a bússola chegou à Europa, porém seu aprimoramento data do final do século XII e início de XIII, na Itália. Em 1269, Petrus Peregrinus de Maricourt, na França, realizou os primeiros estudos das propriedades magnéticas ao descobrir os meridianos magnéticos. Este trabalho constituiu, em 1600, a base da publicação "The Magnete", por W. Gilbert, um estudo que este médico e erudito inglês levou dezessis anos para realizar. Neste tratado os fenômenos, não só os magnéticos mas também os elétricos, passam a ser explicados através de uma conduta empírica cuidadosa e racional. Até então, os resultados não eram submetidos a testes experimentais bastando-lhes a autoridade dos textos tradicionais. Nesta obra Gilbert fez algumas experiências para compreender a natureza do campo magnético e geomagnético e chegou à conclusão de ser a Terra uma imensa esfera imantada, com dois polos magnéticos situados na direção dos polos geográficos. Também comprova que o vidro, o enxofre e as pedras preciosas atraem pedaços de papel quando friccionados, não sendo somen-

te o âmbar o único material a apresentar propriedades elétricas como supunham os gregos. Como médico da cõrte inglesa também W. Gilbert utilizava as pedras de magnetita na terapia de certas moléstias, talvez por se tratar de um material que não sofra corrosão.

Vale ressaltar que, de um modo geral, o interesse pelo estudo do organismo vivo declinou muito na Idade Média e poucos trabalhos foram realizados no período compreendido entre o século V e o século XV. A invenção do microscópio, por volta de 1590, abriu novas linhas de pesquisa em biologia. Em 1665, Robert Hooke (1635-1703), observou e descreveu que a cortiça e alguns vegetais eram constituídos de cavidades separadas por várias paredes. Tais cavidades receberam o nome de células e são a base da organização dos seres vivos. [13].

Depois do trabalho de W. Gilbert, durante o período em que Newton (1642-1727) fez a formulação da Lei da Gravitação e R. Boyle (1627-1691) fez investigações das leis dos gases, pouca importância foi dada ao estudo do magnetismo. Somente com os trabalhos de C.A. Coulomb (1738-1806), K. Gauss (1777-1855), M. Faraday (1791-1867) é que o magnetismo volta a ser estudado, sob a perspectiva científica, introduzida por G. Gallileu (1564-1642), quando da publicação, em 1638, dos "Diálogos".

Os trabalhos subsequentes, feitos por H.C. Oersted, em 1820, sobre magnetismo mostraram que um fio conduzindo corrente elétrica influenciava a posição da agulha de uma bússola. Na França, também em 1820, A.M. Ampère (1775-1836), mostrou que um fio enrolado de forma circular, transportando corrente elétrica, se comporta como um ímã e levantou a hipótese de ser o magnetis-

mo originado no interior das substâncias magnéticas por minúsculas "correntes circulares".

Durante o século XVIII, a maioria dos trabalhos em magnetismo, tentava explicar o fato dos imãs magnetizarem determinada classe de materiais. Assim, os trabalhos que se desenvolveram no século XIX, levaram a uma rápida expansão no conhecimento dos fenômenos da eletricidade e do magnetismo, culminando com as grandes experiências de M. Faraday. Em 1830, ele demonstrou a indução de correntes elétricas mediante campos magnéticos e em 1845, classificou as substâncias, quanto às suas propriedades magnéticas, em diamagnéticas e paramagnéticas. Os trabalhos que se realizaram durante este período, possibilitaram a C. Maxwell (1831-1879) formular sistematicamente, numa linguagem matemática consistente, as equações que regem os fenômenos eletromagnéticos.

Mais de vinte anos após a morte de M. Faraday, Pierre Curie (1859-1906), em 1895, estudando uma série de substâncias, percebeu que a susceptibilidade magnética dos materiais diamagnéticos independe do efeito da temperatura enquanto nos materiais paramagnéticos, decresce com o aumento da mesma.

A história recente do magnetismo, se desenvolveu rapidamente, graças aos trabalhos de W. Heisenberg, E.C. Stoner, H. Bethe, etc. Essas contribuições mostraram que os fenômenos magnéticos são provenientes de propriedades intrínsecas das partículas elementares e que as manifestações macroscópicas destas propriedades são parcialmente compreendidas pela teoria quântica [14].

Os trabalhos iniciados nos anos 50 sobre navegação e orientação de pombos, trouxeram informações até então desconhecidas no que diz respeito à capacidade de orientação dessas aves e

surgiram as primeiras hipóteses de que os animais poderiam utilizar o campo magnético da Terra como mecanismo de orientação<sup>[1]</sup>.

A descoberta das bactérias magnetotáticas, em 1975 por R. Blakemore, constitui a primeira evidência direta da influência do campo magnético sobre o ser vivo<sup>[2]</sup>.

### 1.1.2 Propriedades Magnéticas da Matéria

As propriedades magnéticas das substâncias são devidas à interação do campo magnético externo com os momentos de dipolos magnéticos de seus átomos ou moléculas. Em 1845, M. Faraday mostrou que as substâncias, de uma forma geral, podem ser classificadas como diamagnéticas e paramagnéticas. Ele diferenciou as substâncias diamagnéticas das paramagnéticas pelo fato das primeiras serem repelidas pelo campo magnético externo enquanto as segundas são atraídas pelo mesmo. As substâncias paramagnéticas, cujas propriedades magnéticas permanecem mesmo após a retirada do campo magnético, são chamadas de ferromagnéticas.

Do ponto de vista macroscópico, as propriedades magnéticas das substâncias podem ser descritas através de suas respostas a um campo magnético externo.

Consideremos um corpo homogêneo de volume  $V$  colocado num campo magnético uniforme de intensidade  $\vec{H}$  e indução magnética  $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ , onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do material. A ação do campo magnético sobre o corpo, torna-o magnetizado obtendo-se assim um momento magnético  $\vec{m}$ . A razão entre o momento magnético

e o volume do corpo é denominado de densidade de momento magnético, ou simplesmente, magnetização, isto é:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad 1.1.2.1$$

Quando a magnetização não for uniforme, teremos:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} \quad 1.1.2.2$$

Observa-se empiricamente que em certos materiais a magnetização ( $\vec{M}$ ) é proporcional à intensidade de campo magnético ( $\vec{H}$ ), ou seja:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad 1.1.2.3$$

onde  $\chi_m$  é denominado de susceptibilidade magnética. Um dos principais problemas no estudo das propriedades magnéticas dos materiais consiste na determinação de  $\chi_m$  e sua dependência, com a temperatura  $T$  e o campo magnético  $\vec{H}$ . Assim, podemos dividir as substâncias magnéticas em três grupos:

- Aquelas em que  $\chi_m$  é negativo, chamadas de diamagnéticas. Neste caso  $\vec{M}$  é independente de  $\vec{H}$  e de  $T$ .

- Aquelas em que  $\chi_m$  é positivo. Neste caso o material é chamado de paramagnético ou ferromagnético. Nas substâncias paramagnéticas,  $M$  depende de  $T$  e é independente de  $\vec{H}$  enquanto que nas ferromagnéticas,  $M$  depende tanto de  $T$  quanto de  $\vec{H}$ <sup>[15]</sup>.

Nos materiais diamagnéticos a magnetização tem dire-

ção oposta à do campo de indução magnética. Esse fenômeno pode ser explicado através da Lei de Lenz (1804-1865), para o eletromagnetismo (sob a ação de um campo magnético, a corrente elétrica produz efeitos que tendem a se opor à variação do campo magnético que a induziu<sup>[16]</sup>). Esses materiais apresentam uma susceptibilidade magnética da ordem de  $10^{-6}$ . O diamagnetismo está presente em todas as substâncias, porém, produz efeitos tão fracos que sua presença fica disfarçada em substâncias cujos átomos possuem momento magnético permanente, como é o caso das substâncias paramagnéticas ou ferromagnéticas.

O paramagnetismo ocorre em substâncias cujos átomos têm momentos magnéticos permanentes. Estes momentos estão associados com o spin e com o movimento orbital dos elétrons, os quais interagem muito fracamente uns com os outros de forma que esse efeito pode ser desprezado. Na ausência de um campo magnético externo, os momentos magnéticos estão orientados ao acaso. Na presença de um campo magnético externo, há a tendência dos momentos magnéticos ficarem alinhados ao campo; esta situação, entretanto, é contrariada pelos efeitos da agitação térmica, que provoca a desorientação dos momentos magnéticos. Os momentos magnéticos ficam paralelos ao campo magnético dependendo da intensidade do campo e da temperatura. Os materiais paramagnéticos apresentam uma susceptibilidade da ordem de  $10^{-4}$  [15]. A figura 1.1.2.1 nos mostra a dependência de  $\vec{M}$  com a intensidade do campo magnético  $\vec{H}$ . A curva 1 se refere aos materiais diamagnéticos enquanto a curva 2 aos paramagnéticos<sup>[17]</sup>.

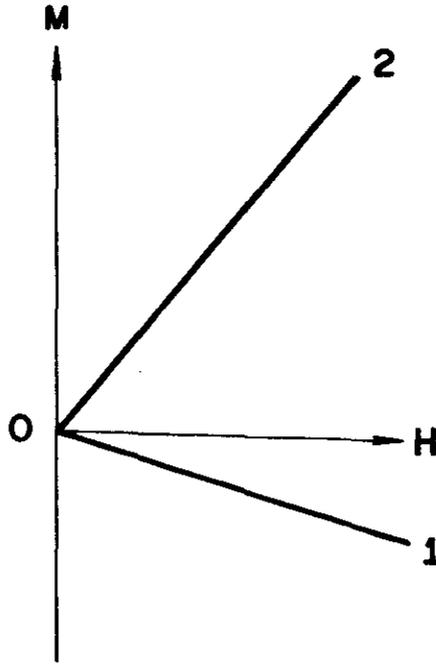


Fig. 1.1.2.1.: Magnetização ( $\vec{M}$ ) versus intensidade do Campo Magnético ( $\vec{H}$ ).

Um terceiro tipo muito importante de material magnético é o ferromagnético. Os efeitos magnéticos, na maioria das substâncias são fracos, porém, para o grupo de materiais ferromagnéticos, são muito fortes. Tais materiais se caracterizam pela presença de magnetização espontânea, mesmo na ausência de campo magnético externo. Isto porque os átomos dessas substâncias, além de possuírem momentos magnéticos permanentes, apresentam uma forte interação entre seus átomos, mantendo-os paralelos entre si mesmo quando na ausência do campo (domínio de Weiss). Este efeito é de natureza quântica. A susceptibilidade magnética dessa

classe de materiais é da ordem de  $10^5$  [18]. A magnetização nesses materiais varia com a temperatura. Na temperatura absoluta o alinhamento dos momentos magnéticos é completo e a magnetização tem seu valor máximo é a chamada magnetização de saturação. À medida em que a temperatura aumenta, a magnetização decresce até se tornar nula, a uma temperatura crítica chamada de "temperatura de Curie" (Fig. 1.1.2.2).

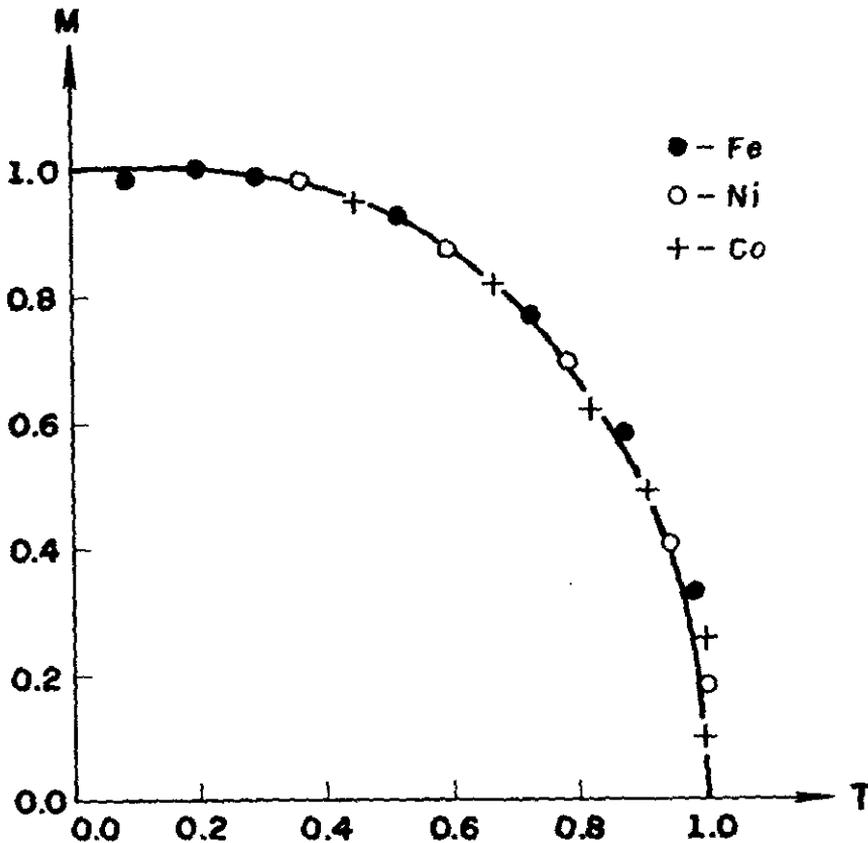


Fig. 1.1.2.2: Variação da Magnetização do Ferro, Níquel e Cobalto com a temperatura.

Para temperaturas superiores à temperatura de Curie, esses materiais tornam-se paramagnéticos, apresentando uma susceptibilidade magnética dada por:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_c}$$

1.1.2.4

que é a Lei de Curie-Weiss, onde  $C$  é a constante de Curie. Na fig. 1.1.2.3 apresentamos a dependência da susceptibilidade magnética com a temperatura.

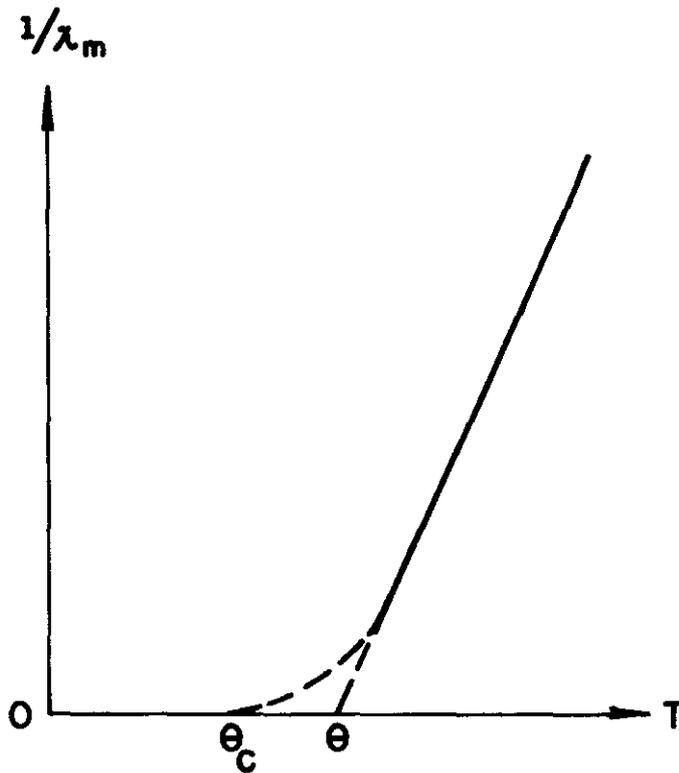


Fig. 1.1.2.3: Variação da susceptibilidade magnética com a temperatura.

Outros dois tipos de magnetismo intimamente relacionados com o ferromagnetismo são o antiferromagnetismo e o ferrimagnetismo. Em 1930, V. Velck e Néel, para explicar o comportamento magnético de algumas substâncias ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $NiO$ , etc), introduziram o conceito de antiferromagnetismo, que conduziu pos-

teriormente à descoberta do ferrimagnetismo. As substâncias antiferromagnéticas têm seus momentos magnéticos numa configuração rigidamente antiparalela. Assim, o efeito global nesses materiais é muito pequeno. Entretanto, quando são aquecidas acima de uma certa temperatura (temperatura de Néel), o material se comporta como paramagnético, obedecendo a Lei de Curie-Weiss. As substâncias ferrimagnéticas são de natureza antiferromagnéticas no que diz respeito à sua estrutura porém, em suas propriedades, se comportam como ferromagnéticas. O acoplamento de troca nestes materiais mantém os momentos magnéticos numa configuração do tipo da que aparece na fig. 1.1.2.4.

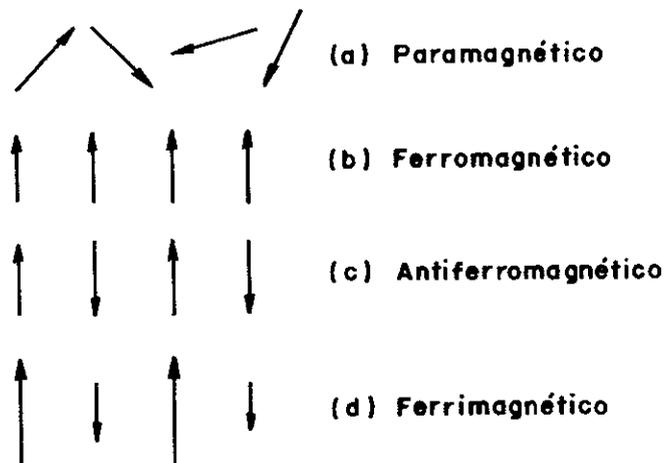


Fig. 1.1.2.4: Representação esquemática dos momentos magnéticos atômicos.

### 1.1.3 Teoria Clássica do Paramagnetismo de Langevin

A teoria clássica do paramagnetismo foi desenvolvida

em 1905 por P. Langevin, em seu trabalho sobre magnetismo. Sua teoria é baseada na idéia de que os átomos dos materiais paramagnéticos apresentam um momento de dipolo magnético permanente. A interação entre esses dipolos é desprezível em relação à energia de interação dipolo - campo externo, por ser da ordem de  $10^{-20}$  cgs.

A energia potencial magnética dos dipolos magnéticos em presença de um campo magnético  $\vec{H}$  é dada por:

$$E = -\vec{m} \cdot \vec{H} \cos \theta \quad 1.1.3.5$$

onde  $\theta$  é o ângulo entre  $\vec{m}$  e  $\vec{H}$ . (Fig. 1.1.3.5).

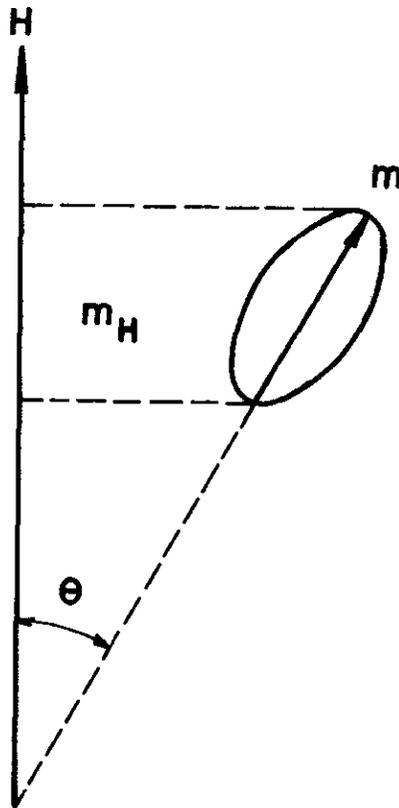


Fig. 1.1.3.5: Momento magnético ( $\vec{m}$ ) e sua projeção ( $\vec{m}_H$ ) sobre o campo magnético ( $\vec{H}$ ) aplicado.

Todos os dipolos magnéticos tendem a se orientar com o campo magnético, entretanto são impedidos devido à agitação térmica. O momento magnético total do material pode ser calculado pela soma das projeções dos momentos magnéticos individuais de cada átomo na direção do campo magnético  $\vec{H}$ , isto é,

$$\vec{m}_H = m \cdot \cos \theta \hat{z} \quad 1.1.3.6$$

uma vez que a soma das componentes transversais é, estatisticamente, nula. A magnetização pode ser calculada tomando-se o valor médio da eq. 1.1.3.6, correspondente ao estado de equilíbrio entre o efeito de orientação do campo magnético e o efeito de desorientação devido à agitação térmica. Assim, quando a temperatura tende a zero, a agitação térmica torna-se desprezível e o sistema terá sua orientação máxima. Por outro lado, quando a temperatura tende a valores muito elevados, o sistema estará orientado aleatoriamente e a magnetização tenderá a zero. Logo, a orientação média de  $\vec{m}$ , com respeito ao campo magnético  $\vec{H}$  varia com a temperatura. O sistema de dipolos é tratado na estatística de Maxwell-Boltzmann. Assim, a probabilidade  $p(\theta)$  para o momento magnético se alinhar no intervalo compreendido entre  $\theta$  e  $\theta + d\theta$ , com o campo magnético dentro do ângulo sólido  $d\Omega$ , pode ser determinada através da função de distribuição de Maxwell-Boltzmann, isto é:

$$p(\theta) = C_1 \cdot \exp(-E/kT) \quad 1.1.3.7$$

onde  $C_1$  é a constante de normalização,  $E = -m H \cos \theta$  é a energia potencial e  $kT$  a energia térmica. Substituindo a eq. 1.1.3.5 na

na eq. 1.1.3.7, teremos

$$p(\theta) = C_1 \exp(mH \cos\theta/kT) \quad 1.1.3.8$$

Tomando-se o valor médio da eq. 1.1.3.6 teremos,

$$\langle m_H \rangle = \langle m \cdot \cos\theta \rangle \quad 1.1.3.9$$

como o momento magnético de cada átomo é constante, o cálculo do valor médio de  $\vec{m}$  fica reduzido ao cálculo do  $\cos\theta$ , ou seja:

$$\langle m_H \rangle = m \langle \cos\theta \rangle \quad 1.1.3.10$$

Logo

$$\langle \cos\theta \rangle = \int_0^{4\pi} \cos\theta p(\theta) \cdot d\Omega \quad 1.1.3.11$$

onde  $d\Omega$  é o elemento de ângulo sólido correspondente a todos os dipolos orientados entre  $\theta$  e  $\theta+d\theta$  sendo dado por  $2\pi \sin\theta d\theta$  [19].

Logo, a eq. 1.1.3.10 pode ser escrita,

$$\langle m_H \rangle = m \frac{\int_0^\pi \cos(\theta) \cdot C \cdot \exp(m \cdot H \cos\theta/kT) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^\pi C \cdot \exp(m \cdot H \cos\theta/kT) \sin(\theta) d\theta} \quad 1.1.3.12$$

onde  $C = 2\pi C_1$  e o numerador é justamente a derivada do denominador com relação a  $mH/kT$ . Assim, obtemos

$$\langle m_H \rangle = m \left( \coth h, \frac{mH}{kT} - \frac{kT}{mH} \right) \quad 1.1.3.13$$

onde o termo entre parênteses é a função de Langevin  $L(\frac{mH}{kT})$  de forma que a eq. 1.1.3.13 pode ser escrita como

$$\langle m_H \rangle = m \cdot L\left(\frac{mH}{kT}\right) \quad 1.1.3.14$$

Assim, a magnetização do material dada pela eq. 1.1.2.1 será:

$$\vec{M} = N \cdot \langle m_H \rangle = N \cdot m \cdot L\left(\frac{mH}{kT}\right) \quad 1.1.3.15$$

onde N é o número de átomos por unidade de volume. Portanto, a susceptibilidade magnética dada pela eq. 1.1.2.3, é:

$$\chi_m = \frac{\vec{M}}{H} = N \cdot \frac{m}{H} \cdot L\left(\frac{mH}{kT}\right) \quad 1.1.3.16$$

ou seja:

$$\chi_m = N \cdot \frac{m}{H} \left( \operatorname{cotgh} \frac{mH}{kT} - \frac{kT}{mH} \right) \quad 1.1.3.17$$

Expandindo o termo  $\operatorname{cotgh}\left(\frac{mH}{kT}\right)$  em série de potência, a função de Langevin fica reduzida a  $\frac{mH}{3kT}$ , de forma que podemos escrever as eq. 1.1.3.15 e 1.1.3.16, nas formas:

$$\vec{M} = N \cdot m \left( \frac{mH}{3kT} \right) = N \frac{m^2 H}{3kT} \quad 1.1.3.18$$

$$\chi_m = N \frac{m}{H} \left( \frac{mH}{3kT} \right) = N \frac{m^2}{3kT} \quad 1.1.3.19$$

Pela eq. 1.1.3.18 observa-se que a magnetização é diretamente proporcional a  $H$  e inversamente proporcional a  $T$ , enquanto a susceptibilidade magnética é a Lei de Curie (eq. 1.1.2.4) com  $C = N m^2 / 3k$ .

A fig. 1.1.3.6 mostra o gráfico da função de Langevin em relação a  $X$ , onde  $X \equiv mH/kT$ .

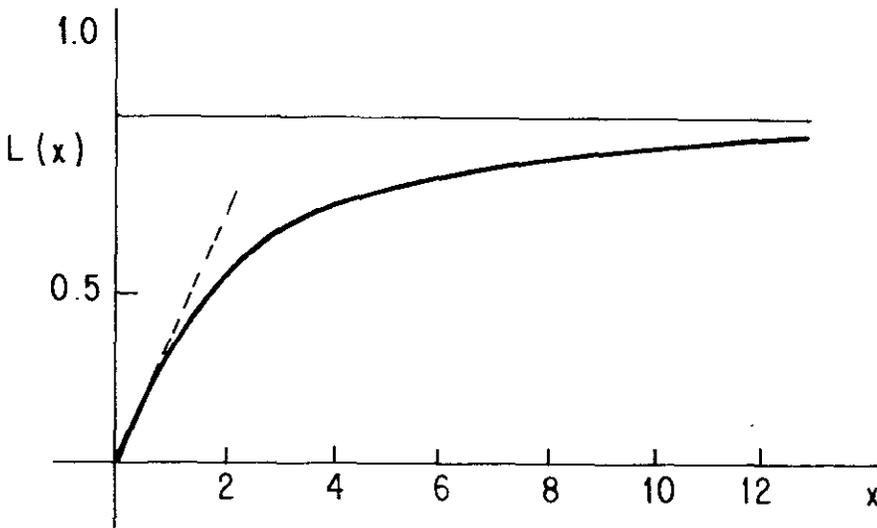


Fig. 1.1.3.6: Gráfico da função de Langevin para o paramagnetismo clássico

Observa-se que à medida que a razão entre as energias  $X = mH/kT$ , tende a infinito, a função de Langevin tende assintoticamente a 1; esta situação corresponde a um completo alinhamento dos dipolos magnéticos na direção do campo magnético. À medida que tende a zero, a função de Langevin também tende a zero.

#### 1.1.4 Momento Magnético Permanente

Do ponto de vista atômico, o momento magnético vem de três origens; do momento angular orbital, do spin eletrônico e do spin nuclear.

Os fenômenos magnéticos podem ser explicados adequadamente através da teoria clássica do modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio. Consideremos os elétrons movendo-se com uma velocidade constante  $V$ , numa trajetória circular (fig. 1.1.4.7).

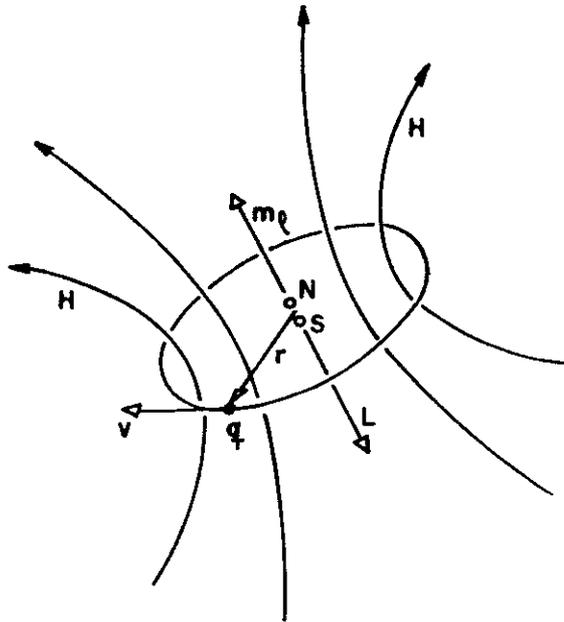


Fig. 1.1.4.7: Momento Magnético orbital ( $m_l$ ) e momento angular orbital ( $L$ ) do elétron.

o elétron é uma partícula de carga  $-e$ , movendo-se numa órbita circular de raio  $r$ . No centro do átomo, está o núcleo positivo, o que torna o sistema eletricamente neutro. O movimento do núcleo é desprezível e desta forma seus efeitos magnéticos podem ser desprezados<sup>[18]</sup>. Este modelo é equivalente a um anel de corrente. Assim, a corrente que circula na espira é igual a carga por unida

de de tempo, isto é:

$$i = - \frac{e}{T} = - e \frac{v}{2\pi r} \quad 1.1.4.20$$

onde T é o período do elétron em sua órbita.

Da teoria eletromagnética, sabemos que o momento magnético do elétron em sua órbita é o produto da corrente pela área da órbita, ou seja:

$$m_\ell = i \cdot A = - \frac{ve r}{2} \quad 1.1.4.21$$

Sabemos que o momento angular orbital está dirigido perpendicularmente ao plano da órbita e oposto a  $m$ , sendo dado pela equação:

$$L = mvr \quad 1.1.4.22$$

Comparando as eqs. 1.1.4.21 e 1.1.4.22 para uma órbita de Bohr, encontramos

$$m_\ell = - \frac{e}{2m} L \quad 1.1.4.23$$

Por esta relação observamos que a razão entre o momento magnético orbital e o momento angular orbital é uma constante. Além disso, esta razão não depende do raio da órbita, da frequência orbital ou da forma da órbita. Geralmente, a eq. 1.1.4.23 é escrita pela equação

$$\vec{m}_\ell = - \frac{g_\ell \mu_B}{\hbar} \cdot \vec{L} \quad 1.1.4.24$$

onde  $\mu_B$  é o magneton de Bohr, dado por

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

e  $g_\ell$  é o fator de Landé, que neste caso é igual a 1.

A projeção do momento angular na direção do campo magnético  $\vec{H}$ , isto é  $\vec{L}$ , de acordo com a teoria quântica [17], pode assumir somente valores discretos, ou seja

$$L = \hbar(\ell(\ell+1))^{1/2} \quad 1.1.4.25$$

$$L_H = n_\ell \cdot \hbar \quad 1.1.4.26$$

onde  $\ell$  é o número quântico orbital e pode assumir os valores

$$\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

e o número quântico magnético  $n_\ell$  assume os valores

$$n_\ell = -\ell, -(\ell-1), -(\ell-2), \dots, 0, \dots, (\ell-1), \ell$$

de forma que o momento magnético orbital, segundo a direção do campo magnético externo será:

$$m_{\ell H} = -\frac{g_\ell \mu_B}{\hbar} L_H \quad 1.1.4.27$$

Pela eq. 1.1.3.26, teremos

$$m_{\ell H} = -g_\ell \mu_B n_\ell \quad 1.1.4.28$$

Segundo a forma clássica, a componente do momento magnético orbital, na direção do campo magnético, pode assumir qualquer valor compreendido entre  $-m_l$  e  $+m_l$ . De acordo com a mecânica quântica a projeção do momento magnético na direção do campo magnético só pode assumir valores discretos.

Em 1922, O. Stern e W. Gerlach realizaram experiências a fim de medir os possíveis valores do momento magnético orbital para átomos de prata em presença de um campo magnético. Os resultados obtidos não concordaram com os resultados previstos pela eq. 1.1.4.28. Posteriormente, em 1927, Phipps e Taylor utilizaram a técnica de Stern-Gerlach, com átomos de hidrogênio pelo fato destes átomos terem somente um elétron. Estas experiências levaram a concluir que o elétron tem um momento magnético intrínseco ( $m_s$ ).

A relação entre o momento magnético de spin e o momento angular de spin é dado por

$$\vec{m}_s = - \frac{g_s \mu_B}{\hbar} \vec{S} \quad 1.1.4.29$$

e sua projeção, segundo a direção do campo magnético, é

$$m_{sH} = - \frac{g_s \mu_B}{\hbar} \cdot S_H \quad 1.1.4.30$$

A projeção do momento angular de spin na direção do campo magnético, é

$$S_H = n_s \hbar \quad 1.1.4.31$$

onde o número quântico de spin  $n_s$ , pode assumir somente dois va-

lores,  $1/2$  e  $-1/2$ . Dentro da precisão experimental, encontrou-se, para o fator de Landé, o valor 2.

Logo podemos concluir que o momento angular total do átomo será dado pela soma vetorial do momento angular orbital  $\vec{L}$  e do momento angular de spin  $\vec{S}$ , isto é:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad 1.1.4.32$$

onde  $\vec{L} = \hbar(\ell(\ell+1))^{1/2}$  e  $\vec{S} = \hbar(s(s+1))^{1/2}$ .

O momento angular total estará especificado pelos números quânticos  $J$  e  $n_j$  de acordo com as condições usuais de quantização, isto é:

$$J = \hbar(j(j+1))^{1/2} \quad 1.1.4.33$$

A orientação de  $J$  segundo a direção do campo magnético será portanto:

$$J_H = n_j \hbar \quad 1.1.4.34$$

sendo que os possíveis valores que o número quântico  $n_j$  pode assumir, são:

$$n_j = -j, -(j-1), \dots, (j-1), j$$

logo, o momento magnético total do átomo será dado por:

$$\vec{m}_j = -\frac{g \mu_B}{\hbar} \cdot \vec{J} \quad 1.1.4.35$$

cuja projeção na direção do campo magnético é:

$$m_{jH} = - n_j \cdot g \cdot \mu_B \quad 1.1.4.36$$

onde  $g$  é o fator de Landé, sendo igual a

$$g = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$$

Note que  $l = 0$  corresponde a um caso de magnetismo de spin puro  $g = 2 = g_s$  e para  $s = 0$ , corresponde a um magnetismo orbital puro  $g = 1 = g_l$ . Assim, o fator de Landé determina a relação existente entre o momento magnético total e o momento magnético angular total.

### 1.1.5 Fundamentos da Teoria Quântica do Paramagnetismo

Considerando um sistema constituído por  $N$  átomos por unidade de volume, onde cada átomo é dotado de um momento magnético total  $m_j$  e que, as interações entre os átomos sejam desprezadas de forma que podemos considerar o sistema como dipolos independentes, então como vimos na seção anterior, o momento magnético para cada átomo é dado pela eq. 1.1.4.35, ou seja:

$$\vec{m}_j = - \frac{g \mu_B}{\hbar} \vec{J}$$

quando aplicamos ao sistema um campo magnético de intensidade  $\vec{H}$

a componente do momento magnético na direção do campo aplicado, é dada pela eq. 1.1.4.36, isto é:

$$m_{jH} = - n_j \cdot g \cdot \mu_B$$

Segundo a teoria quântica, essa componente deverá assumir valores fornecidos por  $n_j$ . Assim, o número de orientações possíveis para cada átomo será  $2j+1$ .

A energia de interação entre o momento magnético e o campo magnético é:

$$E = - \vec{m} \cdot \vec{H} = m_{jH} H \quad 1.1.5.37$$

onde  $m_{jH}$  é a projeção de  $\vec{m}_j$  sobre  $\vec{H}$ . Assim podemos escrever a eq. 1.1.5.37 como:

$$E = - n_j g \mu_B \cdot H \quad 1.1.5.38$$

A probabilidade para cada orientação será dada através da estatística de Maxwell-Boltzmann, isto é:

$$\langle m_{jH} \rangle = \frac{\sum_{-j}^{+j} m_{jH} \exp(m_{jH} \cdot \frac{H}{kT})}{\sum_{-j}^{+j} \exp(m_{jH} \cdot (\frac{H}{kT}))} \quad 1.1.5.39$$

Vale ressaltar que a diferença entre esta equação e

a equação clássica, dada pela eq. 1.1.3.12 está na substituição da integração por uma somatória nos momentos magnéticos.

A solução da eq. 1.1.5.39<sup>[17]</sup>:

$$\langle m_{jH} \rangle = g \cdot j \cdot \mu_B B_j(\beta) \quad 1.1.5.40$$

onde

$$\beta = \frac{j \cdot g \cdot \mu_B \mu_0 H}{kT}$$

e  $B_j(\beta)$  é a função de Brillouin dado por:

$$B_j(\beta) = \left( \frac{2j+1}{2j} \right) \cdot [\text{cotgh} \left( \frac{2j+1}{2j} \right) \beta] - \left( \frac{1}{2j} \cdot \text{cotgh} \frac{\beta}{2j} \right) \quad 1.1.5.41$$

A função de Brillouin tem um comportamento semelhante à função de Langevin,  $L(X)$ . Tal função depende da razão entre as energias magnética e térmica, sendo que a primeira, tende a alinhar os átomos enquanto a segunda, tende a desorientá-los.

A magnetização e a susceptibilidade magnética são, respectivamente,

$$M = N \cdot g \cdot j \cdot \mu_B B_j(\beta) \quad 1.1.5.42$$

$$\chi_m = \frac{N \cdot g \cdot j \cdot \mu_B B_j(\beta)}{H} \quad 1.1.5.43$$

Observamos que, nestas relação, se fizermos  $\beta \ll 1$ , a função de Brillouin é aproximadamente igual a

$$B_j(\beta) = \frac{\beta(j+1)}{3j}$$

podemos reescrever as eqs. 1.1.5.42 e 1.1.5.43 na forma:

$$M = \frac{N \cdot g^2 \cdot \mu_B^2 \cdot j(j+1) \mu_0 H}{3kT} \quad 1.1.5.44$$

$$\chi_m = \frac{N \cdot j(j+1) g^2 \mu_B^2 \mu_0}{3kT} \quad 1.1.5.45$$

Logo, podemos concluir que para  $\beta \ll 1$  a magnetização é proporcional ao campo magnético e a susceptibilidade inversamente proporcional à temperatura. Vemos, portanto, que a Lei de Curie continua sendo obedecida (eq. 1.1.2.4), isto é:

$$\chi_m = \frac{C}{T}$$

onde  $C = N j(j+1) g^2 \mu_B^2 \mu_0 / 3k$

Para campos magnéticos fortes e temperaturas baixas e a função de Brillouin, neste caso, tende assintoticamente a 1, uma vez que:

$$\operatorname{cotgh}\left(\frac{2j+1}{2j}\right)\beta \rightarrow 1 \quad \text{e} \quad \operatorname{cotgh}\frac{\beta}{2j} \rightarrow 1$$

Esta situação corresponde a uma magnetização máxima, ou seja, os momentos magnéticos estarão alinhados com o campo magnético, segundo a equação abaixo:

$$M = N \cdot g \cdot j \cdot \mu_B \quad 1.1.5.46$$

### 1.1.6 Estrutura Cristalina da Magnetita

A magnetita é um material de nosso particular interesse por ser biomineralizada por uma variedade de organismos vivos. Já foi constatada a existência de partículas de magnetita em cérebro de pombos correios, embrião de tubarão, abdome de abelhas, etc. [20] e, em especial, nas bactérias [2] e algas [7,8,10] magnetotáticas. Vale ressaltar que, apesar desse mineral ser sintetizado por alguns organismos, o conhecimento a respeito dos processos pelos quais a magnetita possa ser sintetizada é ainda pouco conhecido. Há evidências de que, ao funcionar como um receptor magnético, os cristais de magnetita devem estar associados/conectados de alguma maneira ao sistema nervoso dos organismos mais complexos [20].

A magnetita pode ser sintetizada pela oxidação do ferro em temperaturas muito elevadas, da ordem das encontradas em meteoritos [21], sob a ação do ar ou do vapor de água, pelo aquecimento de  $Fe_2O_3$  em atmosfera redutora ou pelo aquecimento de  $FeCO_3$ , até que este atinja um rubro-mortiço, na presença de vapor d'água ou azoto. Apresentando um ponto de fusão a  $1594^{\circ}C$ , a magnetita; à temperatura de  $1452^{\circ}C$  contém 30% de  $Fe_2O_3$  que pode, por resfriamento, se separar sob a forma de hematita [22]. Este fato é no mínimo curioso, uma vez que no caso dos micro-organismos magnetotáticos, estes conseguem biomineralizar a magnetita à temperaturas baixas da ordem de  $20^{\circ}C$ , o que nos leva a acreditar que processos bioquímicos, tais como reações enzimáticas, estão envolvidos na síntese desse material por esses micro-organismos.

A magnetita é um óxido de ferro dos mais importantes sob o aspecto científico e tecnológico, devido às suas propriedades dielétricas e semicondutoras. É bastante abundante, sendo encontrada em rochas eruptivas e metamórficas, bem como em sedimentos que sofreram metamorfismo térmico.

A magnetita é um material ferromagnético pertencente ao grupo das ferritas. Uma das formas estruturais que as ferritas apresentam é a chamada spinélio<sup>[23]</sup>. Neste grupo de ferritas, a fórmula química para seus compostos é  $XY_2O_4$ , onde X e Y (cátions) são elementos metálicos e, pelo menos um deles pertence ao grupo de metais de transição. A célula unitária destes compostos possui 32 ions de  $O^{2-}$ . Esta célula forma uma rede cúbica de face centrada com uma estrutura "cubic close-packed" (CCP). Numa estrutura espinélica somente 8 dos 64 sítios tetraédricos e 16 dos sítios octaédricos são ocupados.

A magnetita é uma ferrita com estrutura espinel inversa. Sua fórmula química é representada por  $Fe_3O_4$  ou, explicitamente,  $(Fe^{3+})|Fe^{3+} Fe^{2+}|O_4^{2-}$ . A célula unitária é composta por oito unidades de fórmula química, onde 8 dos 64 sítios tetraédricos, são ocupados por ions de  $Fe^{3+}$  e, 16 dos octaédricos, pelos ions  $Fe^{3+}$  restantes e ions  $Fe^{2+}$ <sup>[24]</sup>.

O momento magnético teórico, por unidade de fórmula química, é dado por:

$$\mu = m(Fe^{2+})_{II} + m(Fe^{3+})_{II} \pm m(Fe^{3+})_I \quad 1.1.6.47$$

onde o sinal positivo corresponde à interação positiva entre I e II e o sinal negativo à interação negativa. O índice I representa

os sítios tetraédricos (8 dos 64 são ocupados) enquanto o índice II, os sítios octaédricos (16 sítios são ocupados) e  $m = g \mu_B S$  sendo  $g$  o fator giromagnético ( $g = 2$ ),  $\mu_B$  o magneton de Bohr e  $S$  o spin total. Os ions  $Fe^{3+}$  e  $Fe^{2+}$  estão num estado de spin 5/2 e 2, respectivamente. Logo, temos

$$\mu = (9 \pm 5) \mu_B = \begin{cases} 14 \mu_B \text{ (interação positiva)} \\ 4 \mu_B \text{ (interação negativa)} \end{cases} \quad 1.1.6.48$$

Experimentalmente o valor encontrado é de  $4,1 \mu_B$ , que está em boa concordância com o valor teórico de uma estrutura espinal com interação entre sítios tetraédricos e octaédricos negativo. Desta maneira podemos representar esquematicamente a forma estrutural da magnetita pela fig. 1.1.6.8

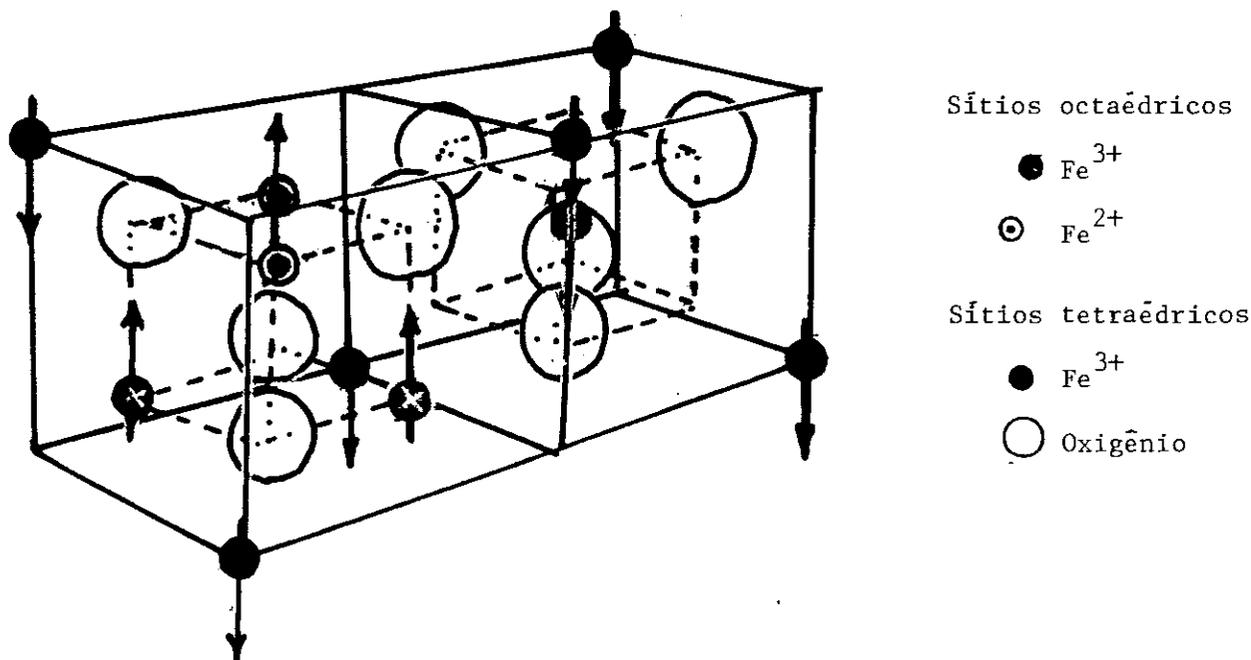


FIG. 1.1.6.8: Representação esquemática de dois octantes da célula unitária da magnetita

Observamos que os momentos magnéticos dos ions  $Fe^{3+}$  cancelam-se e a contribuição ao momento magnético resultante é devida, somente aos ions  $Fe^{2+}$ , na figura 1.1.6.9, apresentamos uma esquematização dos ions tetraédricos e octaédricos.

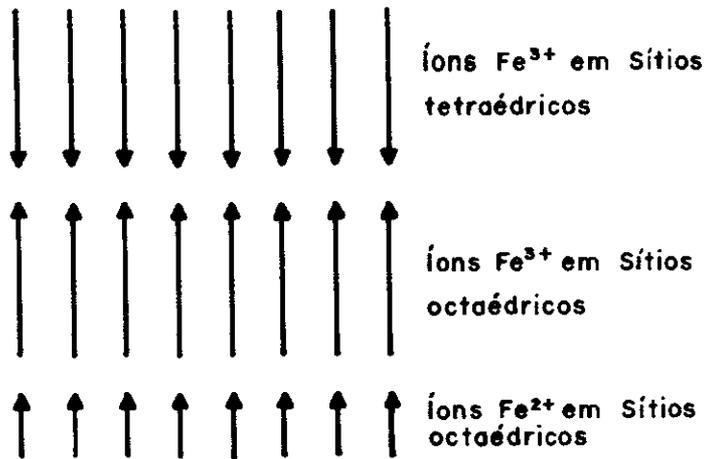


Fig. 1.1.6.9: Esquematização dos momentos magnéticos atômicos no cristal de magnetita

Análise por raio-X tem revelado que raramente encontra-se magnetita pura; há quantidade de Al substituindo o  $Fe^{3+}$ , podendo haver pequenas proporções de Zn, Mn, Mg substituindo o  $Fe^{2+}$  para formar a Franklinita, a Jacobsita e a Magnésio-ferri-ta<sup>[25]</sup>. As outras substituições que existem na magnetita incluem a troca parcial de  $Fe^{3+}$  por Cr e V, enquanto que o  $Fe^{2+}$  pode

ser parcialmente substituído por Ni, Co, Ca, além do Zn, Mg e Mn [22].

Em exame macroscópico, a magnetita apresenta uma coloração negra e sob a incidência de luz se mostra cinzenta, apresentando um brilho metálico. Em geral os cristais de magnetita são octaédricos (fig. 1.1.6.10) ou rombododecaédricos (fig. 1.1.6.11) sendo estes mais raros de ocorrência.

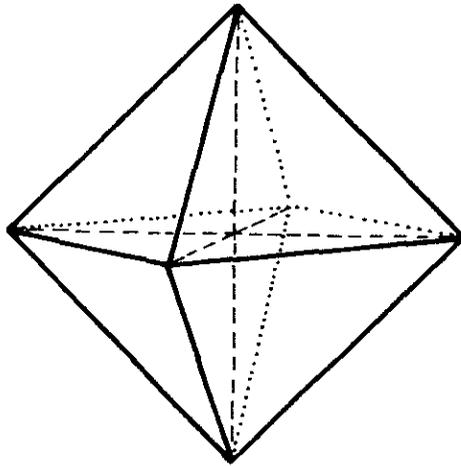


Fig. 1.1.6.10: Cristal de magnetita octaédrico

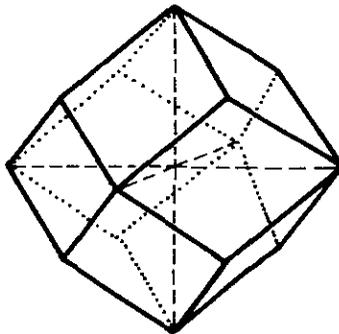


Fig. 1.1.6.11: Cristal de magnetita rombododecaédrico

## 1.2 O campo magnético

O campo magnético da Terra está presente desde que a vida teve seu início há mais de 3,5 bilhões de anos. A intensidade deste campo é bem reduzida, 0,5 Gauss, o que não o impede de desempenhar um importante papel - o de proteger a vida na Terra - funcionando como uma blindagem contra as partículas carregadas provenientes do Sol. Além do mais, apresenta uma característica - permite o registro de sua história em sedimentos, rochas, etc.

Esta seção objetiva apresentar algumas informações gerais sobre o campo magnético da Terra, tais como: o elemento do campo magnético, suas variações e as características deste campo no Brasil.

### 1.2.1 Elementos do Campo Geomagnético

Na obra "The Magnet", de W. Gilbert, publicada em 1600, ele reconheceu que a Terra pode ser equiparada a um gigantesco imã, a partir das semelhanças das linhas magnéticas com as de uma esfera de magnetita. A partir de então, a Terra é tratada como uma esfera uniformemente magnetizada. As linhas de campo de um imã em forma de barra, situado no interior da Terra (figura 1.2.1.12), distante aproximadamente  $11,5^\circ$  do seu eixo de rotação.

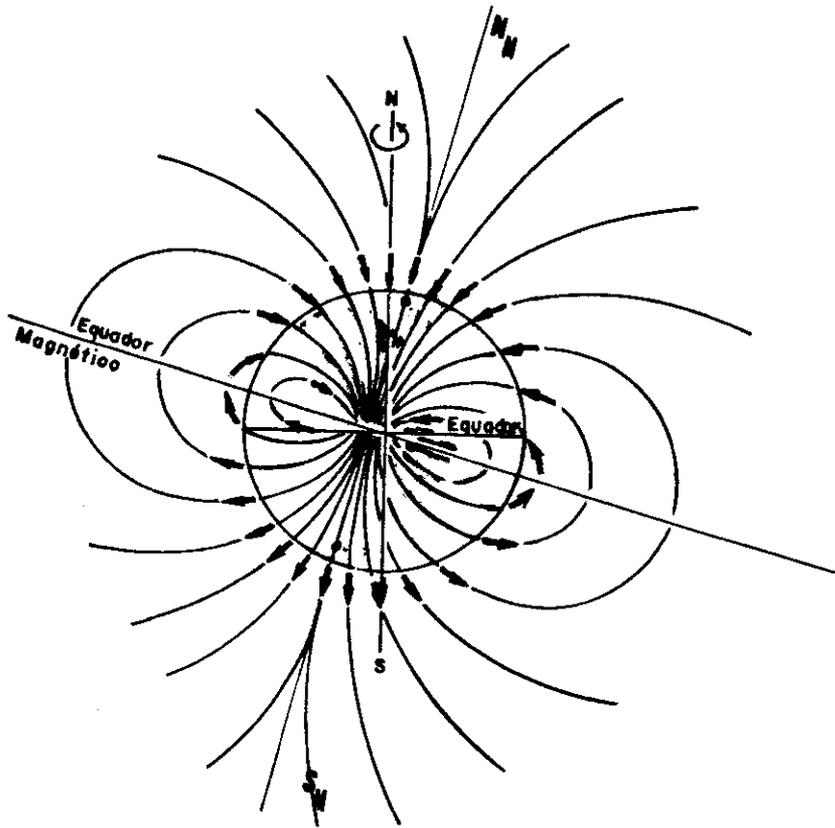


Fig. 1.2.1.12: O campo magnético de um dipolo situado no interior da terra

O campo geomagnético fica caracterizado pela declinação magnética, inclinação magnética e pela intensidade.

Desde o século XVI sabe-se que a agulha de uma bússola aponta aproximadamente na direção norte-sul geográfico. Em 17 de setembro de 1492, o Almirante Cristóvão Colombo anotou em seu Diário na caravela Santa Maria: "Seguiam os pilotos rumo ao norte, marcado na bússola, e acharam que os ponteiros indicavam noroeste numa grande quarta, e os marinheiros começaram a sentir medo, a ficar melancólicos e sem dizer por quê. O Almirante entendeu: determinou que voltassem a marcar norte ao amanhecer e acharam que os ponteiros estavam bons. O motivo foi porque a estrela (Polar), em vez dos ponteiros, dá impressão de se deslocar no firmamento". (texto retirado do Diário da Descoberta da América de Cristóvão Colombo, pp 179, 2ª ed. L.P.M. - Porto Alegre,



1984). Dependendo do local, a agulha desvia-se da direção geográfica norte-sul, para o leste ou para o oeste, segundo um ângulo que dependerá de onde esteja o observador. Este ângulo de desvio é chamado de declinação magnética.

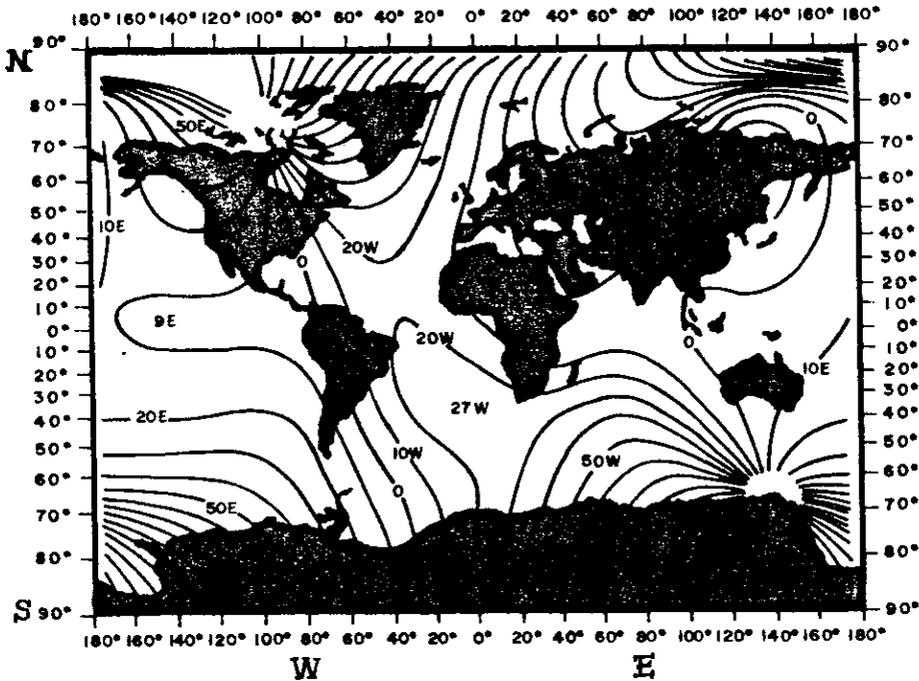


Fig. 1.2.1.13: Mapa de declinação magnética de 1968 (Cain & Cain, 1969)

A figura 1.2.1.13 mostra as linhas de declinação magnética da Terra. Observa-se que é pequena no Japão e intensa na Groenlândia. Nos pontos correspondentes à linha de declinação zero, a agulha indicará o norte geográfico verdadeiro.

É possível também perceber que a agulha da bússola não permanecerá exatamente na posição horizontal. A extremidade que aponta para o norte, inclina-se para baixo no hemisfério norte, da mesma forma que a extremidade, que aponta para o sul, inclina-se para baixo no hemisfério sul. Isto ocorre pelo fato da

agulha alinhar-se com as linhas de força do campo magnético da Terra. O ângulo de desvio da posição horizontal é chamado de inclinação magnética ( $I$ ) e varia conforme a localidade (figura 1.2.1.14).

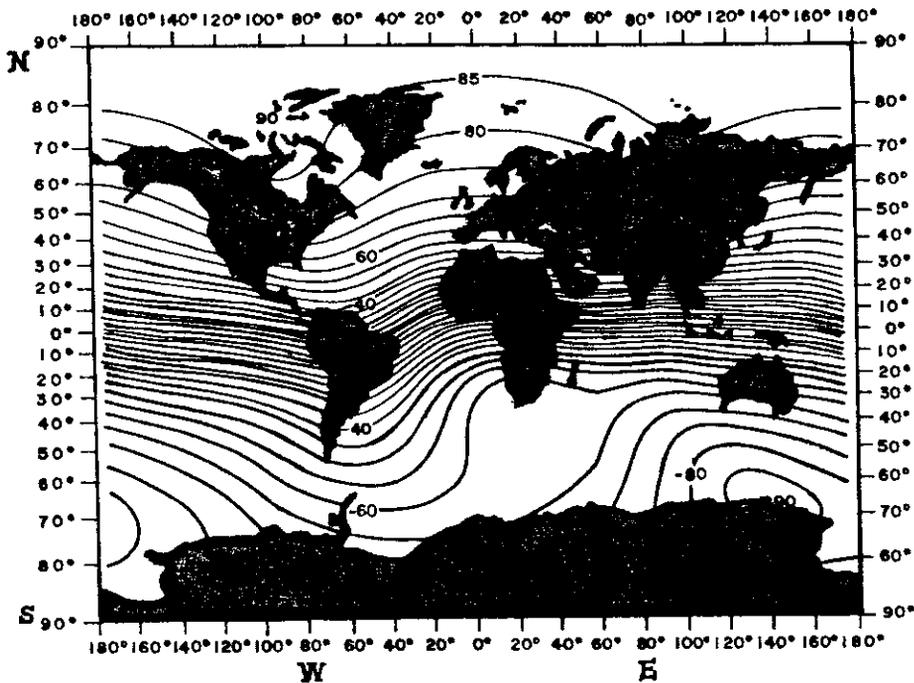


Fig. 1.2.1.14: Mapa de inclinação magnética de 1968 (Cain & Cain, 1969)

Em qualquer ponto da superfície da Terra, além da declinação e inclinação que determinam a direção da agulha, o campo magnético é também caracterizado por sua intensidade, que varia de acordo com o lugar geográfico na superfície do planeta (fig. 1.2.1.15).

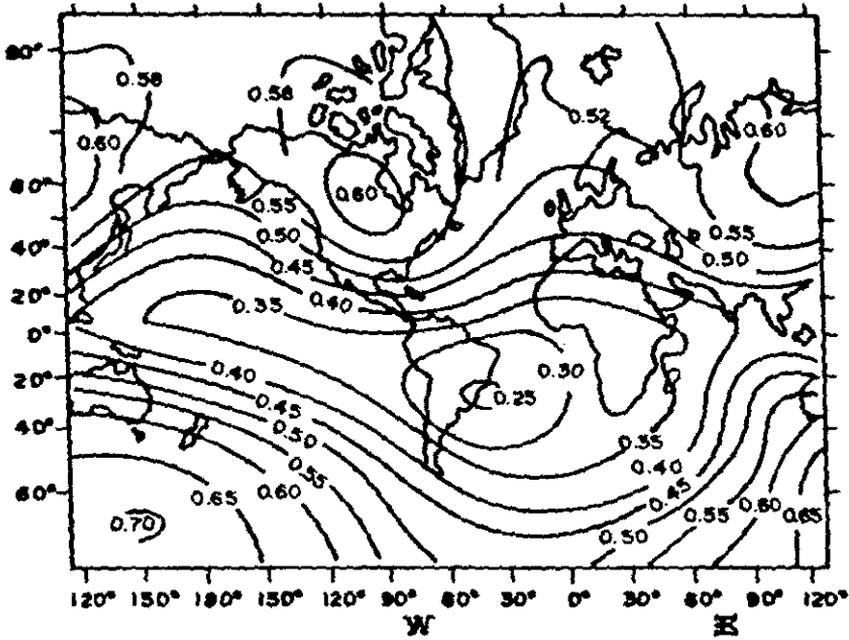


Fig. 1.2.1.15: Intensidade do campo geomagnético em 1945 (Matsushita e Campbell, 1967)

O campo geomagnético pode ser representado, vetorialmente, num sistema de eixos ortogonais (fig. 1.2.1.16)

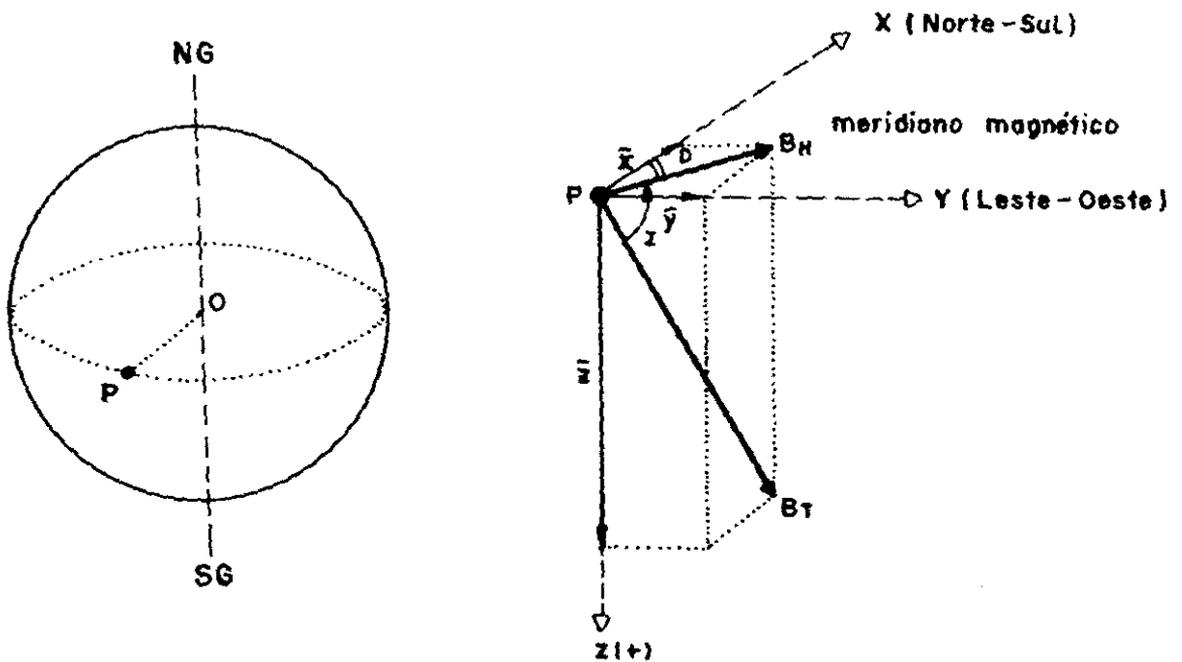


Fig. 1.2.1.16: Representação vetorial do campo geomagnético

Nesta figura, o ponto P representa um observador situado sobre a superfície da Terra, sendo aí o centro do sistema de eixos ortogonais; o eixo PX tem a direção Norte-Sul geográfico; o eixo PY a direção Leste-Oeste e, finalmente, o eixo PZ é tomado com sentido positivo para baixo.

As componentes do campo magnético da Terra estão relacionadas pela equação:

$$B_T^2 = B_H^2 + Z^2 \quad 1.2.1.49$$

onde  $B_T$  é a intensidade do campo magnético no ponto P,  $B_H$  é sua componente horizontal e Z a componente vertical. A declinação magnética (D) e a inclinação magnética (I), podem ser obtidas diretamente da figura 1.2.1.16, isto é:

$$D = \text{arc.tg } Y/X \quad 1.2.1.50$$

$$I = \text{arc.tg } Z/B_H \quad 1.2.1.51$$

## 1.2.2 Variações do Campo Magnético da Terra

Registros contínuos do magnetismo terrestre mostram que o campo magnético da Terra não é constante, mudando continuamente. As primeiras observações sobre as variações do campo magnético da Terra foram realizadas por Graham, em 1722. Utilizando um microscópio, ele registrou as mudanças na declinação magnética sofridas pela agulha de uma microbússola, observando que,

em alguns dias, as variações na declinação eram lentas e regulares (variações diárias) e, em outros dias, ocorriam grandes perturbações (tempestades magnéticas). Parece pouco provável que as causas das variações magnéticas tenham origem no interior da Terra, por serem mudanças rápidas e passageiras<sup>[26]</sup> - Hoje sabe-se que tais variações são causadas principalmente pela radiação proveniente do Sol. Uma questão bastante delicada é o fenômeno da "Deriva para Oeste". Este fenômeno diz respeito ao fato dos padrões da distribuição do campo magnético da Terra deslocarem-se num mesmo sentido (para oeste), durante um longo intervalo de tempo (Variação Secular). Assim, os padrões de distribuição do campo geomagnético (Declinação, Inclinação e Intensidade) efetuam uma volta completa na Terra em aproximadamente alguns milhares de anos.

Os padrões do campo magnético terrestre não estão limitados somente à declinação e inclinação desse campo. Também o momento magnético do dipolo terrestre sofre variações de ano para ano. Quando a primeira medida foi realizada por Gauss em 1932, o valor encontrado foi de  $8,558 \times 10^{25} \text{ G.cm}^3$ . Desde então, o momento magnético vem diminuindo continuamente. Em 1960, o valor medido foi de  $8,013 \times 10^{25} \text{ G.cm}^3$ . De forma que, se essa proporção for mantida, em aproximadamente 2000 anos, o campo magnético da Terra terá seu valor nulo<sup>[27]</sup>. Há evidências de, no passado, há 1500 anos, o campo magnético ter passado por seu valor máximo de  $12 \times 10^{15} \text{ G.cm}^3$  e por um mínimo de  $4 \times 10^{25} \text{ G.cm}^3$  a cerca de 5500 anos.

Na figura 1.2.2.17 mostramos a variação do momento magnético da Terra nos últimos 9000 anos.

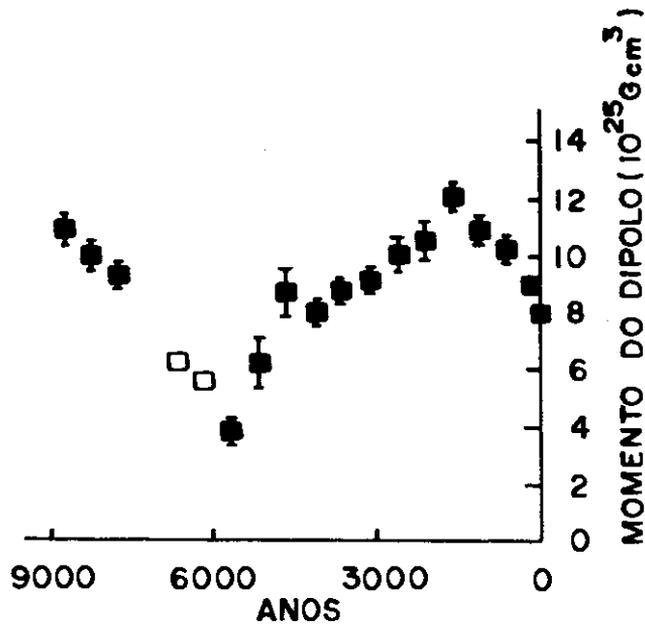


fig. 1.2.2.17: Variação do momento magnético da Terra

### 1.2.3 Características do Campo Geomagnético no Brasil

O Brasil é um país propício ao estudo do magnetismo em seres vivos, uma vez que, devido à sua extensão territorial, apresenta algumas características do campo geomagnético, fig. 1.2.3.18, quais sejam:

- Toda a região Sul-Leste está localizada numa região de campo magnético de baixa intensidade;
- A região Norte apresenta inclinação positiva;
- O equador magnético passa pelo território brasileiro, nas proximidades da cidade de Fortaleza (CE).

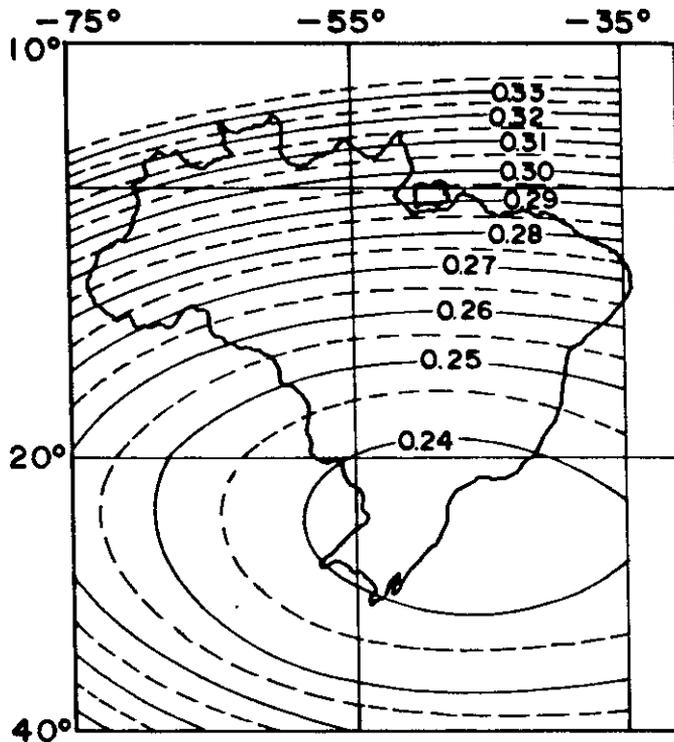


Fig. 1.2.3.18: Intensidade do Campo geomagnético no Brasil

Particularmente a cidade do Rio de Janeiro oferece peculiaridades para o estudo do fenômeno de magnetotaxia na medida em que está situada numa região de campo magnético de baixa intensidade, de aproximadamente 0,25 Gauss, e encontra-se numa região conhecida como Anomalia do Atlântico-Sul.

### 1.3 Micro-organismos Magnetotáticos

#### 1.3.1 Introdução ao Estudo dos Micro-organismos

Não se sabe ao certo quando surgiram os primeiros

sistemas vivos. Estudos em fósseis contidos nas mais antigas rochas conhecidas, datadas entre 3 e 3,4 bilhões de anos, evidenciam a existência de bactérias e corpúsculos esferoidais orgânicos semelhantes a cianofíceas. Também há evidências de que a fotossíntese já se processaria nesse período<sup>[28]</sup>.

Verifica-se, portanto, que as bactérias constituem o mais antigo e mais abundante grupo de organismos. Até hoje já foram descritas cerca de 1600 espécies.

Devido à grande versatilidade metabólica que possuem, as bactérias podem sobreviver em muitos ambientes, inclusive aqueles impróprios a qualquer outra forma de vida. Porém, o meio de vida normal das bactérias é o líquido onde elas conseguem se nutrir e se reproduzir com muita facilidade. Em determinados meios, as bactérias podem permanecer em estado latente; elas se encontram numa espécie de invólucro protetor, constituindo os chamados esporos de resistência.

Distinguem-se três tipos principais de bactérias: os bacilos (bastonetes retos), os cocos (pequenas esferas) e os espirilos (bastonetes espiralados); às vezes possuem flagelos.

As bactérias e as cianofíceas fazem parte do reino Monera, por se tratar de células do tipo procarioto, isto é, células sem envoltório nuclear, enquanto que todos os outros organismos apresentam núcleo definido - são eucariotos.

Do ponto de vista ecológico, as bactérias são importantíssimas como decompositores, isto é, quebram material orgânico de forma que possam ser utilizados pelas plantas<sup>[13]</sup>.

### 1.3.2 Mecanismos de Orientação e Navegação Animal

Desde os tempos mais remotos da História, o homem questiona a respeito dos mecanismos físicos, químicos e biológicos utilizados pelos animais para sua manutenção e sobrevivência.

Dentre os vários mecanismos de orientação animal resalta-se a taxia (relação existente entre o organismo e a fonte de estímulo, a medida que este se movimenta). A taxia pode ser positiva quando o organismo reage na direção do estímulo e, negativa, em caso contrário [29].

Dentre os vários tipos de resposta com relação à fonte estímulo, a quimiotaxia é o mais observado. Este fenômeno consiste numa resposta do organismo a algum componente químico existente em seu meio natural.

A ecolocalização é um outro mecanismo de orientação. Há evidências de que, no século XVIII, o biólogo L. Spallanzani (1729-1799) tenha tentado compreender esse fenômeno, observando morcegos. Somente em 1938 D.R. Griffin demonstrou que esses animais emitem onda ultra-sônicas, que são refletidas pelos objetos à sua frente. Esse mecanismo funciona como uma eco-sonda, dando informações ao animal da composição química, tamanho e forma dos objetos.

A orientação pela gravidade também é um fator importante na orientação de algumas espécies. Os órgãos sensíveis à gravidade, estão espalhados em diversas posições do corpo, advertindo o sistema nervoso para mudanças de posição [30].

Uma outra classe de taxia é a menotaxia, que consiste em movimentos em ângulos constantes com relação à fonte de

estímulo<sup>[29]</sup>. A forma mais conhecida de monotaxia é a orientação pelo Sol. Em 1949, Kramer demonstrou que a orientação das aves é tanto melhor quanto mais visível estiver o Sol. Sauers, em 1966, observou que as estrelas podem servir de pontos de referência, permitindo às aves migrar<sup>[30]</sup>. Também em pombos, foi observada a influência do campo magnético no seu voo de volta ao lar<sup>[1]</sup>.

A utilização do campo magnético como forma de orientação e navegação, sob certas condições, tem levado um número cada vez maior de pesquisadores, ao longo dessas últimas décadas, a levantar a hipótese de uma nova resposta táctica. Tal hipótese hoje confirmada, vê a existência de micro-organismos (bactérias, algas, etc) que são magnetotácticas, ou seja, se orientam e tendem a nadar ao longo das linhas de forças de campo magnéticos aplicados.

### 1.3.3 Micro-organismos Magnetotácticos

A primeira evidência de que algumas espécies de bactérias eram sensíveis ao campo geomagnético, foi feita em 1975, por R.P. Blakemore<sup>[2]</sup>. Ao tentar isolar espirochaetas de amostras do fundo lodoso do Cabo Cod e da Baía Buzzards, Massachusetts (USA), Blakemore observou que algumas bactérias nadavam persistentemente para uma mesma região, através do campo visual do microscópio, para concentrarem-se na borda da gota em análise. Inicialmente foi levantada a hipótese de uma resposta à luz (fototaxia). Entretanto, como esses organismos se tornavam indiferentes às experiências de distribuição de luz, Blakemore con

cluiu não ser a fototaxia o único fator reponsável por esta migração, uma vez que a direção, na qual essas bactérias nadavam, se modificava imediatamente quando pequenos imãs eram colocados nas proximidades do microscópio. Experiências posteriores também desenvolvidas por Blakemore, confirmaram que a direção de migração dessas bactérias é influenciada pelo campo geomagnético, surgindo daí a denominação de bactérias magnetotáticas.

Fazendo-se uso da alta densidade populacional de bactérias magnetotáticas (da ordem de  $10^3$  bactérias/cm<sup>3</sup>, podendo chegar em algumas amostras, a  $10^6$  bactérias/cm<sup>3</sup>) e do mecanismo de orientação magnética, foi possível preparar estas bactérias para microscopia eletrônica. Os resultados foram surpreendentes: revelaram bactérias de forma aproximadamente esféricas com um diâmetro da ordem de 1 a 2  $\mu$ m, possuindo dois feixes de flagelos cada um contendo sete cílios, aproximadamente. Além das estruturas biológicas normais numa célula de bactérias, a microscopia eletrônica mostrou a presença de, pelo menos, uma ou duas cadeias contendo de 5 a 10 partículas de altíssima densidade situada na estrutura interna da bactéria. Vale ressaltar que, cada partícula se acha envolvida por uma membrana e, a esse conjunto, denominou-se de magnetossomos. Acredita-se que, uma das funções dessa membrana, seja a de manter fixa essas partículas, no interior da bactéria, além da síntese do próprio material [2].

A análise por microscopia eletrônica de transmissão (MET) dos sedimentos onde estas bactérias foram encontradas, mostrou a presença de partículas semelhantes às encontradas no interior do citoplasma das bactérias magnetotáticas, surgindo, então, a suposição de que tais partículas desprenderam-se do inte

rior das bactérias, após sua morte, agrupando-se no sedimento. A tendência de tais partículas estarem agrupadas quando fora da célula, levantou a possibilidade de se tratar de uma substância magnética, provavelmente semelhante a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Esta possibilidade foi confirmada, posteriormente, após a análise do espectro de raio-X, indicando o ferro como elemento predominante na composição do material<sup>[2]</sup>.

Assim, a relação entre a cadeia de partículas ricas em ferro e a magnetotaxia não é acidental, uma vez que esta cadeia funciona como uma micro-agulha magnetizada, situada no interior da célula. Como o organismo está em suspensão na água, a cadeia funciona como uma bússola, uma vez que o campo magnético alinha a cadeia cristalina e os flagelos são os responsáveis pelo movimento. Dessa maneira, os micro-organismos nadam na direção determinada pelo campo magnético. Mesmo quando se fixa essas células, elas, apesar de não mais se movimentarem, continuam a se alinhar segundo a direção do campo magnético aplicado. Esta experiência mostra que o mecanismo de orientação magnética é passivo, independente de qualquer função vital do organismo. Além do mais, o fenômeno da magnetotaxia não se trata de um fenômeno de atração magnética dos micro-organismos pela força magnética. Os organismos sofrem um torque que os orienta no sentido do campo magnético aplicado, de forma que as partículas de ferro contidas no citoplasma, comportam-se como um dipolo magnético. Os momentos de dipolo magnético dos organismos interagem com o campo magnético, orientando-os para as áreas favoráveis ao seu desenvolvimento.

Posteriormente, Ad. J. Kalmijn e Blakemore<sup>[31]</sup>, em

1978, estudaram o mecanismo de resposta das bactérias magnetotáticas quando submetidas a campos magnéticos de intensidade da ordem do campo magnético da Terra (cerca de 1.0 Gauss). Nesta experiência, os campos magnéticos foram gerados por um par de bobinas de Helmholtz a fim de ser possível controlar a intensidade e o sentido do campo aplicado. Quando se alinha o eixo das bobinas de Helmholtz na direção norte-sul, a intensidade do campo horizontal, que atua sobre os organismos magnetotáticos, é a soma do campo magnético gerado nas bobinas, mais a componente horizontal do campo magnético da Terra. Se o campo magnético gerado nas bobinas for de intensidade superior à intensidade do campo magnético, os micro-organismos nadam segundo as linhas de força do campo gerado pelas bobinas. Ao se inverter o sentido da corrente elétrica nas bobinas, se inverte também o sentido do campo magnético por ela gerado; os micro-organismos fazem uma volta de  $180^{\circ}$ , semelhante a um "U", nadando em sentido contrário. Cada vez que se inverte o sentido do campo magnético, os organismos fazem uma volta em U (U-turn), de modo que sempre estão nadando/migrando na direção do campo magnético. Ad. J. Kalmijn e Blakemore aplicaram, durante  $1.75 \mu s$ , em amostras ricas em bactérias magnetotáticas, que migravam para o norte, um intenso pulso magnético de aproximadamente 600 Gauss, anti-paralelo ao sentido de migração dessas bactérias. Após a exposição, aproximadamente 50% das bactérias passaram a migrar em direção oposta à direção inicial de migração, isto é, nadaram para o sul. Esse efeito também foi observado quando uma amostra de bactérias magnetotáticas foi submetida a um campo oscilante de 60 Hz e intensidade superior a 1000 Gauss, produzido por um desmagnetizador de fitas

comercial. Após a exposição, a amostra passou a apresentar igual quantidade de bactérias nadando para o norte e para o sul. Estas experiências mostraram a possibilidade de se inverter os momentos de dipolos magnéticos das bactérias, bem como a impossibilidade de desmagnetizá-los. Portanto, o mecanismo de resposta das bactérias é devido à presença de material ferromagnético, compreendido na região de mono-domínio magnético<sup>[31]</sup>.

Considerando as características do campo geomagnético foi possível se pensar na existência de dois tipos de micro-organismos magnetotáticos: aqueles que migram na direção norte e os que migram na direção sul. Isto se deve ao fato de que, embora o momento magnético se alinhe com o campo magnético da Terra, os flagelos ficam localizados em extremidades diferentes nos dois tipos de organismos. Assim, fora da região do equador, os organismos magnetotáticos migram para cima ou para baixo. As águas do hemisfério norte apresentam um grande número de organismos do tipo norte, enquanto as amostras do hemisfério sul apresentam uma maior quantidade de organismos tipo sul. Os organismos do tipo norte têm seu momento de dipolo magnético alinhado com o campo magnético aplicado, movimentando-se no mesmo sentido desse campo<sup>[32]</sup>, já os do tipo sul, da mesma forma que os do norte, têm seu momento de dipolo magnético alinhado com o campo externo, porém se movimenta em sentido oposto ao sentido desse campo. Em sedimentos da região do equador magnético, onde a componente vertical é nula e as linhas do campo magnético da Terra são horizontais, foram encontrados os dois tipos de micro-organismos magnetotáticos em quantidades aproximadamente iguais, numa mesma amostra<sup>[3]</sup>. Na figura 1.3.3.19, representamos os tipos

de micro-organismos magnetotáticos.

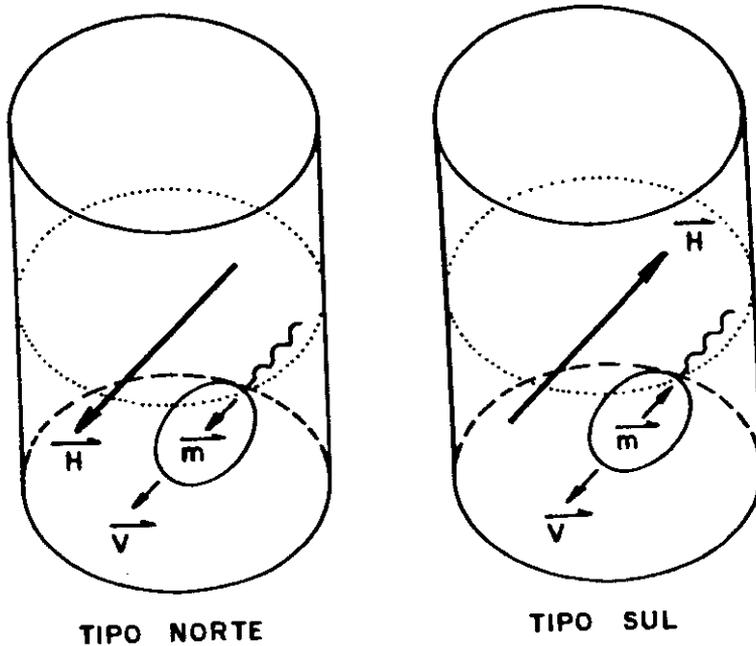


Fig. 1.3.3.19: Tipos de Micro-organismos magnetotáticos

R. P. Blakemore, R. S. Wolfe e D. Maratea, em 1979/1980, isolaram e cultivaram em um meio artificial um espirilo magnetotático, que foi denominado de "Aquaspirillum Magnetotacticum" [5.6]. Tais bactérias possuem flagelos em ambas as extremidades, de forma que elas podem se movimentar para frente ou para trás. O exame em microscopia eletrônica de transmissão dessa espécie revelou a presença de aproximadamente 20 partículas opacas ao feixe de elétrons, com forma geométrica cúbica, com um tamanho da ordem de  $500 \text{ \AA}$ , dispostas numa cadeia paralela ao longo do eixo maior do organismo. Cada uma dessas partículas está envolvida por uma membrana, com composição química não definida (magnetossomos).

Vale ressaltar que tais bactérias foram cultivadas em condições micro-aeróbicas (pouca concentração de  $O_2$ ), num meio contendo água de Woods Hole, ácido succínico e nitrato de sódio como principais fontes de carbono e nitrogênio. Assim, a magnetotaxia é um mecanismo eficiente para que o organismo alcance regiões mais profundas onde a pressão de oxigênio é baixa. Essa interpretação explica, parcialmente, as observações feitas em sedimentos do hemisfério norte e do hemisfério sul: existência de organismos do tipo sul (mesmo que em pequena quantidade) no hemisfério norte e vice-versa, bem como a existência, nas proximidades do equador, de aproximadamente o mesmo número de micro-organismos tipo norte e tipo sul, numa mesma gota de sedimento.

Quando a cultura de *Aquaspirillum Magnetotacticum* foi colocada num meio contendo pouca quantidade de ferro, na forma do composto orgânico quinato-férrico, as gerações seguintes dessas bactérias não mais respondiam à inversão do campo magnético aplicado. Além do mais, a análise por microscopia eletrônica não mostrou a presença da cadeia cristalina no interior da célula, característica da célula magnetotática. Portanto, somente aquelas células com magnetossomos apresentam o fenômeno da magnetotaxia, comprovando que as células magnetotáticas biomineralizam as partículas de ferro contidas no seu citoplasma.

A forma química do ferro presente na estrutura das bactérias magnetotáticas foi determinada através da espectroscopia de Mössbauer<sup>[4]</sup>, técnica que permite estudar e detectar a absorção de raios  $\gamma$  pelos núcleos dos átomos (Apêndice A).

Nas amostras de *Aquaspirillum magnetotacticum*, R. B. Frankel, R. P. Blakemore e R. Wolfe, em 1978/1979, mediram o es-

pectro Mössbauer do isótopo do Fe-57. Para células não magnéticas nenhuma absorção significativa de raio  $\gamma$  foi observada. Entretanto para as amostras magnetotáticas, o espectro obtido foi semelhante ao espectro de uma amostra pura de magnetita, à temperatura ambiente. Na figura 1.3.3.20 mostramos o espectro de Mössbauer obtido à temperatura ambiente de: (a) células não magnéticas da bactéria *Aquaspirillum Magnetotacticum*; (b) células magnéticas e (c) amostra de magnetita sintetizada em laboratório.

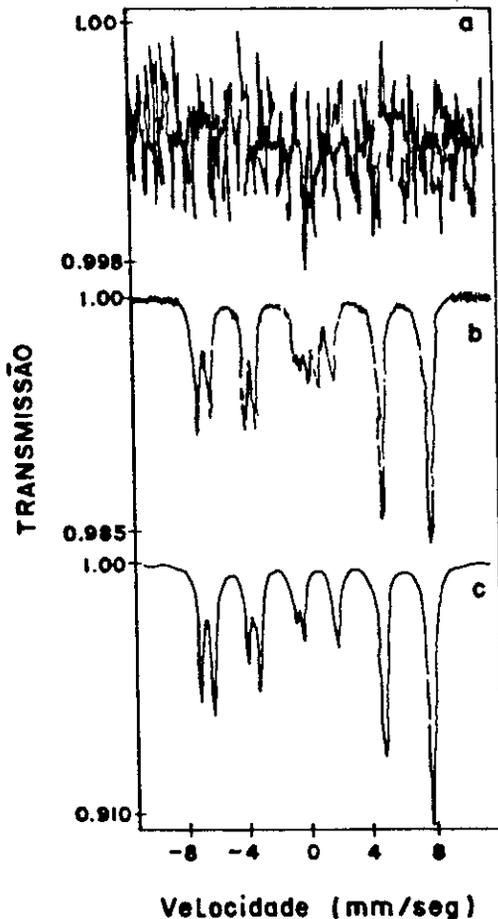


Fig. 1.3.3.20: Espectroscopia Mössbauer de *Aquaspirillum Magnetotacticum*, (a) células não magnetotáticas; (b) células magnetotáticas e (c) magnetita sintetizada em laboratório.

Estes resultados vieram confirmar os previstos anteriormente [2,31]. Como já sabemos, a magnetita é ferromagnética. Nesses materiais, as interações entre os átomos resultam num alinhamento antiparalelo dos spins, onde esta configuração corresponde a de menor energia. Assim, as propriedades macroscópicas dos cristais de magnetita dependem de sua forma e tamanho. Segundo cálculos teóricos realizados por Butler e Banerjes [33], cristais de magnetita de forma cúbica, compreendidos entre 500 Å e 760 Å e de forma alongada, como paralelepípedos, compreendidos entre 500 Å e 1400 Å, estão na região de mono-domínio magnético. Os cristais menores que 500 Å são superparamagnéticos, onde o momento magnético é uma função da agitação térmica, enquanto cristais maiores que 1400 Å são multidomínios magnéticos. Portanto, as medidas realizadas por Blakemore mostram que os cristais de magnetita biomineralizadas pelos micro-organismos magnetotáticos estão na região de mono-domínio magnético [34]. Em laboratório, a obtenção de partículas de tais dimensões é muito difícil, não se tendo compreensão dos mecanismos que as células magnetotáticas utilizam no processo da síntese dos cristais de magnetita.

A microscopia eletrônica de transmissão, quando possível, fornece boa imagem da cadeia de magnetita, de forma que, o momento magnético dos micro-organismos magnetotáticos pode ser estimado através da eq. 1.1.2.1. Na tabela 1.3.3.1, apresentamos os resultados de momentos magnéticos obtidos desde a descoberta das bactérias magnetotáticas, por R. P. Blakemore, em 1975.

Ref.	Local	Tipo de Água	Caracterização Micro-organismo	d(μm)	H <sub>T</sub> (Gauss)	m.10 <sup>-14</sup> (emu)	mH/kT
19	Baía de Woods Hale (USA)	Salobra	bactéria cocus	1,2	0,5	86	10,4
34	-	Cultura	bactéria espirila	6,0 x 0,5		130	15,7
10,38	Braço de Rio (Fortaleza)	Salobra	Alga Euglenophyceae	20,0 x 12,0	0,28	155.000	10483,1
38	Lagoa (Fortaleza)	Água doce	bactéria cocus	1,0		75	5,1
36	Lagoa Rodrigo de Freitas (RJ)	Salobra	bactéria cocus	1,8	0,25	140	8,5
37			Colônia ou agregado	5,0		240	14,5
7,8			Alga Chlamydomona	6,0		470	28,4
36	Alto da Boa Vista (RJ)	Água doce	bactéria cocus	1,0	0,25	40	2,4
			bactéria cocus	2,0		60	3,6
			bactéria	3,0 x 5,0		100	6,0
37	Baía de Guanabara (RJ)	Salobra	bactéria cocus	1,8	0,25	130	7,9
			Colônia ou agregado	5,0		800	48,3
			não identificado	10,0 x 18,0		5400	326,1

d - diâmetro do micro-organismo obtido por microscopia ótica ou eletrônica.

H<sub>T</sub> - campo geomagnético local

m - momento magnético

mH/kT - razão entre a energia magnética e energia térmica

Tabela 1.3.3.1: Momento magnético de Micro-organismos magnetotáticos de algumas localidades

Outro método possível de medida do momento magnético desenvolvido por C. P. Bean (modelo conhecido como Uturn<sup>[35]</sup>), utiliza o mecanismo de respostas do organismo à inversão do campo magnético externo. Tal modelo, entretanto, não leva em conta alguns fatores, tais como: perturbação do meio, desvios na trajetória em função dos mecanismos de movimento de flagelos, que estão associados a energias internas do ser vivo, etc. Porém, o modelo da volta em U é a maneira mais geral de se obter informações sobre as características magnéticas dos micro-organismos magnetotáticos.

As primeiras observações da presença de micro-organismos magnetotáticos no Brasil foram feitas por R. P. Frankel, F. F. Torres de Araújo, D. M. S. Esquivel e J. Danon, no início dos anos 80, que trabalharam com amostras do Rio de Janeiro e de Fortaleza<sup>[3]</sup>.

Posteriormente, começamos a fazer observações sistemáticas e frequentes, principalmente em águas da Lagoa Rodrigo de Freitas, por ser uma lagoa receptora de matéria orgânica, despejos industriais, comerciais e domésticos.

Análise por microscopia ótica de uma gota dessas águas revelou a existência de um mundo de pequenos organismos que, a princípio, nos pareceu bastante confuso, desordenado, etc. Observações mais detalhadas mostraram que a maioria desses micro-organismos apresentam características próprias, além de retirarem do meio informações precisas e, até mesmo, elaborá-las, gerando assim a sobrevivência e desenvolvimento da espécie.

Tais observações têm nos mostrado um grande número de micro-organismos magnetotáticos do tipo sul, descritos ante-

riormente e morfológicamente distintos, muitos dos quais não foram ainda identificados. A maioria das bactérias observadas são cocus e bastonetes cujos tamanhos variam de 1,0  $\mu\text{m}$  a 2,0  $\mu\text{m}$  e de 2,0  $\mu\text{m}$  a 3,0  $\mu\text{m}$ , respectivamente<sup>[8]</sup>. Também observamos nessas amostras, a presença de bactérias bastonetes cujo mecanismo de resposta à inversão do campo magnético é diferente do mecanismo usual, isto é, ao se inverter o sentido do campo magnético externo, os organismos que estão concentrados na extremidade da gota, da mesma forma que os outros micro-organismos magnetotáticos sofrem um torque, migrando em direção ao centro da gota. Entretanto, após um percurso de aproximadamente uns 20  $\mu\text{m}$ , tais bactérias invertem o sentido de movimento, sem girarem, voltando para a borda da gota, não levando em conta assim, o sentido do campo magnético aplicado. Tais bactérias quando fixadas, continuam apresentando a resposta passiva ao campo magnético externo. A microscopia eletrônica, quando possível, de micro-organismos magnetotáticos da região do Rio de Janeiro, nos tem revelado um grande número de bactérias cocus mostrando a existência de uma cadeia de material de alta densidade na forma linear, em X, em L e em S (fig. 1.3.3.21). Em analogia com outros trabalhos<sup>[2,34]</sup>, caracterizamos tais regiões como sendo cristais de magnetita. Vale ressaltar que o número dessas regiões por bactérias é bastante homogêneo, situando-se na faixa de 8 a 10 em todas as amostras analisadas.

Em amostras da Lagoa Rodrigo de Freitas observamos a presença de micro-organismos de coloração esverdeada (fig. 1.3.3.22), cuja forma é aproximadamente esférica, com um diâmetro compreendido entre 4,0  $\mu\text{m}$  e 7,0  $\mu\text{m}$ . Tal organismo apresenta

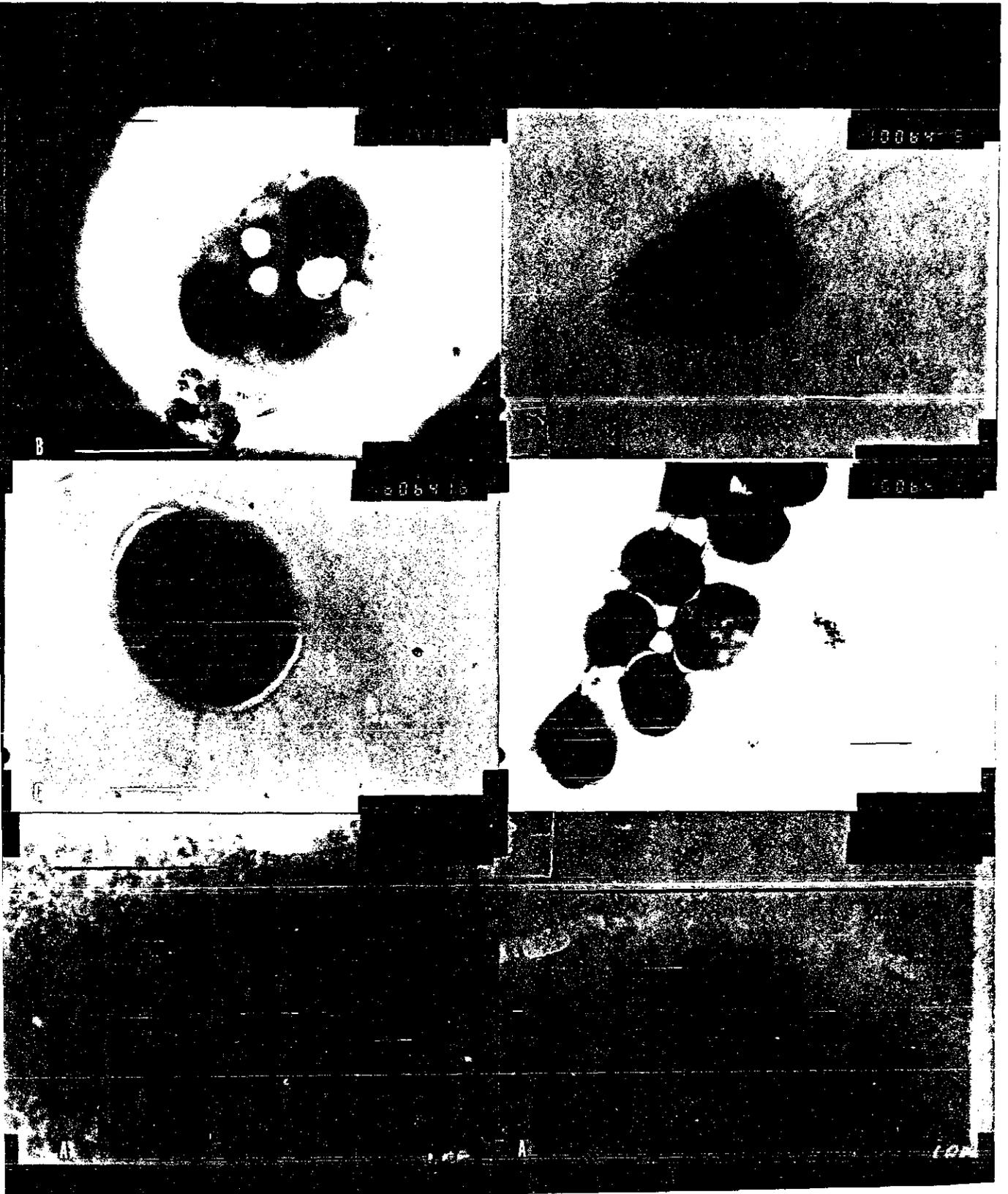


Fig. 1.3.3.21: Microscopia eletrônica de transmissão de bactérias cocus encontradas na Lagoa Rodrigo de Freitas mostrando regiões de alta densidade. (A) cadeia em L; (B) cadeia em S; (C) cadeia linear. Barra = 1  $\mu$ m

uma resposta semelhante à das bactérias magnetotáticas tipo sul, apresentando pequenas diferenças quanto ao movimento e comportamento. Quando concentramos esses organismos na extremidade da gota e observamos com aumento superior a 500X é possível perceber que os mesmos executam um movimento de rotação em torno de si. Esta rotação, após alguns instantes pára, reiniciando logo em seguida. Seu movimento, quando comparado com os das bactérias, se mostra bastante suave e menos fixo às linhas do campo magnético externo. Uma amostra rica com estes micro-organismos foi fixada com ácido ósmico a 1% em solução de 1% de ácido crômico, o que tornou possível observar micro-organismos com as seguintes características: contorno piriforme para esférico, com aproximadamente 11 ondulações nas paredes da membrana externa. Quando preparadas em solução de iodo, foi também possível observar uma estrutura em forma de cálice em três pontos coloridos de azul, identificados como cloroplasto, uma estrutura de um blefaroplasto central para um flagelo e de 4 a 5 pirenóides, estando o estigma localizado a 1/6, aproximadamente, do diâmetro da membrana celular. Tais características levaram, em novembro de 1981, o Prof. L. P. H. de Oliveira (19 -1983) do Instituto Oswaldo Cruz - Rio de Janeiro, a identificar esses micro-organismos como sendo uma Alga-verde do gênero *Chlamydomona* e sub-gênero *Pleichloris*, a qual recebeu o nome de *Chlamydomona-Magnetotática* [7]. Essa descoberta constitui, assim, a primeira observação de resposta ao campo magnético num organismo unicelular eucarioto. Estes organismos, entretanto, não voltaram a ser encontrados em amostras da Lagoa Rodrigo de Freitas. O desaparecimento delas, pelo menos no tipo de observação que realizamos, ocor-

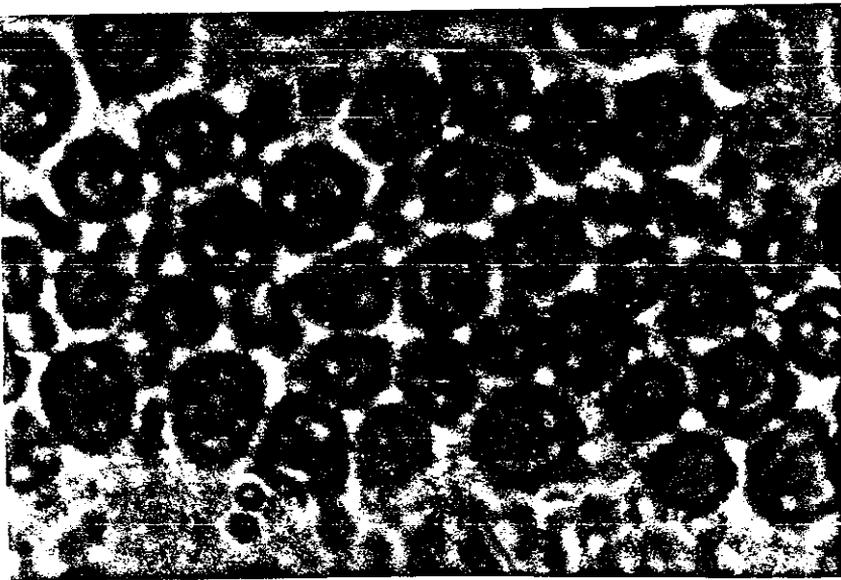
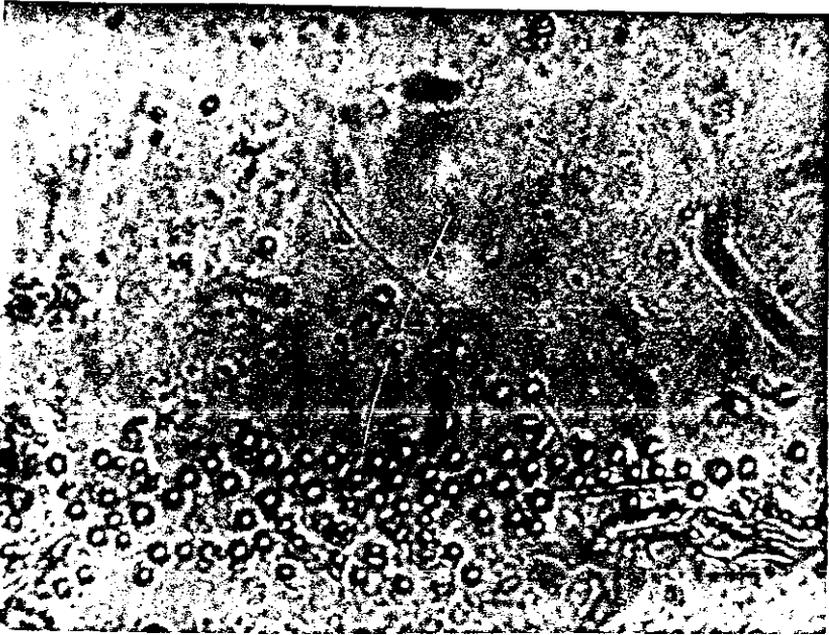


Fig. 1.3.3.22: Fotografia em Microscopia Ótica de micro-organismos Magnetotáticos de 6  $\mu\text{m}$  de diâmetro, encontrados na Lagoa Rodrigo de Freitas, concentradas na extremidade da gota

reu na época em que a Lagoa Rodrigo de Freitas passou por um processo de limpeza das águas e dos sedimentos nos primeiros meses de 1982. É possível que em amostras de águas e sedimentos de lagoas costeiras com características semelhantes a da Lagoa Rodrigo de Freitas estes organismos sejam novamente observados.

É importante colocar que observações e análise de amostras ricas com esses micro-organismos, em microscopia ótica, parecem indicar a existência de mais de um tipo de micro-organismos com movimentos característicos de magnetotaxia. Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura de uma mesma amostra parecem confirmar tal suposição<sup>[36]</sup>.

Análise por microscopia eletrônica de transmissão (MET) e varredura (MEV), realizadas por M. Farina, H.G.P. Lins de Barros, D.M.S. Esquivel e J. Danon, em 1983, com amostras de micro-organismos da Lagoa Rodrigo de Freitas e Baía da Guanabara, revelaram organismos aproximadamente esféricos, circundados por um grande número de fibras e apresentando em seu interior uma quantidade razoável de regiões de alta densidade, responsáveis pela magnetotaxia observada, contendo aproximadamente 1500 partículas dispostas em pequenos aglomerados. Estas regiões apresentam formas regulares bem definidas com dimensões variando entre 400 e 800 Å (dentro da região de mono-domínio magnético). A microanálise dessas partículas por raio-X, indicou o ferro como elemento predominante, embora apareça também, grande quantidade de enxofre. Vale ressaltar que essas células apresentam algumas invaginações nas membranas externas e também nas estruturas de seu interior. Estas características indicam que este micro-organismo seja uma colônia ou agregado não comum de células apresentan-

do estruturas internas especializadas<sup>[9,36]</sup>. A figura 1.3.3.23 mostra a microscopia eletrônica obtida desses organismos.

Da mesma forma ao que ocorre com as bactérias magnetotáticas, esses organismos, quando fixados com ácido ósmico, deixam de nadar, porém continuam respondendo à inversão do sentido do campo magnético aplicado, mostrando assim, que tais micro-organismos apresentam uma resposta passiva ao campo magnético externo, isto é, a magnetotaxia independen de qualquer função vital do organismo. Além do mais, todos os micro-organismos que observamos, foram expostos a um campo magnético oscilante intenso produzido por um desmagnetizador de fita comercial. Após a exposição, as amostras ricas em organismos tipo sul, passaram a apresentar metade, aproximadamente, de organismos tipo norte. Teis experiências, comparadas com trabalhos anteriores<sup>[31]</sup>, mostram que o material magnético contido no interior do citoplasma de tais organismos, está compreendido na região de mono-domínio magnético.

As características magnéticas dos micro-organismos que analisamos foram também obtidas através do modelo da volta em U, proposto por C. P. Bean<sup>[35,37]</sup>. Para obtermos maiores informações sobre tais organismos, fizemos uso de recursos cinematográficos, acoplados ao microscópio ótico. Esta técnica nos possibilitou uma análise de movimento e assim determinamos a velocidade média de migração, o tempo para realização da volta em U e o diâmetro da volta em U em função do campo magnético aplicado. Além disso, estes dados permitiram fazer uma estimativa do momento magnético médio dos micro-organismos da região do Rio de Janeiro.

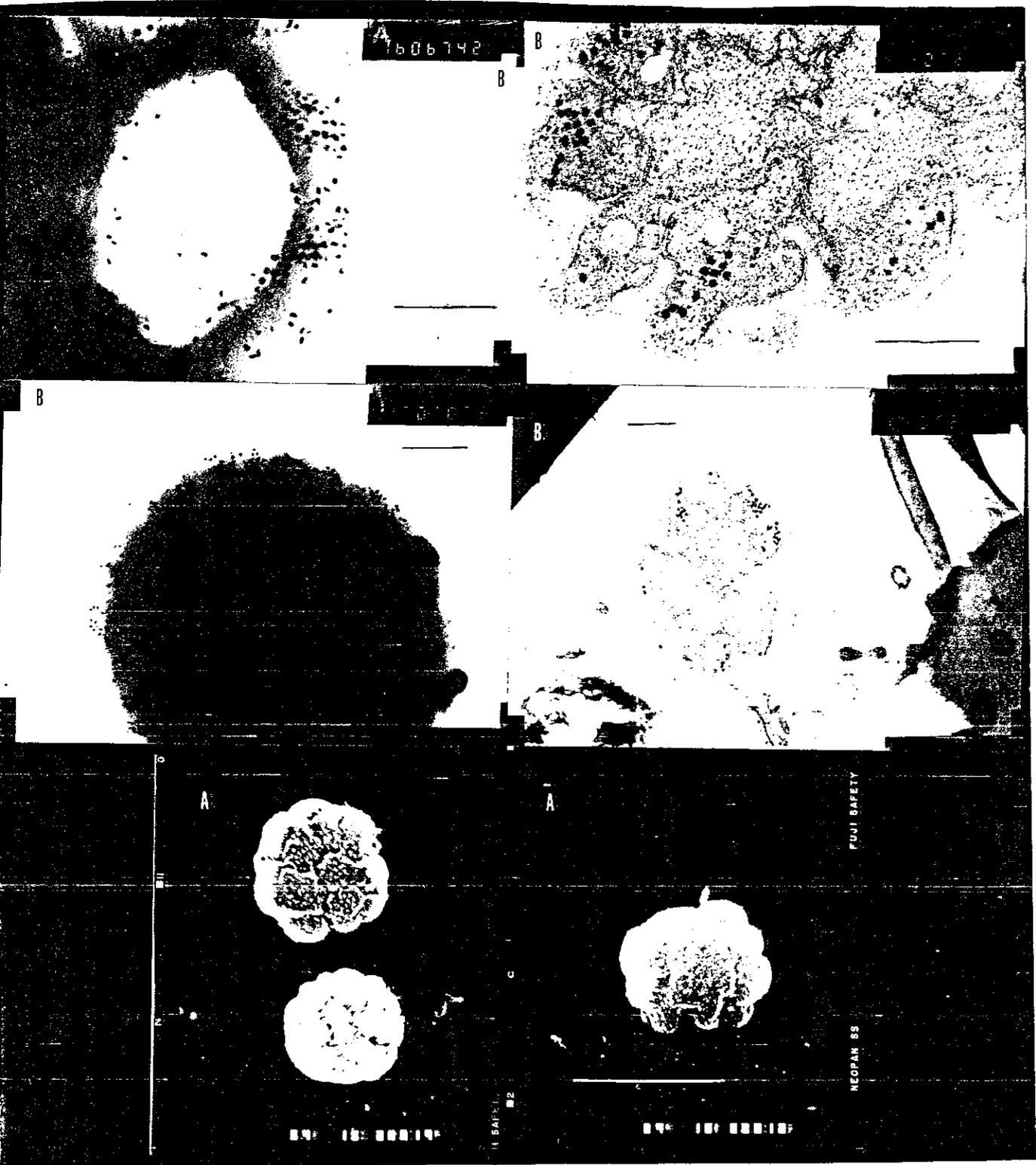


Fig. 1.3.3.23: Fotografia por Microscopia eletrônica de Microorganismos magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas, (a) imagem por Microscópio de Varredura, barra = 5 $\mu$ m; (b) imagem por Microscópio de transmissão, barra = 1 $\mu$ m.

Estudos realizados por F. F. Torres de Araújo, M. A. Pires, R. B. Frankel e C. E. M. Bicudo, em amostras de sedimentos da periferia de Fortaleza (CE), região próxima ao equador magnético, mostraram a presença de micro-organismos que nadam ao longo das linhas do campo magnético. A partir deste estudo, foi possível isolar um organismo eucarioto, identificado como uma Alga do gênero *Anisonema* (Euglenophyceae)<sup>[10]</sup>. Tais células, quando fixadas, giram orientando-se ao longo das linhas de campo. Essas algas têm uma forma aproximadamente oval, cujo eixo maior tem 20,0  $\mu\text{m}$  e o eixo menor, 12  $\mu\text{m}$ , apresentando dois flagelos por célula, sendo possível observar grãos de alta densidade, de dimensões compreendidas entre 480 Å e 1400 Å. A análise do espectro de raio-X dessas células indicou o ferro como elemento predominante e a difração de elétrons mostrou que as partículas possuem características de monocristais<sup>[38]</sup>.

Em 1986, E. Wajnberg, L. H. Salvo de Souza, H. G. P. Lins de Barros e D. M. S. Esquivel, utilizaram um magnetômetro de SQUID (Superconducting Quantum Interfering Device) a 4,2K, a fim de obter a primeira medida direta das propriedades magnéticas de amostras de micro-organismos do Rio de Janeiro. Como resultado, foi verificado nesses organismos, uma magnetização típica de materiais do grupo ferromagnético e o momento magnético obtido, coincidiu com os resultados que foram obtidos através da microscopia eletrônica de transmissão<sup>[39]</sup>.

Recentemente, H. G. P. Lins de Barros e D. M. S. Esquivel determinaram o tamanho limite superior que os micro-organismos magnetotáticos podem ter<sup>[40]</sup>. Neste trabalho, foram utilizadas considerações teóricas e análise de dados observáveis do

mecanismo de orientação magnética, para se chegar a um limite superior teórico do volume dos micro-organismos magnetotáticos.

## CAPÍTULO II

### DINÂMICA DE MICRO-ORGANISMOS MAGNETOTÁCTICOS

#### 2.1 Movimento Browniano

##### 2.1.1 Teoria de Einstein e Smoluchowski do Movimento Browniano

R. Brown, em 1827, quando observava através do microscópio grãos de pólen suspensos em água, notou que estas partículas apresentavam um movimento desordenado; este movimento passou a ser chamado de "movimento browniano". Experiências seguintes, realizadas por ele, revelaram não ter este movimento origem biológica. A princípio, a explicação deste movimento era atribuída a não homogeneidade da temperatura do fluido que rodeava as partículas ou a outras influências externas. Posteriormente, Wiener e Gouy concluíram que o movimento browniano tem origem nas colisões que as partículas sofrem com as moléculas do fluido que as rodeiam.

Em 1906 A. Einstein e Smoluchowski, partindo de considerações em teoria cinética dos gases, determinaram as equações que regem o movimento das partículas brownianas. A seguir apresentaremos a dedução da fórmula de Einstein na forma como foi desenvolvida por Langevin em 1908.

Langevin partiu da hipótese de que as forças que agem sobre as partículas brownianas podem ser agrupadas em duas categorias: a primeira se refere às forças, devido à viscosidade e a segunda, engloba todas as outras influências externas do fluido sobre as partículas.

Considerando as partículas brownianas como esferas de raio ( $a$ ) e massa ( $M$ ), localizadas num meio de viscosidade ( $\eta$ ), a equação que rege o movimento da partícula será dada pela equação de Newton, isto é:

$$M \cdot dv/dt = F(t) \quad 2.1.1.1$$

onde  $v(t)$  é a velocidade da partícula e  $F(t)$  é a força que age sobre a mesma em virtude das incessantes colisões moleculares. Segundo Langevin, a força  $F(t)$  pode ser escrita como a soma entre a força de origem viscosa  $f_{\text{visc.}}$ , que se opõe à força resultante  $F(t)$ , que movimenta a partícula.

$$F(t) = F(t) - f_{\text{visc}} \quad 2.1.1.2$$

sendo a força viscosa proporcional à velocidade da partícula e dado por:

$$f_{\text{visc}} = v/B \quad 2.1.1.3$$

onde  $B$  é a constante de mobilidade dada pela lei de Stokes<sup>[41]</sup> por:

$$B \equiv 1/6\pi\eta a$$

Logo, podemos escrever a eq. 2.1.1.1 como:

$$M \cdot dv/dt = F(t) - v/B \quad 2.1.1.4$$

ou na forma

$$M\ddot{r} = F(t) - (1/B)\dot{r} \quad 2.1.1.5$$

É possível calcular o deslocamento que as partículas brownianas sofrem quando da interação das moléculas do meio. Esses deslocamentos diferem em intensidade e em direção, de forma que a soma dos deslocamentos de todas as partículas será igual a zero. Uma vez que os deslocamentos podem ter igual probabilidade, com sinal negativo ou positivo, tal que o valor médio do deslocamento  $\langle r \rangle$  das partículas será igual a zero. Entretanto, se tomarmos o desvio médio quadrático  $\langle r^2 \rangle$ , este será diferente de zero, uma vez que  $r^2$  não muda de sinal quando o sinal de  $r$  muda. Assim, multiplicando-se a eq. 2.1.1.5 por  $r$ , teremos:

$$M \cdot r \cdot \ddot{r} = r \cdot F(t) - (1/B)r \cdot \dot{r} \quad 2.1.1.6$$

Uma vez que

$$r \cdot \ddot{r} = \frac{1}{2} \frac{d^2(r^2)}{dt^2} - \left(\frac{dr}{dt}\right)^2$$

e

$$r \cdot \dot{r} = \frac{1}{2} \frac{d(r^2)}{dt}$$

A equação 2.1.1.6 poderá ser expressa por:

$$\frac{M}{2} \frac{d^2(r^2)}{dt^2} - M \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = r \cdot F(t) - \frac{1}{2B} \frac{d(r^2)}{dt} \quad 2.1.1.7$$

Tomando o valor médio dessa expressão, para um número bastante grande de partículas brownianas, temos

$$\frac{M}{2} \frac{d^2}{dt^2} \langle r^2 \rangle - M \left( \frac{d}{dt} \langle r \rangle \right)^2 = \langle rF(t) \rangle - \frac{1}{2B} \frac{d}{dt} \langle r^2 \rangle \quad 2.1.1.8$$

O termo  $\langle r.F(t) \rangle$  é entretanto, nulo uma vez que a força varia de maneira totalmente aleatória, porque temos forças em todas as direções, assim, a equação 2.1.1.8, se reduz a:

$$\frac{M}{2} \frac{d^2}{dt^2} \langle r^2 \rangle - M \left( \frac{d}{dt} \langle r \rangle \right)^2 = - \frac{1}{2B} \frac{d}{dt} \langle r^2 \rangle \quad 2.1.1.9$$

Multiplicando-se a equação 2.1.1.9 por 2/M, temos

$$\frac{d^2 \langle r^2 \rangle}{dt^2} - 2 \left( \frac{d}{dt} \langle r \rangle \right)^2 = - \frac{1}{MB} \frac{d}{dt} \langle r^2 \rangle \quad 2.1.1.10$$

ou

$$\frac{d^2 \langle r^2 \rangle}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{d}{dt} \langle r^2 \rangle = 2 \langle v^2 \rangle \quad 2.1.1.11$$

onde fizemos  $\tau = M.B.$

Durante o processo de interação das partículas brownianas com as moléculas do líquido ocorrem trocas de energia. No equilíbrio térmico a quantidade  $\langle v^2 \rangle$ , de acordo com o teorema de equipartição da energia, vale  $3kT/M$ .

Fazendo-se

$$\langle r^2 \rangle = u \quad 2.1.1.12$$

a equação 2.1.1.11 ficará reduzida a

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{du}{dt} = \frac{6kT}{M} \quad 2.1.1.13$$

que é uma equação diferencial linear não-homogênea de segunda ordem em  $u$ , cuja solução pelo método de variação dos parâmetros é dada por<sup>[42]</sup>

$$r^2 = \frac{6kT\tau^2}{M} \left\{ \frac{1}{\tau} - (1 - \exp. - t/\tau) \right\} \quad 2.1.1.14$$

Observe que, para  $t \ll \tau$  obtemos

$$\langle r^2 \rangle = (3kT/M) \cdot t^2 \quad 2.1.1.15$$

que é consistente com a equação de movimento de Newton

$$\langle r^2 \rangle = \langle v^2 \rangle \cdot t^2 \therefore r = v \cdot t$$

Por outro lado, se  $t \gg \tau$ , temos

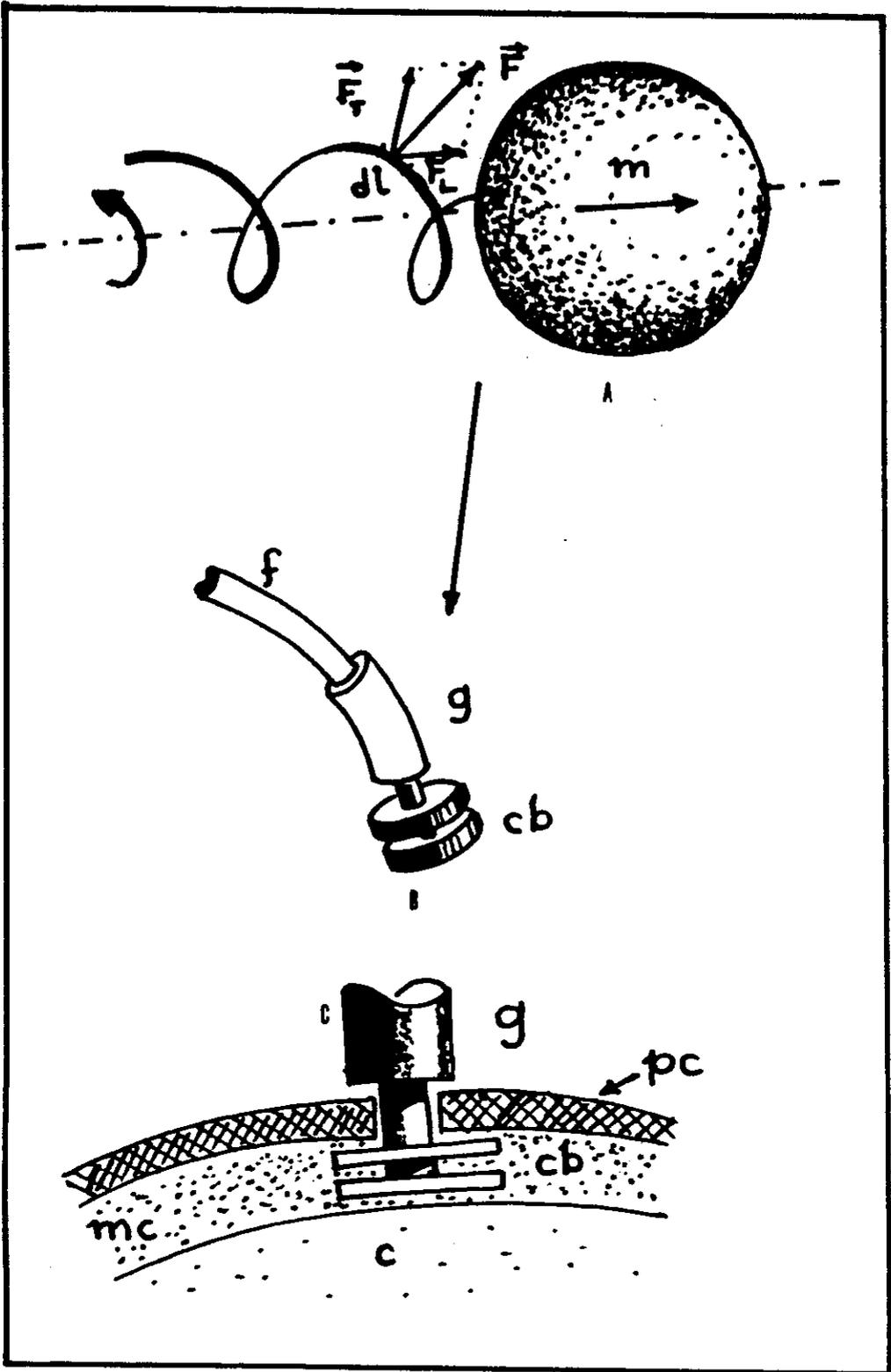
$$\langle r^2 \rangle = (6kT\tau/M) \cdot t = (6kT) \cdot t \quad 2.1.1.16$$

sendo o termo  $kT$  o coeficiente de difusão (D) onde a equação 2.1.1.16 é chamada de equação de Einstein-Smoluchowski. Vale ressaltar que esta equação não depende, de modo algum, da massa da partícula. Assim, conhecendo-se a temperatura, o raio da partícula e o deslocamento é possível estimar a constante de Boltzmann (k), conforme demonstrou Perrin, em 1909, obtendo para k o valor  $1,380 \cdot 10^{-16}$  erg/K [43].

Para partículas com dimensões de uma bactéria magnetotática de raio médio  $a = 0,5 \mu\text{m}$  num meio de viscosidade  $\eta = 10^{-2}$  poise à temperatura ambiente ( $kT = 4,14 \cdot 10^{-14}$  cgs), observada durante 1,0s, obtemos deslocamentos correspondentes a aproximadamente igual ao raio da bactéria. Isto mostra que o efeito do movimento browniano de translação é desprezível quando comparado às velocidades de translação desses organismos.

## 2.1.2 Movimento da Translação de Bactérias

As células de bactérias são propulsionadas por estruturas helicoidais, os flagelos, que giram em torno do terminal basal. O comprimento do flagelo pode ser de cerca de dez vezes o diâmetro da bactéria. Além disso, o flagelo é uma estrutura rígida. A figura 2.1.2.1(a) representa esquematicamente uma bactéria. O filamento é constituído por um gancho e dois discos conhecidos por corpo basal (fig. 2.1.2.1(b - c)). A energia de rotação é dada através de um mecanismo complexo de fluxo de prótons através da membrana. O flagelo ao girar, produz uma força sobre o corpo da célula. Como o comprimento do filamento flagelar é umito grande comparado com o passo da hélice, podemos considerá-lo como sendo composto de um número inteiro de voltas. Ao



$\vec{F}$  - força total do elemento de flagelo  $d\ell$ ,  
 $\vec{F}_T$  - componente transversal de  $\vec{F}$   
 $\vec{F}_L$  - componente longitudinal de  $\vec{F}$ .  
 $\vec{m}$  - o momento magnético da célula  
 $f$  - filamento,  $g$  - gancho,  $cb$  - corpo basal,  
 $mc$  - membrana citoplasmática,  $pc$  - parede celular e  $c$  - citoplasma

Fig. 2.1.2.1: Representação esquemática do flagelo da bactéria

rodar num meio viscoso, o flagelo produz uma força que é basicamente longitudinal. A componente transversal é muito pequena e pode ser desprezada. Na figura 2.1.2.1(a), apresentamos o diagrama de um elemento ( $d\ell$ ) do flagelo.

A velocidade de translação do corpo da bactéria depende diretamente da força flagelar. O número de Reynolds de uma bactéria é extremamente baixo e, desta forma, podemos tratar o problema como sendo de um escoamento perfeitamente lamelar. O termo de inérgica, relacionado com a aceleração, pode ser desprezado. A equação de movimento de translação de uma bactéria magnetotática esférica é dada por:

$$M \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = 6\pi\eta a \frac{d\vec{r}}{dt} + F_{\text{flag}} \quad 2.1.2.17$$

onde os efeitos de perturbação foram desprezados. Na equação 2.1.2.17,  $M$  é a massa da bactéria e pode ser escrita como  $(4/3)\pi a^3$  onde  $a$  é o raio da bactéria;  $\eta$  é a viscosidade do meio;  $\vec{F}_{\text{flag}}$  é a força flagelar total e  $\vec{r}$  é a coordenada da bactéria com relação a um sistema de referência apropriado (por exemplo o laboratório).

Observe que o termo do lado esquerdo é proporcional a  $a^3$ . O primeiro termo do lado direito é proporcional ao raio ( $a$ ) enquanto que o segundo termo só depende da atividade flagelar. Desta forma, em objetos pequenos, podemos desprezar o termo proporcional ao volume (ou seja, o termo de massa) e escrever a equação 2.1.2.17 como

$$\vec{F}_{\text{flag}} = - 6\pi\eta a \frac{d\vec{r}}{dt} \quad 2.1.2.18$$

A força flagelar é equilibrada pela força viscosa de tal forma que o movimento é retilíneo e uniforme. As mudanças bruscas observadas na microscopia ótica quando olhamos populações de bactérias ou outros organismos, são devidas a alteração produzida pela rotação do flagelo e chamadas de "tumble". Em um dado momento o flagelo pára de rodar e inicia uma rotação no sentido oposto. Os vários flagelos que participam do movimento de uma bactéria se espalham e a força resultante tem uma direção qualquer. Como não há inércia do movimento, uma vez que o termo de massa pode ser desprezado, o organismo instantaneamente altera sua direção.

A velocidade de rotação dos flagelos depende fortemente da temperatura. Como a velocidade de deslocamento da célula está relacionada com a rotação dos flagelos, temos que a temperatura é um parâmetro importante que deve ser levada em conta. Não podemos, entretanto, controlar a temperatura da lâmina e, desta forma, não podemos estudar as alterações do movimento devido à variações de temperatura. Mantivemos, em todas as gravações e filmagens, a lâmina na temperatura ambiente com uma iluminação adequada para a realização das tomadas.

Outro ponto importante que deve ser frisado aqui é o fato de que todo deslocamento é devido à ação do flagelo sobre o corpo da célula. Se o flagelo pára de girar, a equação de movimento (eq. 2.1.2.17) é dada por:

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = - \frac{\vec{v}}{B} \quad 2.1.2.19$$

sendo  $v = d\vec{r}/dt$  a velocidade da bactéria e a solução da equação

2.1.2.19 é:

$$v(t) = v(0) \exp.(-t/\zeta) \quad 2.1.2.20$$

onde  $v(0)$  é a velocidade inicial do organismo e  $\zeta = M/6\pi\eta a$  ou  $2a^2\rho/9\eta$ .

Fazendo-se  $a = 10^{-4}$  cm,  $\rho = 1\text{g/cm}^3$  e  $\eta = 10^{-2}$  poise,  $\zeta$  será da ordem de  $2 \times 10^{-7}$  seg. A distância que o micro-organismo pode deslizar sem gastar energia quando para de nadar, é:

$$\bar{d} = \int_0^t v(t) dt \simeq v(0) \cdot \zeta \simeq 4 \times 10^{-10} \text{cm} \quad 2.1.2.21$$

Isto mostra que não há deslocamento sem haver força sobre a célula, uma vez que o deslocamento devido a efeito inercial seria da ordem de 1/100, dimensões tipicamente atômicas<sup>[44]</sup>. Isto mostra também, que os deslocamentos produzidos pelo movimento browniano são importantes nestas dimensões.

## 2.2 Dinâmica de Micro-organismos Magnetotáticos

### 2.2.1 Grau de Orientação de Micro-organismos Magnetotáticos no Campo Geomagnético

O campo magnético atua sobre a célula magnetotática de duas maneiras: produzindo um torque que a orienta e produzindo uma força sobre a célula no sentido de causar um deslocamento no meio. A segunda contribuição, qual seja, de produzir uma for

ça, pode ser desprezada. A força magnética é proporcional ao gradiente de campo. Nas dimensões que estamos trabalhando (cerca de alguns milhares de Angstrom, dimensões típicas de cristais biomineralizados) e com os campos magnéticos usados (campos produzidos por bobinas paralelas) a variação do campo é muito pequena e, assim, o gradiente de campo pode ser considerado nulo.

Observamos que, células fixadas não se deslocam sob a ação do campo magnético. Quando estamos observando agregados ou colônias magnetotáticas, com diâmetro de cerca de 5  $\mu\text{m}$ , ou espirilos, podemos ver que células fixadas, orientam-se. No caso de bactérias cocus ou bastonetes, a microscopia ótica não tem definição suficiente para se observar esta orientação.

O grau de alinhamento médio de micro-organismos magnetotáticos em presença de um campo magnético externo pode ser estimado pela teoria clássica do paramagnetismo de Langevin, discutida na seção 1.1.3.

Micro-organismos magnetotáticos afastados, podem ser tratados, em primeira aproximação, como dipolos magnéticos que não interagem entre si.

Assumimos que os micro-organismos sejam esferas de raio  $a$ , dotados de um momento magnético  $\vec{m}$ , e que se movem a uma velocidade instantânea  $v_0$  (independente do campo magnético  $\vec{H}$ ) num meio de viscosidade  $\eta$  homogêneo, e que todo desvio da trajetória retilínea é devido ao movimento browniano. Devido à agitação térmica o momento magnético faz, num certo instante, um ângulo  $\theta_i$  com a direção do campo magnético (fig. 2.2.1.2).

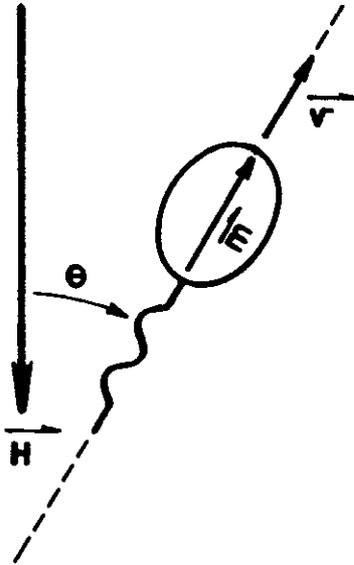


Fig. 2.2.1.2: Representação esquemática de um Micro-organismo Magnetotático submetido à Inversão de Campo Magnético Externo

A projeção da velocidade instantânea segundo a direção do campo magnético é:

$$V_{||} = V_0 \cdot \cos(\theta_i) \quad 2.2.1.22$$

O alinhamento com o campo magnético externo não é totalmente possível, já que os micro-organismos estão sujeitos às variações do meio. Assim, tomando-se o valor médio da eq. 2.2.1.22, teremos:

$$\langle V_{||} \rangle = \langle V_0 \cdot \cos(\theta_i) \rangle \quad 2.2.1.23$$

Considerando a velocidade instantânea  $V_0$  como constante, o cálculo do valor médio da eq. 2.2.1.23 se reduz ao cálculo do  $\langle \cos(\theta_i) \rangle$ ,

isto é:

$$\langle V_{\parallel} \rangle / V_0 = \langle \cos(\theta_i) \rangle \tag{2.2.1.24}$$

O termo  $\langle \cos(\theta_i) \rangle$  pode ser calculado através da eq. 1.1.3.11 e da eq. 1.1.3.12, isto é:

$$\langle \cos(\theta_i) \rangle = \frac{\int_0^{\pi} \cos(\theta_i) \exp. (mH \cos(\theta_i) / kT) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi} \exp. (mH \cos(\theta_i) / kT) \sin(\theta) d\theta} \tag{2.2.1.25}$$

Logo

$$\langle \cos(\theta_i) \rangle = \langle V_{\parallel} \rangle / V_0 = L(mH/kT) \tag{2.2.1.26}$$

onde  $L(mH/kT)$  é a função de Langevin, dada pela eq. 1.1.2.13. Observe que quando a razão  $\langle V_{\parallel} \rangle / V_0$  for muito menor que 1, ou  $mH/kT \rightarrow 0$ , os micro-organismos não estarão alinhados com o campo magnético  $\vec{H}$ . Porém, se a razão  $\langle V_{\parallel} \rangle / V \rightarrow 1$  ou  $mH/kT \rightarrow 10$ , os organismos tendem a estar totalmente alinhados com o campo magnético aplicado.

### 2.2.2 Modelo da Volta em U

O modelo da volta em U, proposto por C. P. Bean [35, 37], utiliza a resposta do organismo à inversão de sentido do campo mantético. Sob a ação de campo magnético constante, os micro-organismos magnetotáticos descrevem trajetórias complexas

que tem um eixo alinhado à linha de campo. Quando este campo é subitamente invertido, os micro-organismos são submetidos a um torque e o sentido de movimento se inverte segundo uma trajetória semelhante a um U.

Consideremos micro-organismos esféricos de raio  $a$ , dotados de momento de dipolo magnético  $\vec{m}$ . Escolhemos o eixo  $\hat{z}$  paralelo ao campo magnético  $\vec{H}$ . Assim, o ângulo entre  $\vec{m}$  e  $\vec{H}$  é dado pelo ângulo azimutal  $\theta$ . Tratamos o problema no centro de massa do sistema. Este modelo não leva em consideração a forma efetiva, nem tão pouco a energia biológica que faz o organismo se movimentar (flagelos, cílios, etc.). Constitui, porém, uma maneira de se estimar indiretamente o momento magnético  $\vec{m}$  desses organismos.

A razão entre a força inercial e a viscosa,

$$\frac{\text{força inercial}}{\text{força viscosa}} \sim \frac{av\rho}{\eta} \quad 2.2.2.27$$

é chamada de número de Reynolds ( $R$ ), dada por

$$R \equiv \frac{av\rho}{\eta} = \frac{av}{\nu} \quad 2.2.2.28$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática, para a água é  $10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/seg,  $a$  é o raio do organismo e  $v$ , sua velocidade. Para micro-organismos em geral, o número de Reynolds é da ordem de  $10^{-4}$  [45]. Assim, os efeitos hidrodinâmicos passam a ser importantes, uma vez que qualquer variação no meio produz alterações no movimento dos micro-organismos, levando a uma competição entre os mecanismos orientadores. O deslocamento produzido pelo deslocamento do orga

nismo no meio é, portanto, lamelar, uma vez que o número de Reynolds é baixo.

A equação de movimento no centro de massa, dentro das aproximações apresentadas, é:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_i \tau_i \quad 2.2.2.29$$

onde  $\vec{L}$  é o momento angular do organismo e  $\sum_i \tau_i$ , a soma de todos os torques que atuam sobre o micro-organismo.

Observe que, ao escrevermos a eq. 2.2.2.29 estamos, implicitamente, dizendo que a orientação do organismo não depende de nenhuma das suas forças vitais e podemos tratá-lo como uma partícula inanimada.

Os torques que agem sobre o organismo são devido ao campo magnético e ao meio, isto é:

$$\sum_i \tau_i = \tau_{\text{mag.}} + \tau_{\text{visc.}} \quad 2.2.2.30$$

A equação 2.2.2.29 fica:

$$\frac{d(Ma^2\theta)}{dt} = mH \text{sen}(\theta) + 8\pi\eta a^3\dot{\theta} \quad 2.2.2.31$$

O termo do lado esquerdo é proporcional a  $a^5$  (uma vez que:

$M = \rho_{\text{célula}} a^3$ , onde  $\rho_{\text{célula}}$  é a densidade do micro-organismo) enquanto os demais termos dependem, no máximo, de  $a^3$ . Para organismos pequenos, ou seja,  $R \simeq 10^{-4}$ , primeiro termo pode ser desprezado. Assim, a equação 2.2.2.31 pode ser escrita como:

$$mH \text{sen}(\theta) - 8\pi\eta a^3\dot{\theta} = 0 \quad 2.2.2.32$$

logo teremos

$$\dot{\theta} = \left( \frac{1}{T_0} \right) \text{sen}(\theta) \quad 2.2.2.33$$

onde fizemos  $T_0 \equiv (8\pi\eta a^3/mH)$ . Integrando a eq. 2.2.2.33 de  $\theta_i$  a  $\theta_f$ , tem-se

$$\int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{d\theta}{\text{sen}\theta} = \int_0^t \frac{dt}{T_0}$$

cuja solução é:

$$\ln \text{tg}(\theta_f/2) - \ln \text{tg}(\theta_i/2) = t/T_0 \quad 2.2.2.34$$

Quando o campo magnético é rapidamente invertido ( $\theta_i = \pi$ ), a eq. 2.2.2.34 diverge. Esta dificuldade pode ser removida se  $\theta_i$  é tomado muito pequeno, tal que  $\text{tg}(\theta_i/2) \sim \theta_i/2$  e igual ao ângulo médio obtido pela teoria de Langevin, para o caso em que  $mH \gg kT$ . Expandindo o  $\cos(\theta_i)$ , teremos

$$\cos(\theta_i) \sim 1 - (\theta_i^2/2!) \quad 2.2.2.35$$

logo

$$(\theta_i) \sim (2kT/mH)^{1/2} \quad 2.2.2.36$$

Assim,

$$\ln \text{tg}\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \sim \ln\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \sim \ln\left(\frac{2kT}{mH}\right)^{1/2}$$

e a expressão final para o tempo de reversão, fica:

$$\zeta = \frac{8\pi\eta a^3}{mH} \ln\left(\frac{2mH}{kT}\right) \quad 2.2.2.37$$

É importante notar que a eq. 2.2.2.37 não depende da velocidade do micro-organismo e é diretamente proporcional a  $a^3$  ou seja, ao volume do organismo.

Quando da reversão do campo magnético, o micro-organismo descreve uma trajetória com a forma de um U, fig. 2.2.2.3, cujo diâmetro (L) pode ser obtido por:

$$L = \int_0^\infty v_T \cdot dt \quad 2.2.2.38$$

onde  $v_T = v_0 \sin(\theta)$ .

Pela equação 2.2.2.33, temos:

$$\sin(\theta) = \frac{8\pi\eta a^3}{mH} \frac{d\theta}{dt} \quad 2.2.2.39$$

integrando, obtemos:

$$L = \frac{8\pi^2\eta a^3}{mH} \cdot v_0 \quad 2.2.2.40$$

Podemos observar que L é diretamente proporcional à velocidade ( $v_0$ ) e inversamente proporcional à energia de interação magnética (mH).

A equação 2.2.2.37 e a 2.2.2.40, para  $\zeta$  e L, mostram que podemos estimar o momento magnético do micro-organismo a partir de medidas realizadas para L,  $\zeta$ , a,  $v_0$  e H. O valor de H,

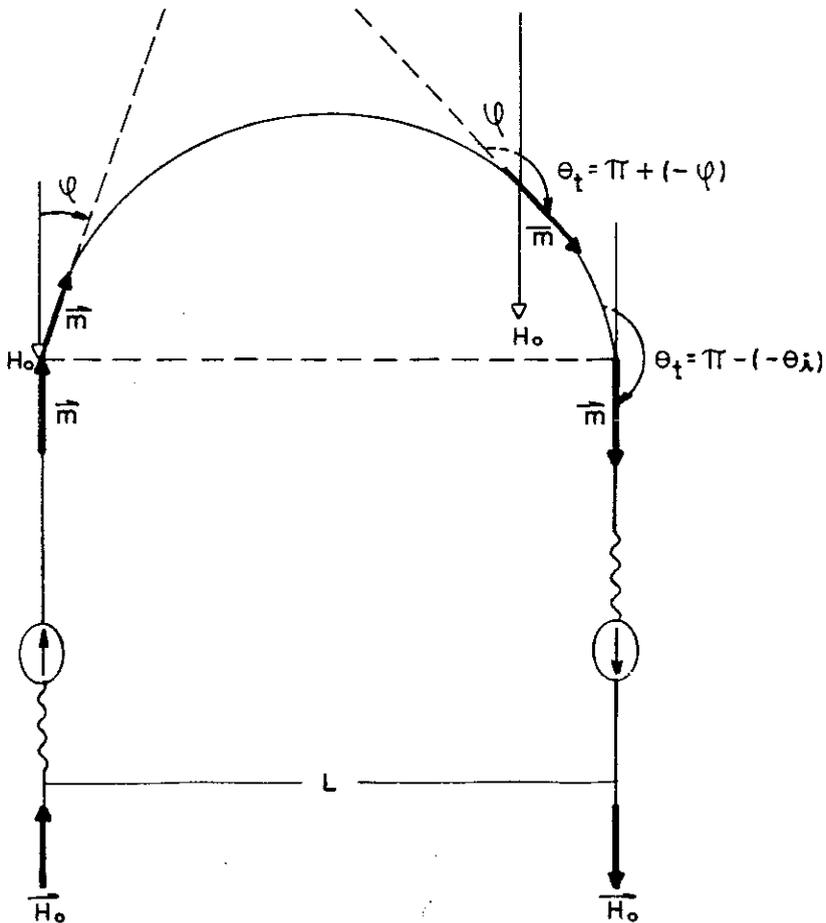
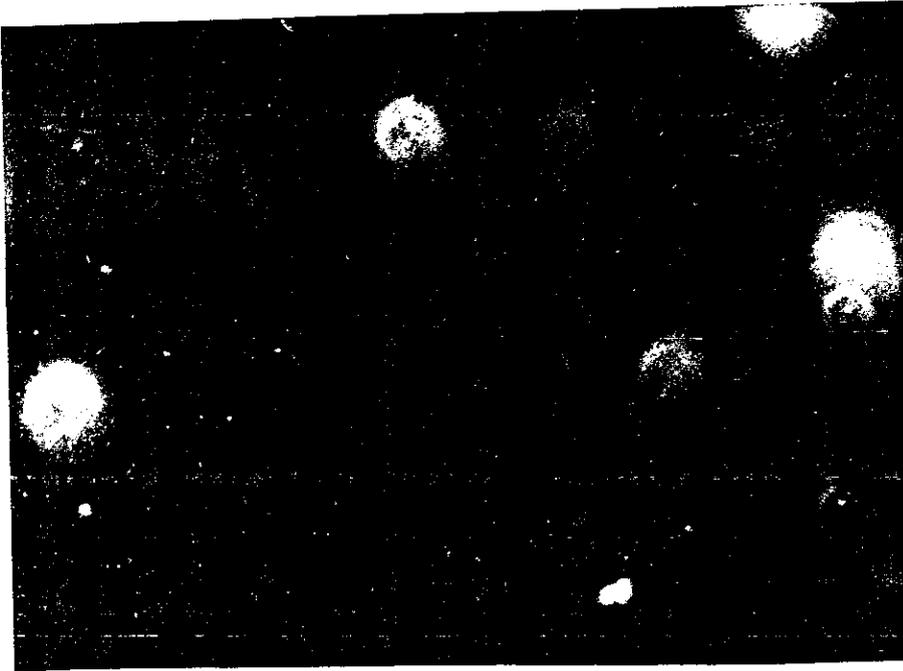


Fig. 2.2.2.3: Microfotografia ótica obtida em campo escuro da trajetória de vários micro-organismos magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas. O tempo de exposição é de 3seg e velocidade de 200 $\mu$ m/s em campo de 4,1 Gauss. Representação esquemática da volta em U.

pode ser medido usando-se bobinas calibradas. A velocidade ( $v_0$ ) e o diâmetro ( $L$ ) bem como o tempo ( $\zeta$ ), podem ser medidos utilizando recursos fotográficos e cinematográficos. O raio ( $a$ ) pode ser obtido por microscopia eletrônica de varredura ou transmissão, o que introduz grandes dificuldades no trabalho experimental uma vez que é necessário obter amostras ricas e conhecer a forma como as células se alteram quando preparadas para a microscopia eletrônica.

Um procedimento interessante é o de realizarmos medidas de  $\zeta$  e  $L$ . A partir da eq. 2.2.2.40, estimamos o momento magnético ( $m$ ). Levando-se este valor na eq. 2.2.2.37, obtemos um valor teórico ( $\zeta_u$ ) que é comparado com o dado obtido no laboratório ( $\zeta_{exp}$ ). A tabela 2.2.2.1 mostra resultados obtidos por diversos autores.

O modelo da volta em U, proposto por C. Bean, permite um procedimento rápido para estimar o momento magnético de micro-organismos magnetotáticos. Apesar de suas aproximações, os valores obtidos por ele estão em bom acordo com medidas feitas por outros métodos (Microscopia Eletrônica e SQUID).

Ref.	Local	Caracterização	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$\eta$	H (Gauss)	$v$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$\zeta_u$ (s)	$\zeta_{exp}$ (s)	L ( $\mu\text{m}$ )	$m \cdot 10^{-14}$ (emu)	$mH_T/kT$
19	Woods Hole (USA)	Bactérias cocus	0,5	-	0,5	103	-	-	-	86	10
34	cultura	bactérias espirilo	$\sim 0,5$	22	0,5	-	0,4	-	-	130	16
10	mangue (CE)	Alga Anisonema	20 x 12	$5 \cdot 10^4$	0,28	-	-	-	-	155.000	10.145
		bactérias cocus		18						110	7
38	Litoral (CE)	bactéria espirilo		12	0,28					75	5
		Algs espécie A		$8 \cdot 10^3$				$0,6 \pm 0,2$		120.000	8.116
36,37	Água doce	bactéria cocus	0,5	5		100	0,08	0,05	3	60	3
			1,0	7	9,3	50	0,3	0,3	8	60	4
			$\sim 2,0$	-		12	0,9	1,3	8	100	6
7,8	Lagoa Rodrigo de Freitas	Alga Chlamydomona	2,5	$> 10^3$		40	1,3	1,4	30	240	17
36		bactéria cocus	0,9	10	9,3	-	-	0,09	-	140	8
	Baía de Guanabara	bactéria cocus	0,9	10				0,1		130	6
36,37		Aglomerado ou Colônia	2,5	-	9,3	70	0,3	0,4	11	800	48
		Não identificado	5 x 9	-		30	0,4	2,1	20	5.400	326

$a$  - raio do micro-organismo  
 $H$  - campo magnético aplicado  
 $v$  - velocidade média de migração  
 $\zeta_u$  - tempo calculado para realização da volta em U  
 $\zeta_{exp}$  - tempo medido para realização da volta em U  
 $L$  - diâmetro da volta  
 $m$  - momento magnético  
 $mH_T/kT$  - razão entre as energias magnética e térmica

Tabela 2.2.2.1: Características de micro-organismos magnetotáticos de várias localidades

## CAPITULO III

### OBSERVAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma descrição geral das observações realizadas em amostras de sedimentos da região do Rio de Janeiro (RJ), bem como dos métodos e técnicas utilizadas em laboratório, para possibilitar a estimativa do momento magnético dos micro-organismos magnetotáticos.

#### 3.1 Coleta de Amostras

Podemos separar a coleta de material em duas fases: a primeira, quando as amostras foram coletadas sistematicamente, num único local - Lagoa Rodrigo de Freitas; a segunda, quando passamos a analisar amostras de diferentes locais da região do Rio de Janeiro.

A escolha inicial da Lagoa Rodrigo de Freitas, como local de coleta de sedimentos foi feita levando-se em conta dois fatores: estar localizada em lugar de fácil acesso e manter condições e peculiaridades que facilitam pesquisas desse gênero.

Posteriormente passamos a fazer coletas na Baía de Guanabara, lagoa de Marapendi, Rio Maracanã, Lagoa de Itaipú, I-

taipuaçú, etc. Em todos os locais as amostras foram coletadas a uma distância da margem de 1,0 a 4,0 metros e a uma profundidade variando de 15 a 60 cm.

Para coleta do material, utilizamos o aparelho mostrado na fig. 3.1.1 e, para seu armazenamento, os recipientes disponíveis no momento, tais como garrafas de plásticos, vidros, aquários, etc.

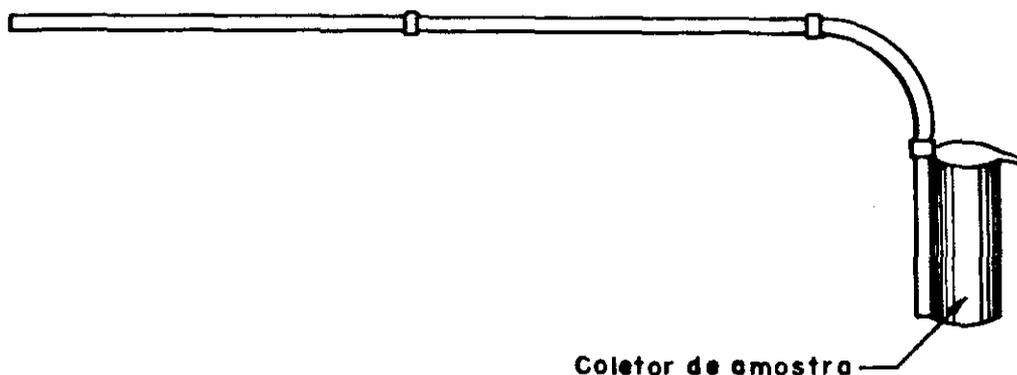


Fig. 3.1.1: Coletor de amostras

As amostras receberam uma identificação numérica, de acordo com os pontos em que foram coletadas, e foram mantidas em laboratório à temperatura ambiente e sem qualquer enriquecimento químico, durante até alguns meses.

### 3.2 Observação por Microscopia Ótica

A observação macroscópica das amostras coletadas revelou um material rico, principalmente em areia e cascalho, às vezes com aspecto gelatinoso e uma coloração variando entre pre

ta, cinza escuro e cinza claro, havendo em quase todas as amostras, uma fina película de óleo. Nas amostras da Lagoa Rodrigo de Freitas, Baía de Guanabara e Lagoa de Itaipú, quando o fundo do material era removido, ocorria desprendimento de odores caracterizando a presença de gás sulfídrico.

Todas as amostras foram analisadas em microscópio ótico, num primeiro momento, no próprio dia da coleta e, num segundo momento, durante algumas semanas, com o objetivo de acompanhar a evolução e crescimento dos micro-organismos magnetotáticos.

A análise em microscopia ótica, realizada nos primeiros dias após a coleta, mostrava, na maioria dos recipientes, vários tipos de micro-organismos magnetotáticos tipo sul, morfologicamente distintos. Após algumas semanas, a população de micro-organismos magnetotáticos aumentava significativamente, na maioria dos recipientes. Entretanto, em alguns recipientes coletados na mesma data e nas mesmas condições, a população de micro-organismos magnetotáticos diminuía gradativamente, até desaparecer.

Foram utilizados dois microscópios óticos: Leitz-Ortholux e o de contraste de fase, Zeiss-Jena, equipado com câmara para micro-fotografia e adaptado para utilização de vídeo. Utilizamos objetivas que proporcionavam um aumento gradativo de 10 a 100X e oculares com aumentos que variavam de 10 a 20X.

A preparação das amostras, para análise em microscopia ótica, tinha início com a concentração magnética dos micro-organismos magnetotáticos. Com o auxílio de pipetas de Pasteur, retirávamos dos recipientes de coleta, amostras numa mistura de

água e sedimentos as quais eram depositadas sobre lâminas de vidro (6,0cm x 2,0cm) próprias para utilização em microscopia ótica. Com a finalidade de obtermos uma rápida concentração de micro-organismos magnetotáticos na extremidade da gota, fizemos uso de pequenos imãs, colocados próximos às lâminas. Este procedimento foi muito utilizado durante o período inicial de nosso trabalho e continua sendo a forma mais comoda para o trabalho de rotina. Entretanto, com esta técnica, não é possível obter um controle de intensidade do campo magnético a que estamos submetendo os micro-organismos magnetotáticos. A concentração feita sobre a lâmina de vidro como descrito, tem o inconveniente de manter as amostras muito tempo expostas ao ar e verificamos que há alteração no comportamento dos micro-organismos magnetotáticos provavelmente devido à oxigenação da amostra. Devido a tais problemas, adotamos esse procedimento somente para o trabalho de observação de rotina e controle das amostras.

Com o objetivo de conseguirmos amostras desprovidas de sedimentos e com alta concentração de organismos magnetotáticos, fizemos uso de pequenos imãs, colocados nas laterais dos recipientes, logo acima da superfície dos sedimentos<sup>[46]</sup>. Com o auxílio de pipetas de Pasteur, as amostras foram coletadas no nível descrito, colocadas em lâminas e levadas ao sistema microscópio/câmara, sendo submetidas às variações de campo magnético. Além dessa técnica, utilizamos um concentrador magnético especial que consiste num vaso de vidro terminando numa micropipeta em sua extremidade<sup>[39]</sup> (fig. 3.2.2).

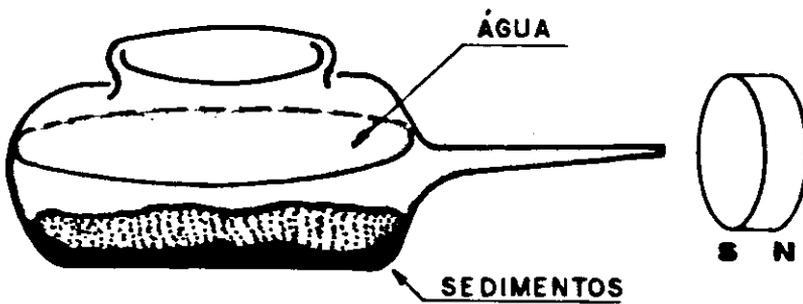


Fig. 3.2.2: Concentrador de Micro-organismos Magnetotáticos

Para calcular o momento magnético pela teoria clássica do paramagnetismo de Langevin e pelo modelo da volta em U, projetamos também um sistema de bobinas, acopladas à base do microscópio, fig. 3.2.3, com o objetivo de produzir, em sua região central, campos magnéticos de intensidade constante e conhecida. Para cada microscópio fizemos vários pares de bobinas, variando o diâmetro e o afastamento, para uma melhor adaptação à base.

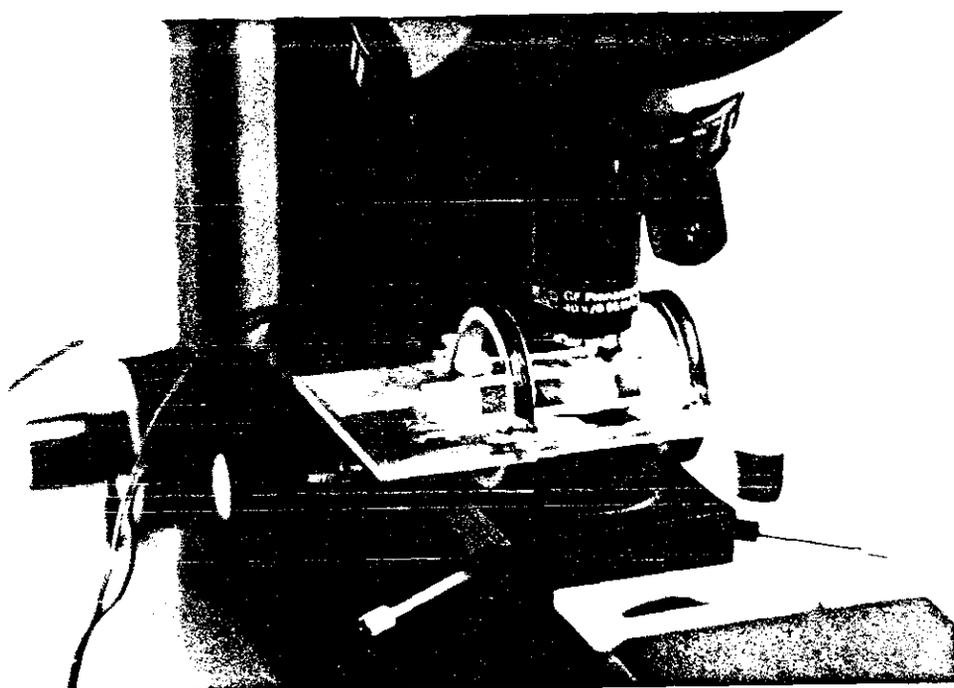


Fig. 3.2.3: Fotografia das bobinas de Helmholtz acopladas ao microscópio ótico

Uma configuração de bobinas frequentemente utilizada em pesquisa dessa natureza, são as bobinas de Helmholtz por produzir um campo magnético relativamente uniforme em uma grande região do espaço. Este sistema se compõe de duas bobinas circulares de mesmo raio, com um eixo comum, separadas por uma distância tal que a derivada segunda do campo se anula num ponto situado no eixo a meia distância entre as bobinas, fig. 3.2.4.

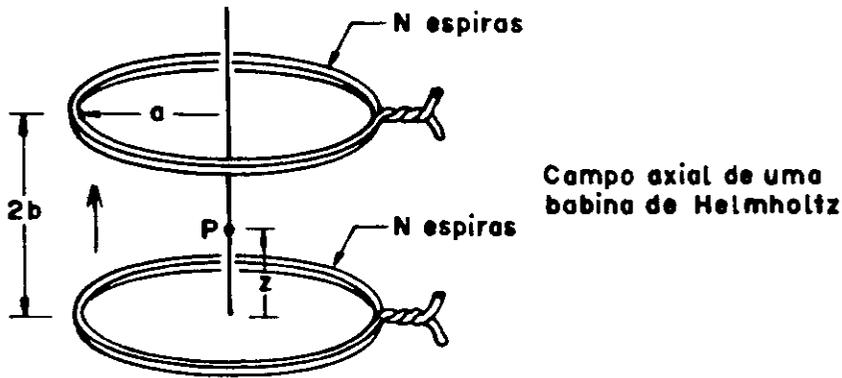


Fig. 3.2.4: Campo axial de uma bobina de Helmholtz

A indução magnética no ponto P, situado no eixo das bobinas, será a soma das induções provenientes de cada uma das bobinas, ou seja:

$$H(Z) = \frac{N\mu_0 I \cdot a^2}{2} \left\{ \frac{1}{(a^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{1}{[a^2 + (2b - z)^2]^{3/2}} \right\} \quad 3.2.1$$

onde N é o número de espiras nas bobinas,  $\mu_0$  é a constante de permeabilidade magnética igual a  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Tm/A e I é a corrente

elétrica através das bobinas.

Fazendo-se na equação 3.2.1  $z=b$ , ou seja, teremos no ponto situado entre as bobinas:

$$H(b) = \frac{N \cdot \mu_o I a^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}} \quad 3.2.2$$

A configuração de bobinas de Helmholtz é tal que a derivada segunda de H com relação a z se anula no ponto médio. Assim, a derivada segunda da equação 3.2.1 será:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 H}{dz^2} = & \frac{3\mu_o N I a^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + a^2)^{5/2}} - \frac{5}{2} \frac{2z^2}{(z^2 + a^2)^{7/2}} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{[(2b-z)^2 + a^2]^{5/2}} - \frac{5}{2} \frac{2(z-2b)^2}{[(2b-z)^2 + a^2]^{7/2}} \right\} \quad 3.2.3 \end{aligned}$$

Esta equação se reduz em  $z=b$ , a

$$\left. \frac{d^2 H}{dz^2} \right|_{z=b} = - \frac{3\mu_o N I a^2}{2} \left\{ \frac{b^2 + a^2 - 5b^2 + b^2 + a^2 - 5b^2}{(b^2 + a^2)^{7/2}} \right\} \quad 3.2.4$$

Para  $2b=a$  esta equação se anula, significando que a separação entre as bobinas deve ser igual ao raio das mesmas. Assim, o campo magnético no ponto médio da bobina de Helmholtz será dada, no sistema gaussiano de unidades, por:

$$H = \frac{32\pi}{5^{3/2}} \cdot \frac{NI}{10a} \quad 3.2.5$$

Nem sempre, entretanto, a adaptação de bobinas de Helmholtz no microscópio é possível. As dimensões disponíveis na estativa do microscópio, junto ao diâmetro da objetiva e da difusora, muitas vezes obriga a se utilizar pares de bobinas que não satisfazem a condição  $2b=a$ .

Na região central, entretanto, o campo é razoavelmente homogêneo mesmo quando a condição de bobina de Helmholtz não é satisfeita. Assim, em nossas medidas experimentais utilizamos pares de bobinas de raio igual a 1.5cm separadas de 2,1cm com 160 voltas e fio de cobre número 33. Este sistema possibilitou, após alguns minutos de aplicação, um aumento gradativo de micro-organismos magnetotáticos na extremidade da gota, os quais foram expostos a campos magnéticos cuja intensidade do campo em Gauss, dada pela equação 3.2.2 é

$$H(G)=26,3[I(A)]$$

3.2.6

onde I, em Ampere, é a corrente que passa através das bobinas.

Assim, os organismos magnetotáticos com os quais trabalhamos, foram submetidos a exposição de campos magnéticos que variam de 0,4 a 12,0 Gauss.

Alinhamos o eixo das bobinas na direção sul-norte, de forma que a intensidade do campo horizontal, que atua sobre os micro-organismos, é a soma do campo gerado pelas bobinas mais a componente horizontal do campo geomagnético. O campo total é a soma vetorial do campo produzido pelas bobinas, do campo geométrico e de campos induzidos no microscópio, e os micro-organismos nadam sempre segundo o sentido desse campo.

Ao se inverter o campo da bobina, os micro-organismos se reorientam e descrevem uma trajetória em U. O campo da Terra produz uma componente constante ao campo total. O campo induzido pode ser minimizado evitando-se colocar nas proximidades do microscópio, parafusos, porcas, imãs, etc.

As amostras de micro-organismos magnetotáticos coletadas em todos os locais escolhidos, foram expostas a um campo magnético de alta intensidade - cerca de 1000Gauss -, produzido por um desmagnetizador de fita cassete comercial. Após a exposição, estas amostras que, originalmente, apresentavam micro-organismos tipo-sul apresentaram igual quantidade de micro-organismos tipo-sul e tipo-norte. Esta experiência mostra a impossibilidade de desmagnetizar as células magnetotáticas, comprovando, assim, que os cristais de magnetita estão compreendidos na região de mono-domínios magnéticos<sup>[31]</sup>.

Os micro-organismos analisados foram fixados numa solução de ácido ósmico a 1% ou glutaraldeído a 2,5%. Observamos que os micro-organismos magnetotáticos deixam de migrar, continuando, entretanto, alinhados ao campo magnético aplicado, o que mostra que a magnetotaxia é independente de qualquer função vital do micro-organismo.

### 3.3- Técnicas Para Obtenção de Medidas

A determinação do momento magnético de micro-organismos magnetotáticos constitui um problema complexo, uma vez que o número de micro-organismos, por amostra, é insuficiente para

se obter medidas de momento magnético por técnicas físicas tais como: birrefringência<sup>[47]</sup>, luz espalhada<sup>[48]</sup>, espectroscopia de Mössbauer<sup>[4]</sup>. Essas técnicas, para serem utilizadas, necessitam de uma quantidade razoável de micro-organismos magnetotáticos em um meio de cultura definido quimicamente. Até o momento, não nos foi possível obter um meio de cultura destes micro-organismos magnetotáticos.

Estimamos o momento magnético através de medidas de velocidade em função do campo magnético, utilizando a teoria clássica do paramagnetismo de Langevin discutida no capítulo I, do modelo da volta em U apresentado no capítulo II, e da análise de micrografias obtidas por microscopia eletrônica de transmissão. Utilizamos, num primeiro momento, a técnica de filmagem (Super-8) e, num segundo, a técnica de vídeo, o que possibilitou estudar a dinâmica envolvida nos micro-organismos magnetotáticos. Para a filmagem, tanto em Super-8 quanto em vídeo, foi necessário o acoplamento das câmaras ao sistema ocular do microscópio ótico, fig. 3.3.5.

A técnica de filmagem foi utilizada quando iniciamos, de forma sistemática, as pesquisas em micro-organismos magnetotáticos, especificamente com as amostras da Lagoa Rodrigo de Freitas e Baía de Guanabara<sup>[7,8]</sup>. Na tabela 3.3.1, apresentamos os dados obtidos através da técnica de filmagem em Super-8. Usamos filmes de 400 ASA e velocidade de filmagem de 18 a 24 quadros por segundo. Este processo, com o tempo de uso, foi se tornando inadequado, uma vez que os filmes Super-8 ficavam bastante danificados em função de sua utilização. Com esta técnica não foi possível obter informações referentes à volta em U de micro-

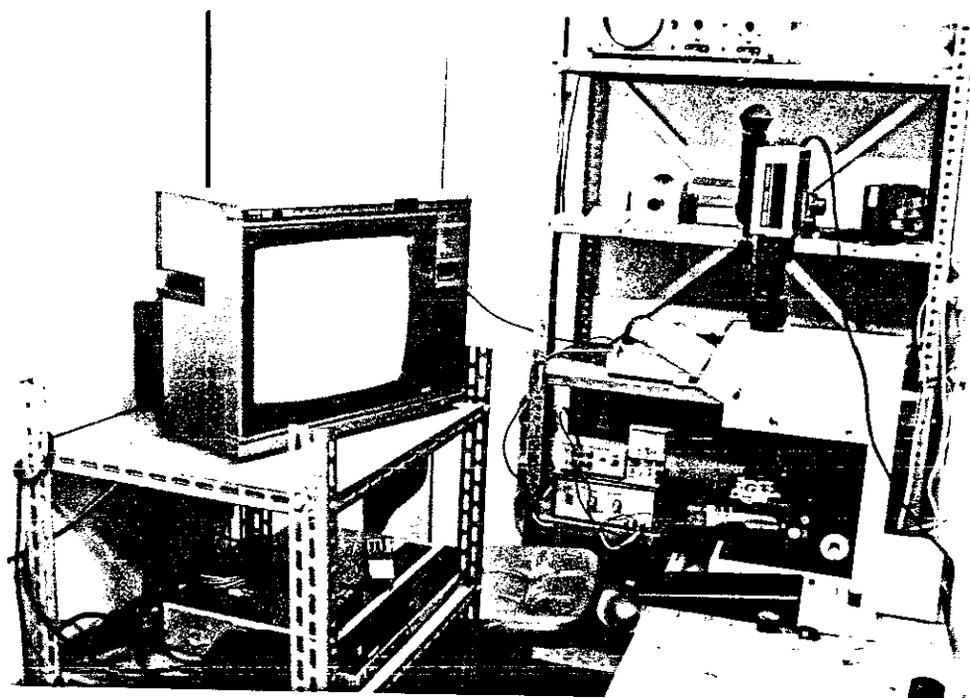


Fig. 3.3.5: Fotografia de Câmara de Vídeo acoplada ao Sistema ocular do Microscópio Ótico

-organismos de raio inferior a  $1,0\mu\text{m}$ , devido a pouca definição obtida pelo filme.

Referência	Localidade	H(Gauss)	V( $\mu\text{m/s}$ )	a( $\mu\text{m}$ )	L( $\mu\text{m}$ )	$\zeta_{\text{exp}}$ (s)	$m \cdot 10^{-14}$ (emu)
7,8	Lagoa Rodrigo de Freitas	5	50	3,0	45	2,0	470,0

H - Campo magnético utilizado      L - Diâmetro da volta em U  
V - Velocidade média de migração       $\zeta_{\text{exp}}$  - Tempo de reversão  
a - raio do micro-organismo      m - Momento magnético

Tabela 3.3.1: Características de Micro-organismos Magnetotáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas obtidas com a técnica de filmagem em Super-8.

O uso de vídeo possibilitou uma análise mais detalhada do comportamento dos micro-organismos magnetotáticos, em função da variação de intensidade do campo magnético, na medida em que permite o uso de recursos como congelamento de imagem, reprodução em câmara lenta, avanço quadro a quadro, controle remoto, etc. Com a sua utilização, foi possível rever, repetidas vezes, o fenômeno da magnetotaxia, ocorrido num determinado instante na gota em observação, o que não ocorria com o uso do microscópio, onde não era possível observar o instante passado. Este sistema permitiu, ainda, uma análise mais detalhada da velocidade de migração, do tempo gasto para realização da volta em U, do diâmetro da volta em U, etc, em função das várias intensidades de campo magnético.

A técnica de vídeo foi aplicada em amostras de Itaipũ e Itaipuaçũ, que apresentavam maiores populações de micro-organismos magnetotáticos.

Com o objetivo de aumentar a precisão das medidas de

velocidade de migração, tempo e diâmetro da volta em U, utilizamos uma ilha de edição em vídeo, com equipamento SANYO BVU-200, reduzindo a velocidade de filmagem em SP (30 quadros/seg) para 30 quadros/5,4 seg. Este recurso possibilitou determinar a velocidade média de migração dos micro-organismos magnetotáticos, contidos nas amostras estudadas, em função do campo magnético aplicado.

Os dados referentes ao diâmetro (L-exp) e tempo ( $\tau$ -exp) para a realização da volta em U, quando da inversão do campo magnético externo, foram obtidos pela técnica de avanço quadro a quadro, por meio do uso de uma ilha de reprodução em vídeo, equipada com um SANYO BVU-800.

Através deste equipamento, a velocidade da fita de vídeo cassete foi reduzida ao seu limite de 30 quadros/5,4 seg para 1 quadro/0,033 seg, o que possibilitou a diagramação ponto a ponto à trajetória descrita pelos micro-organismos magnetotáticos, sendo possível, assim, obter com um maior grau de precisão, as medidas do diâmetro (L-exp) e do tempo ( $\tau$ -exp) relativos a volta em U.

Com esta técnica aplicada as demais amostras estudadas, obtivemos as informações relativas à dinâmica dos micro-organismos magnetotáticos estudados. A análise destes dados junto com a aplicação de modelos anteriormente descritos permite a estimativa de seus momentos magnéticos.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute resultados da análise de movimento e propriedades magnéticas dos micro-organismos magnetotáticos da região de Itaipú e Itaipuaçu.

No processo de obtenção destes resultados, incidiram alguns fatores limitadores do trabalho, que julgamos oportuno ressaltar. O primeiro deles, refere-se à quantidade de micro-organismos estudada, considerando os métodos e técnicas disponíveis. A observação do organismo em microscopia ótica, chegou a mostrar mais de  $10^5$  células numa gota de sedimentos. Números típicos, entretanto, são da ordem de  $10^3$  a  $10^4$  células. Esta elevada população foi positiva, na medida em que facilita a preparação de grades para microscopia eletrônica de transmissão e lâminas para a de varredura. Ocasinou, entretanto, fortes dificuldades no estudo da dinâmica destes micro-organismos, uma vez que se tornou difícil distinguir, durante o tempo de observação (cerca de alguns décimos de segundos) uma célula da outra.

O uso de fotografias em campo escuro não eliminou essa dificuldade na medida em que as fotos apresentavam regiões muito claras, devido à reflexão das células aglomeradas numa extremidade e indeterminação quanto às trajetórias de várias células.

Outro ponto diz respeito à uma posição da estatística

a ser aplicada. A escolha pelo trabalho com uma célula de cada vez e, assim, fazemos as medidas de tempo da volta em U, da velocidade média de migração e do diâmetro da volta em função do campo magnético. A primeira medida não depende da velocidade. A equação para  $\zeta$  mostra que esta grandeza depende inversamente do campo aplicado e tem uma dependência do tipo  $m^{-1} \ln(Am)$  no momento magnético. A velocidade de uma célula altera-se significativamente com o tempo de observação, provavelmente devido a efeitos de oxigenação. Quanto maior o tempo de observação, menor a velocidade de migração, independente do campo aplicado ou de outras grandezas. Este fato introduz um problema de difícil resolução para se obter as medidas de velocidade e do diâmetro da volta em U.

Outra escolha possível - a adotada no presente trabalho - é o de tentar trabalhar com várias medidas de células diferentes. Com esta abordagem evitamos, de certa forma, o problema do envelhecimento das células estudadas e introduzimos o problema de tratar indivíduos diferentes sem entrar em suas peculiaridades. Esta abordagem pode ser feita com os micro-organismos magnetotáticos, porque o comportamento destes organismos apresenta-se com uma regularidade espantosa para o caso de sistemas vivos. Quando as células estão concentradas numa das extremidades da gota e o campo é alterado de forma a produzir a migração para o centro da gota, observamos um deslocamento bastante homogêneo da nuvem de células.

Assim, os valores para a velocidade de migração em função do campo magnético são médias tomadas em medidas que não correspondem a um mesmo indivíduo. Isto justifica o erro destas

medidas bem como mostra que a velocidade, por exemplo, é razoavelmente homogênea para micro-organismos magnetotáticos de uma mesma amostra.

#### 4.1           Resumo dos Resultados dos Micro-organismos Magnetotáticos de Itaipú e Itaipuaçu

Foram realizadas cerca de 2.600 medidas em amostras coletadas em quatro locais diferentes (Itaipú e Itaipuaçu), abrangendo um total de cerca de 200 organismos analisados.

Na tabela 4.1.1, apresentamos algumas características e dados importantes relacionados à dinâmica dos micro-organismos magnetotáticos, bem como incluímos valores teóricos obtidos a partir destes dados experimentais.

Nas colunas 1, 2, 3 e 4, registramos, respectivamente, informações gerais sobre local de coleta, data de coleta e de filmagem das amostras, tipo de água coletada e características dos organismos analisados.

Na coluna 5, incluímos dados sobre as várias intensidades de campo magnético aplicadas a cada uma das amostras, para fins de estudos de velocidades de migração dos micro-organismos magnetotáticos, do diâmetro da volta em  $U(L_{exp})$  e do tempo de reversão ( $\zeta_{exp}$ ) em função do campo aplicado. Estes dados estão apresentados, respectivamente, nas colunas 6, 7 e 8, tal que cada um deles corresponde a média aritmética de dez medidas para cada organismo observado.

Não foi possível obter medidas do diâmetro ( $L_{exp}$ ) e

tempo de reversão ( $\zeta_{exp}$ ) em campos magnéticos de baixa intensidade uma vez que, nestes campos, os micro-organismos não realizavam a volta em U no mesmo plano da filmagem. Na coluna 9, estão os dados para o tempo de reversão ( $\zeta_u$ ) em função dos campos magnéticos para os quais o modelo da volta em U é satisfeito, calculados através da equação 2.2.2.37.

Nas colunas 10 e 11, apresentamos a velocidade média de migração ( $v_0$ ) e momento magnético ( $m_L$ ) calculados a partir da média de velocidades de migração, ajustados à curva de Langevin, equação 2.2.1.26. Para obtermos estes valores, foi necessário a justar, pelo método dos mínimos quadrados, a equação 1.1.3.13.

Na coluna 12, apresentamos dados relativos ao diâmetro médio dos micro-organismos magnetotáticos: o calculado por microscopia eletrônica de varredura para as amostras de Itaipú e microscopia eletrônica de transmissão para as amostras de Itaipu açú; o estimado a partir da equação 2.2.2.37 e da 2.2.2.40. Para este cálculo, utilizamos os valores obtidos experimentalmente para o diâmetro ( $L_{exp}$ ) e tempo de reversão ( $\zeta_{exp}$ ), colunas 7 e 8, bem como os dados da velocidade média de deslocamento ( $v_t$ ) e do momento magnético ( $m_L$ ), colunas 10 e 11, respectivamente.

Nas colunas 13 e 14, apresentamos os valores estimados para o momento magnético através do diâmetro da volta em U ( $m_u$ ) e por microscopia eletrônica de transmissão ( $m_{MET}$ ). Não foi possível estimar o momento magnético por microscopia eletrônica de transmissão para as amostras de Itaipú.

A razão entre as energias magnética e térmica em campo geomagnético local está apresentada na coluna 15.

#### 4.1.1 Caracterização dos Micro-organismos Magnetotáticos

Nesta seção apresentamos uma descrição das características dos micro-organismos magnetotáticos encontrados em águas da região de Itaipú e Itaipuaçu. Nossos resultados dizem respeito a amostras de águas contendo sedimentos de quatro pontos dessa região, águas salobras da lagoa de Itaipú e águas salgadas de Itaipuaçu.

A observação através de microscopia eletrônica, quando possível, de amostras destas águas, constatou que os micro-organismos magnetotáticos observados são bactérias. As bactérias magnetotáticas do tipo coccus, predominam nas amostras analisadas logo após a coleta do material, constituindo aproximadamente 70% da população de organismos magnetotáticos. A observação destas amostras após dois meses de coleta, mostrou que houve um decréscimo de população, chegando em alguns frascos a desaparecerem, (fig. 4.1.1.1).

As bactérias coccus analisadas em microscopia eletrônica de transmissão mostram a existência, em seu citoplasma, de cadeias de partículas compostas por regiões de alta densidade com formas geométricas bem definidas. As fotografias mostram que estas regiões apresentam a forma de paralelepípedo reto, cuja razão dimensão menor/dimensão maior é de aproximadamente 0,8. A variação estatística dos volumes destas regiões apresenta uma distribuição estreita centrada em  $2,47.10^{-16} \text{cm}^3$ . O número de regiões por célula é bastante homogêneo em todas as amostras analisadas e situa-se na faixa de 8 a 14, segundo as evidências fotográficas.

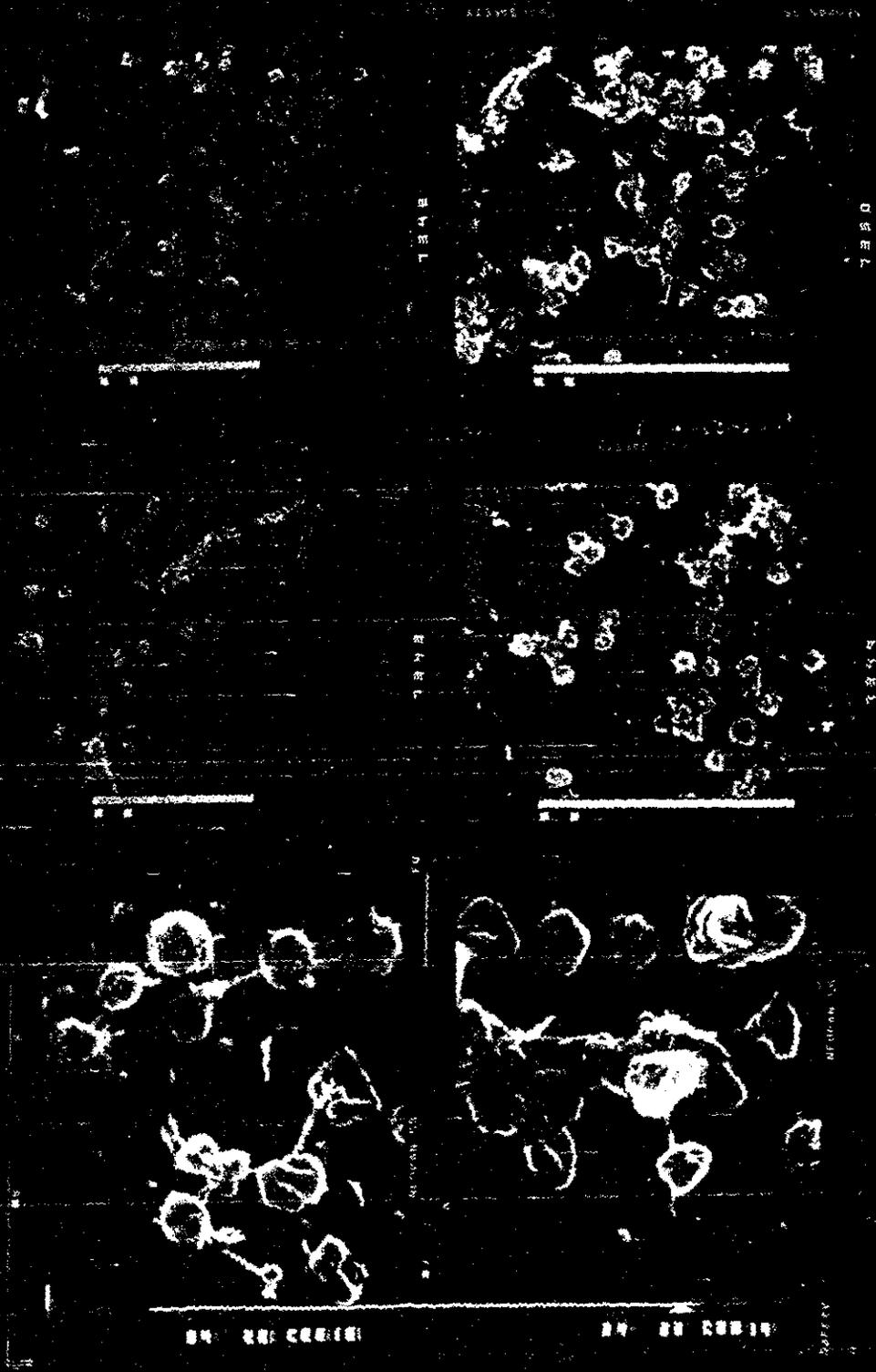


Fig. 4.1.1.1: Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura de Micro-organismos Magnetotáticos encontrados na Lagoa de Itaipu  
 Barra = 10  $\mu$ m

Na maior parte das amostras analisadas por microscopia eletrônica de transmissão obtivemos um grande número de bactérias cocus com cadeias não lineares (em X, L, =, ...), figura 4.1.1.2.

A análise por raio-X das partículas dessas cadeias revelou um material com alto teor em ferro, o que nos levou a crer que se trate de um óxido magnético e, devido a analogia com trabalhos anteriores (2, 4, 8, 9, 10), podemos afirmar que estas partículas devem conter uma alta porcentagem de magnetita formando estruturas que tornam possível a orientação magnética observada.

#### 4.1.2 Comportamento das Bactérias Magnetotáticas

A existência de magnetita no interior dessas bactérias faz com que haja um campo magnético no seu redor. Quando as bactérias estão na extremidade da gota há uma interação do tipo bactéria-bactéria, que diminui à medida que esses organismos vão se afastando uns dos outros. Tal interação foi verificada quando as células foram fixadas em ácido ósmico a 1%. Em amostras onde a concentração de micro-organismos magnetotáticos é alta, esta interação é vizível mesmo em organismos vivos.

O campo magnético próximo à célula pode ser calculado, uma vez que o campo magnético de um dipolo é dado por<sup>[49]</sup>:

$$\vec{B}(r) = \frac{3\hat{n}(\hat{n} \cdot \vec{m}) - \vec{m}}{|r|^3} + \frac{8\pi}{3} \vec{m} \delta(r) \quad 4.1.2.1$$

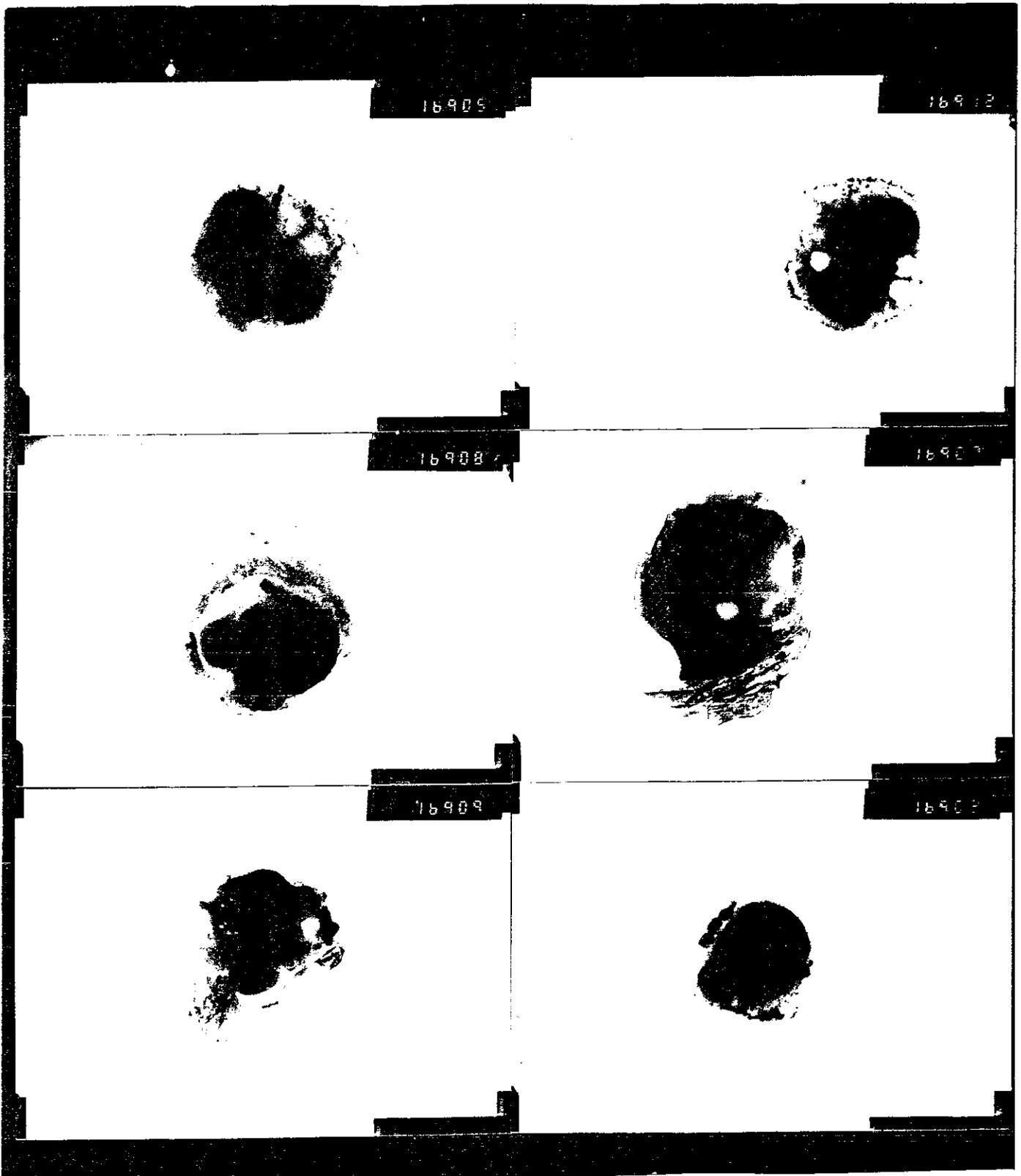


Figura 4.1.1.2: Microscópio Eletrônico de Transmissão de bactérias magnetotáticas tipo cocus de sedimentos da região de Itaipuaçu com cadeias linear e não linear, com 22.000 vezes de aumento.

onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário na direção  $\vec{r}$ , sendo a componente transversal dada por

$$\vec{B}(r) = - \frac{\vec{m}}{r^3} \quad 4.1.2.2$$

e a componente longitudinal por

$$\vec{B}(r) = \frac{2\vec{m}}{r^3} \quad 4.1.2.3$$

Assim, para bactérias com dimensões das de Itaipú - 1, este campo é sensivelmente superior ao campo geomagnético. Isto mostra que em micro-organismos magnetotáticos, suficientemente próximos, esta interação pode ser mais importante que a interação com o campo geomagnético. A figura 4.1.2.3 apresenta a linha de campo que é igual a 0,71G de uma bactéria cujo momento de dipolo é  $4,9 \times 10^{-14}$  emu e o raio é  $0,41\mu\text{m}$ .

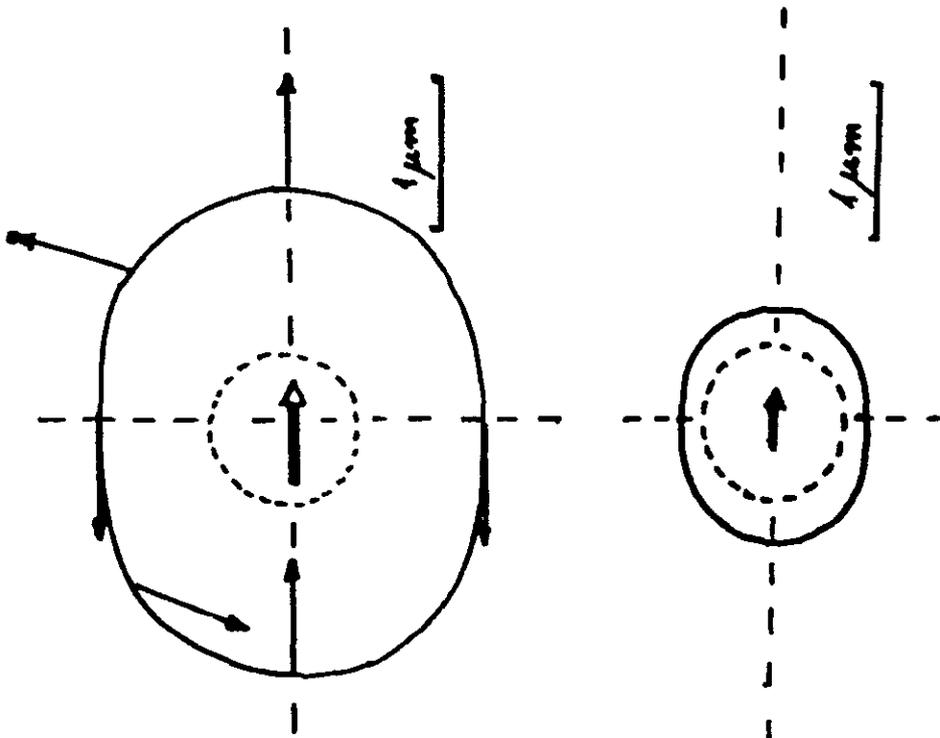


Fig. 4.1.2.3: Esquemática das linhas de campo de uma bactéria magnetotática.

Observamos que, efeitos de interação bactéria x bactéria são mais importantes do que a interação com o campo geomagnético até distâncias de cerca de  $0,7 \times$  raio (lembramos, entretanto, que interação de membrana devido a cargas elétricas localizadas, podem ser mais relevantes que a interação magnética bactéria x bactéria). Observamos, em diversas amostras, o alinhamento de células vivas. Este efeito pode ser uma evidência da interação magnética embora não possamos descartar a possibilidade de interação química ou elétrica de membrana, comum em diversos micro-organismos. A microscopia eletrônica de transmissão de amostras com concentração muito elevada pode mostrar bactérias, que se agrupam formando anéis, semelhantes às aquelas observadas quando se fotografa, em microscopia eletrônica, cristais isolados. Isto constitui outra evidência, embora fraca, de interação magnética de células.

Em campos magnéticos da ordem do campo magnético terrestre, não se percebe, através de observação de movimento, praticamente orientação magnética. Nestas condições, o torque devido à ação flagelar ( $\zeta_{\text{flag}}$ ) é muito menor que o torque magnético ( $\zeta_{\text{mag}}$ ). A trajetória dessas bactérias, parece resultar predominantemente da ação dos flagelos, que estão associados à energias internas do ser vivo, e de perturbações aleatórias do meio, inclusive a desorientação térmica. Para campos magnéticos da ordem de dez vezes o campo geomagnético, a trajetória dessas bactérias é bastante complexa, assemelhando-se, de certa forma, a de uma hélice cilíndrica com eixo na direção do campo magnético aplicado (fig. 4.1.2.4).

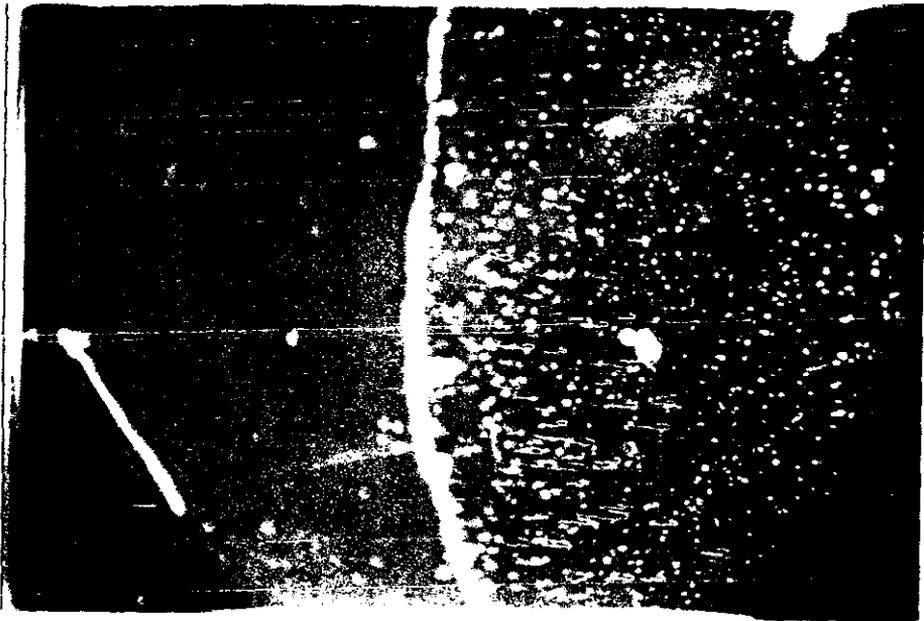
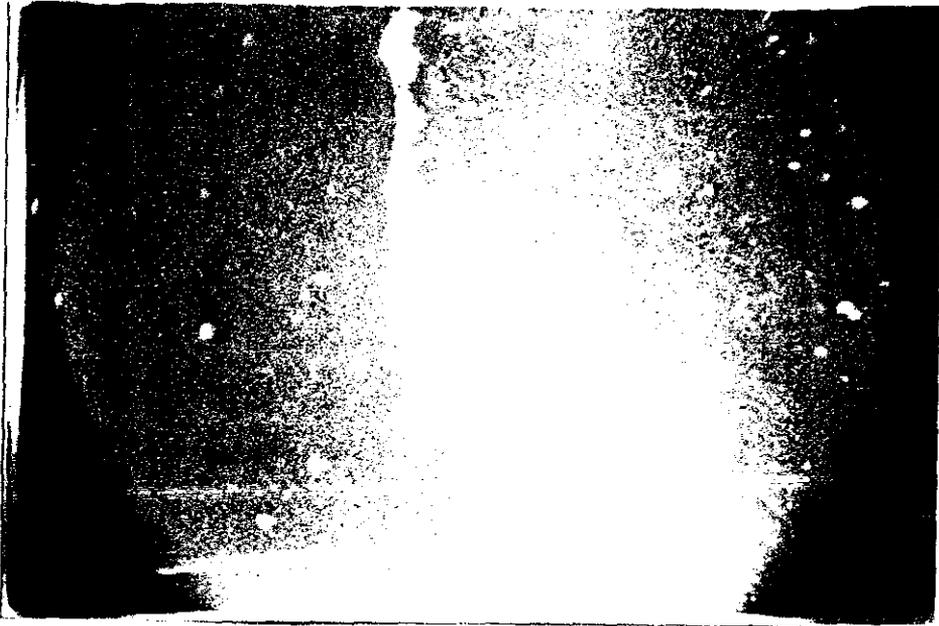


Figura 4.1.2.4: Trajetórias de micro-organismos magnetotáticos da região estudada, obtidas através de fotografias em microscopia ótica de campo escuro com tempo de exposição de 1seg.

#### 4.1.3 Medidas de Velocidade de Migração

O mecanismo de locomoção de bactérias em geral é conseguido por meio de certas estruturas em forma de filamentos ligados à célula, os flagelos. Dependendo da espécie de bactéria, varia o número de flagelos e sua localização; em um único lado da célula ou distribuídos sobre toda a superfície.

O movimento flagelar consome uma grande quantidade de energia do metabolismo da célula, ocasionando uma redução de sua mobilidade após um percurso longo. Além disso interferem também na mobilidade das células, os efeitos de oxigenação. Para evitá-los realizamos várias medidas de células vivas usando lamínulas. Este procedimento, entretanto, dificultou enormemente a observação porque os micro-organismos são muito rápidos e com as lamínulas eles não se concentram na borda da gota (a lamínula espalha a gota de forma que a interface água-ar fica fora da região de contato lamínula-lâmina).

Documentando, através de técnica de vídeo, o movimento das bactérias magnetotáticas, obtivemos as medidas de velocidade em função do campo magnético aplicado.

Observamos que o comportamento destes organismos, no que tange à velocidade, possui uma regularidade espantosa para o caso de sistemas vivos. Quando as células estão concentradas numa das extremidades da gota e o campo magnético é alterado, de forma a produzir a migração para o centro da amostra, nota-se um deslocamento bastante homogêneo de uma nuvem de bactérias.

Verificamos, ainda, uma diferenciação entre as medidas de velocidade de migração das bactérias magnetotáticas, das

amostras de uma das regiões estudadas em Itaipú - Itaipú 1, com relação às demais. As bactérias de Itaipú 1 apresentam uma grande mobilidade com relação às de Ipaipuaçu (coluna 10 da tabela 4.1.1). A observação ótica e a análise estatística das medidas de velocidade nestas amostras parece indicar a existência de três tipos de bactérias magnetotáticas, que foram denominadas 1-A, 1-B e 1-C (figura 4.1.3.5).

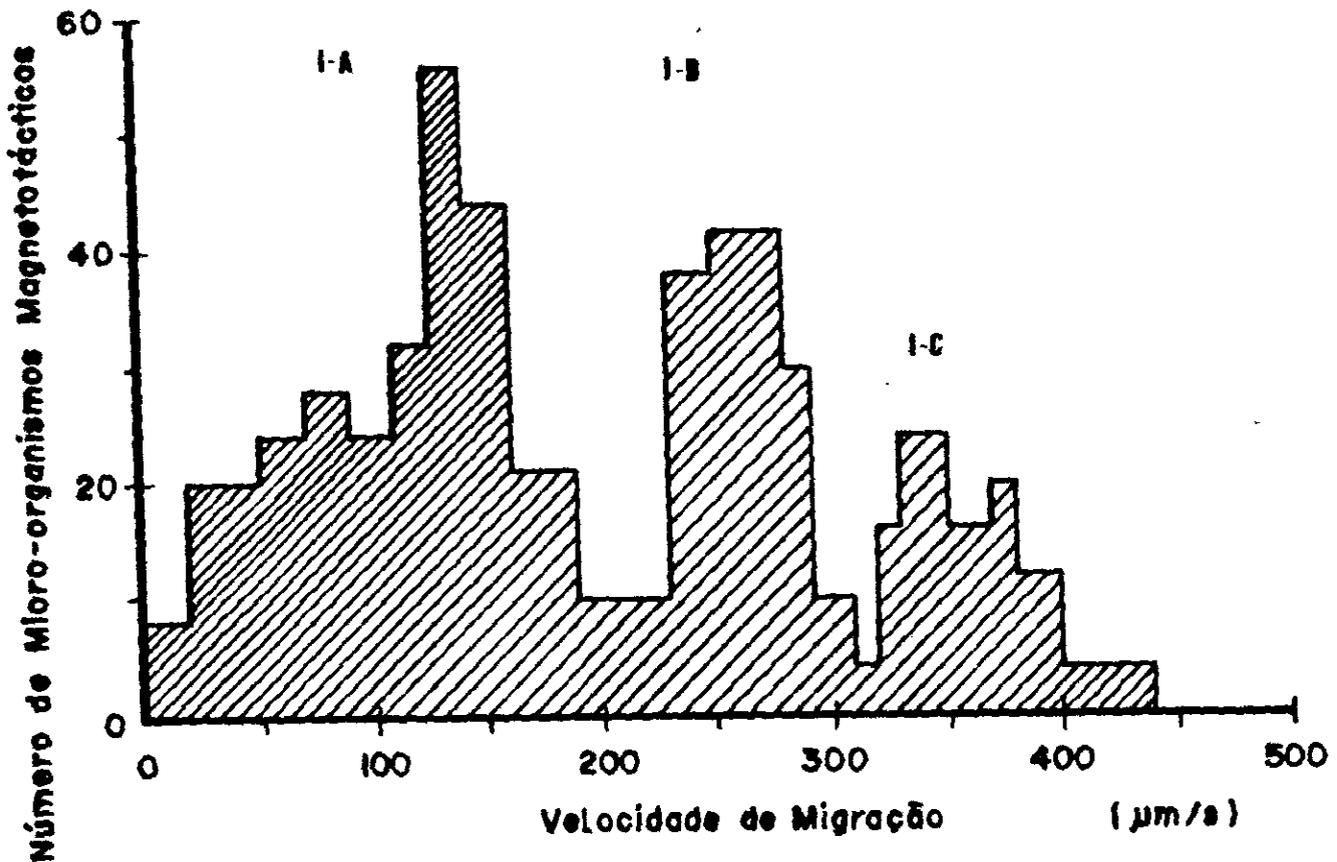


Fig. 4.1.3.5: Histograma de velocidade de migração em campo magnético de 7,9G de bactérias magnetotáticas da amostra de Itaipú-1, obtido pela técnica de vídeo em Slow-motion.

As bactérias denominadas 1-A correspondem, a aproximadamente, 20% da população de micro-organismos magnetotáticos. Estas bactérias deslocam-se com velocidade média de migração de  $160\mu\text{m/s}$ . As bactérias denominadas 1-B representam 30% dessa população, deslocando-se com velocidade de  $290\mu\text{m/s}$ . Já as bactérias que denominamos de 1-C representam, aproximadamente, 50% da população magnetotática, deslocando-se com velocidades de  $350\mu\text{m/s}$ . Há, entretanto, um erro sistemático nestas medidas, pelo fato de que é muito mais nítida a imagem de bactérias lentas e, desta forma, podemos estar super-estimando as medidas de Itaipú-1.

As bactérias das amostras de Itaipú, das regiões 2 e 3, apresentam velocidades de migração inferiores às amostras 1 de Itaipú - cerca de  $120\mu\text{m/s}$  e  $140\mu\text{m/s}$ , respectivamente. A análise estatística dessas amostras mostrou células mais lentas, que possuem um movimento descontínuo. Este movimento pode ser comparado a uma trajetória de dente de serra, o que poderia ser a superposição de duas trajetórias, uma devido à ação flagelar e outra devido à desorientação térmica.

As bactérias de Itaipuaçu mantêm, quanto à velocidade de migração, comportamento similar às das amostras 2 e 3 de Itaipú. Estas bactérias apresentam velocidades de  $130\mu\text{m/s}$ .

#### 4.1.4 Medidas de Movimento Através da Volta em U

A medida de movimento, através da volta em U, ficou restrita àquelas bactérias que conseguimos medir, através da t<sub>e</sub>c

nica de vídeo, simultaneamente o diâmetro ( $L_{exp}$ ) e o tempo ( $t_{exp}$ ) para a realização da volta em U. A maior dificuldade referiu-se à medida de diâmetro, uma vez que as bactérias, quando respondiam à inversão do campo magnético aplicado, deslocavam-se em planos diferentes daqueles em que realizamos as filmagens. Estas medidas foram obtidas em campos magnéticos cuja intensidade é de cerca de dez vezes superior ao campo geomagnético local.

Um problema crítico no estudo de micro-organismos é a determinação do seu tamanho (diâmetro, quando esférico ou outras dimensões características). As observações em microscopia eletrônica não podem ser consideradas como boas indicações. Os processos de fixação da célula são muito violentos. As células secam, murcham e perdem sua forma ou estouram, devido à variação de pressão, p.H, salinidade, etc. Assim, apesar da microscopia eletrônica de transmissão ou de varredura apresentarem boas imagens, as dimensões podem estar bastante deturpadas pelo processo de preservação da célula. Uma outra forma de estimarmos as dimensões é através do estudo de movimento. Podemos, conhecendo o valor do diâmetro da volta em U ( $L$ ) em função do campo aplicado, determinar o raio ( $a$ ), desde que conheçamos o momento magnético. No presente trabalho estimamos o momento magnético através do estudo da velocidade em função do campo fazendo-se o ajuste com a curva teórica. Com este valor de  $m$  podemos, ajustando à curva  $L \times H$ , obter o raio. E, por último, tendo o raio, o momento magnético, etc, podemos calcular o tempo de reversão teórico e comparar com as medidas experimentais. Desta forma a medida de tempo serve para comparar os dados expe

rimentais com aqueles obtidos através do ajuste de curvas teóricas.

Nas colunas 8, 9, 11 e 12 da tabela 4.1.1, apresentamos os valores de  $\zeta_{exp}$ ,  $\zeta_u$ ,  $m_L$  e  $d$ , respectivamente. utilizamos os cálculos do diâmetro ( $d$ ) dos micro-organismos magnetotáticos, bem como o do momento magnético ( $m_L$ ) para calcularmos o tempo de reversão ( $\zeta_u$ ).

Observamos que  $\zeta_{exp}$  e  $\zeta_u$  são da mesma ordem, mostrando que as medidas de velocidade da frente de bactérias, em função do campo magnético aplicado, ajustado à curva de Langevin, constitui um bom método de medida do momento magnético de micro-organismos magnetotáticos.

Apresentamos, nas figuras 4.1.4.6(a,b,c,d), a curva do tempo de reversão em função do campo magnético, dada pela equação 2.2.2.37, para os micro-organismos das amostras de Itaipú e Itaipuaçu.

## 4.2 Momento Magnético

O momento magnético dos micro-organismos com os quais trabalhamos foi calculado a partir de três métodos diferentes que passamos a descrever e analisar nesta seção.

### 4.2.1 Estimativa de Momento Magnético através da Velocidade de Migração

As bactérias magnetotáticas se comportam como dipolos biomineralizados no campo magnético aplicado. Podemos, por-

tanto, tratar esses organismos como um sistema constituído por N dipolos idênticos que não interagem entre si. A competição entre a energia magnética (mH) e a térmica (kT) determinará o grau de orientação desses organismos no campo externo sendo o a alinhamento médio dessas bactérias, dado pela equação 2.2.1.26,

$$\langle \cos \theta_i \rangle = \frac{\langle v_{||} \rangle}{v_0} = L(mH/kT) \quad 2.2.1.26$$

onde a função de Langevin é dada pela equação 1.1.3.13,

$$L(mH/kT) = \coth(mH/kT) - (kT/mH) \quad 1.1.3.13$$

Esta é uma equação não-linear. Para obtermos os valores dados pelas colunas 10 e 11, da tabela 4.1.1, foi necessário ajustar esta equação pelo método dos mínimos quadrados aos dados experimentais. Nas intensidades de campo magnético a que foram submetidos os micro-organismos (coluna 5), o termo  $\coth(mH/kT) \rightarrow 1$ . Logo podemos aproximar a equação 1.1.3.13, a uma função inversa ou seja:

$$L(mH/kT) \approx 1 - \frac{kT}{mH} \quad 4.2.1.4$$

De forma que a equação 2.2.1.26 poderá ser reescrita como

$$\langle v_{||} \rangle = v_0 \cdot L(mH/kT) \approx v_0 (1 - A/H) \quad 4.2.1.5$$

A é uma constante dada pela relação  $kT/m$ , determinada pelo ajuste de dados à curva de Langevin através do método dos mínimos

quadrados.

Na figura 4.2.1.7, apresentamos os gráficos da velocidade de migração ( $v$ ) em função da intensidade de campo magnético aplicado ( $H$ ). Para cada uma das amostras analisadas, apresentamos a função correspondente à equação 4.2.1.5, onde o primeiro número do lado direito corresponde à velocidade média de migração ( $v_0$ ) e o segundo número corresponde ao valor da constante  $A$ , do qual podemos obter diretamente o valor do momento magnético médio da amostra. Incluímos também o coeficiente de correlação e o desvio padrão correspondente (Apêndice B).

É interessante observar que, nas amostras de Itaipú 1, apesar das medidas estatísticas de velocidade de migração ( $v$ ) serem diferenciadas em três grupos, os momentos magnéticos que foram estimados são da mesma ordem. Este resultado pode ser observado na tabela 4.2.1.2. Isto mostra que a distribuição de velocidade de migração ( $v$ ) não constitui um critério suficiente para diferenciação de micro-organismos magnetotáticos.

ITAIPÚ 1	V ( m/s)	$m_L \cdot 10^{-14}$ (emu)	$m_L H_T / kT$
ITAIPÚ 1A	153,65	4,09	0,2
ITAIPÚ 1B	285,02	3,44	0,2
ITAIPÚ 1C	347,28	4,30	0,3

Tabela 4.2.1.2: Dados referentes às amostras de Itaipú 1-A, 1-B e 1-C, onde  $v_0$  - velocidade média de migração;  $m_L$  - momento magnético calculado através do ajuste à curva de Langevin e  $m_L H_T / kT$ , a razão entre as energias magnética e térmica.

A partir das estimativas realizadas de momento magné

tico, levantamos a hipótese que só pederá ser confirmada quando conseguirmos microscopia eletrônica de transmissão de boa qualidade, que se trata de uma mesma espécie de bactéria magnetotática em três diferentes estágios de desenvolvimento.

Vale destacar que, o momento magnético das amostras de Itaipú 1 e Itaipú 2 são os mesmos. Por outro lado, o momento magnético das amostras de Itaipú 3 e Ipaipuaçú é, respectivamente, três e doze vezes superior ao momento magnético estimado para as amostras de itaipú 1, tornando a orientação dessas bactérias em campos magnéticos de baixa intensidade mais eficiente. Isto pode ser observado pela razão entre as energias magnética e térmica (coluna 15, da tabela 4.1.1).

#### 4.2.2 Estimativa de Momento Magnético Realizada Através do Modelo da Volta em U

Aplicamos o modelo desenvolvido por C. Bean, conforme o descrito no capítulo 2 (seção 2.2.2), que nos permite calcular o momento magnético do organismo, a partir da sua resposta à inversão do campo magnético.

Quando o campo magnético é subitamente invertido, os micro-organismos magnetotáticos são submetidos a um torque e o sentido de movimento se inverte segundo uma trajetória em U. O diâmetro (L) da volta em U é proporcional à velocidade média de migração ( $v_0$ ) e inversamente proporcional ao momento magnético do organismo e dado pela equação 2.2.2.40,

$$L = \frac{8\pi^2\eta a^3 v_0}{mH}$$

2.2.2.40

podemos escrever esta equação como uma função inversa, da forma

$$L = \frac{B}{H}$$

4.2.2.6

onde B é uma constante igual a  $8\pi^2\eta a^3v_0/m$ , a ser determinada pelo método dos mínimos quadrados.

A partir do valor da constante B é possível estimar o momento magnético dos micro-organismos magnetotáticos (coluna 13 da tabela 4.1.1). Os valores de momento magnético assim obtidos, comparados aos estimados através da velocidade média de migração ajustados à curva de Langevin, estão em boa concordância (colunas 11 e 13). As relações entre os momentos magnéticos das amostras de Itaipú e Itaipuaçu continuam sendo mantidas.

Assim, concluímos que os métodos de determinação de momento magnético tanto por meio da volta em U quanto por meio da velocidade de migração de micro-organismos magnetotáticos são adequados à obtenção de informações sobre as características magnéticas destes micro-organismos.

Nas figuras 4.2.2.8, apresentamos os gráficos entre o diâmetro (L) da volta em U, em função do campo magnético aplicado (H), referente a cada uma das amostras. Apresentamos também, a equação de ajuste correspondente à equação 4.2.2.6, o coeficiente de correlação, bem como o desvio padrão.

#### 4.2.3 Cálculo do Momento Magnético por Microscopia Eletrônica de Transmissão

A principal dificuldade para a utilização da técnica

em microscopia eletrônica refere-se ao preparo das amostras, uma vez que esta técnica exige amostras limpas de impurezas do meio e com um grande número de micro-organismos magnetotáticos. O processo de preparação das amostras para a microscopia eletrônica foi sendo gradativamente aprimorado, na medida em que as tentativas de cultura não surtiram efeito e as técnicas de enriquecimento de amostras naturais não foram dominadas completamente.

A microscopia eletrônica de transmissão, quando possível, fornece imagens nítidas de uma cadeia de regiões de alta densidade identificadas através de espectroscopia, como cristais de magnetita<sup>[4]</sup>. Portanto, o momento magnético do micro-organismo pode ser calculado através do número e volume dessas regiões, desde que a cadeia seja bastante linear. Assim, o momento magnético é o volume de todos os cristais da bactéria magnetotática multiplicado pela magnetização de saturação por unidade de volume, 480 erg/G.cm<sup>3</sup> para a magnetita. Nós assumimos que estas partículas são cristais de paralelepípedos retos contendo 80% de magnetita<sup>[50,51]</sup>.

Vale ressaltar que, só foi possível aplicar a técnica de microscopia eletrônica de transmissão às bactérias de Itaipuaçu, sendo que, de todas as microscopias que foram realizadas, somente uma bactéria apresenta uma única cadeia linear. Nas demais bactérias, as cadeias apresentam-se lineares mas arrumadas em X, L, =, etc. O cálculo do momento magnético apresentado na tabela 4.1.1 (coluna 14), diz respeito à única bactéria observada com cadeia linear.

Na tabela 4.2.3.3, apresentamos os resultados da análise por microscopia eletrônica de transmissão com 22.000 vezes

de aumento, das bactérias magnetotáticas de Itaipuaçu. Na coluna 1, apresentamos o tipo de cadeia observado. O diâmetro calculado encontra-se na coluna 2. Na coluna 3, o número de cristais existentes em cada cadeia observada e, finalmente na coluna 4, o momento magnético estimado para cada cadeia observada.

As estimativas de momento magnético médio realizadas através dos três métodos de medidas, mostram que para as amostras de Itaipú, a razão entre as energias magnética e térmica é menor que 1, enquanto que para as amostras de Itaipuaçu, a razão é maior que 1. Estes dados indicam haver uma competição entre a quimiotaxia e magnetotaxia nas amostras de Itaipú enquanto nas amostras de Itaipuaçu, a magnetotaxia pode ser um mecanismo mais eficiente que a quimiotaxia e assim produzir um deslocamento mais eficiente na direção do sedimento.

Amostra	Tipo de Águas	Caracterização Micro-organismos	Data coleta	H (Gauss)	v (µm/s)	l (µm)	τ <sub>exp</sub> (s)	τ <sub>ti</sub> (s)	v <sub>0</sub> (µm/s)	m <sub>L</sub> · 10 <sup>-14</sup> (emu)	d (µm)	m <sub>H</sub> · 10 <sup>-14</sup> (emu)		E. O. 25/kT					
												M.E.	FESE						
Itaipu-1	salobra	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	19/03/86	20/05/86	7,9	120,8	16,0	0,10	0,10										
					5,4	111,4	21,2	0,13											
					3,9	115,1	30,6	0,16											
					3,2	110,1	38,7	0,18											
					2,1	94,6	55,5	0,21											
					1,6	72,2	-	-											
Itaipu-2	salobra	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	19/01/87	02/02/87	1,4	44,1	-	-	-										
					13,7	113,7	12,8	0,12	0,13										
					11,3	112,8	15,5	0,15	0,14										
					9,2	99,5	19,1	0,20	0,16										
					6,8	107,5	-	-	0,20										
					5,8	77,2	30,2	0,23	0,22										
Itaipu-3	salobra	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	15/01/87	15/02/87	3,4	87,9	51,6	0,29	0,30										
					1,6	47,7	-	-	-										
					7,9	176,2	16,5	0,15	0,15										
					5,8	150,0	22,4	0,18	0,19										
					4,5	118,4	28,3	0,20	0,23										
					3,4	84,2	38,2	0,30	0,28										
Itaipu-4	salobra	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	15/12/86	03/03/87	2,4	102,6	54,2	0,41	0,35										
					1,1	70,6	-	-	-										
					0,5	65,9	-	-	-										
					7,9	160,3	9,0	0,12	0,12										
					6,8	149,3	10,0	0,14	0,14										
					5,4	151,0	11,7	0,19	0,16										
Itaipu-5	salgada	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	15/12/86	03/03/87	3,9	138,4	16,0	0,23	0,21										
					2,6	139,5	-	-	-										
					1,3	134,8	-	-	-										
					1,1	91,7	-	-	-										
					0,8	66,9	-	-	-										
					0,5	76,2	-	-	-										
Itaipu-6	salgada	Bactérias tipo coccus identificadas por M.E.	15/12/86	03/03/87	0,4	55,7	-	-	-										
					0,3	70,2	-	-	-										
					0,2	66,9	-	-	-										
					0,1	39,5	-	-	-										
					0,08	31,8	-	-	-										

H - campo magnético aplicado  
 V - velocidade de migração  
 L - diâmetro da volta em U  
 τ<sub>exp</sub> - tempo de reversão medido  
 τ<sub>ti</sub> - tempo de reversão calculado  
 v<sub>0</sub> - velocidade média de migração  
 d - diâmetro do organismo  
 a - raio do micro-organismo  
 m - momento magnético (L - Langevin;  
 u - volta em U e ME - Microscopia eletrônica)

Itaipu-1, 2, 3, 4, 5, 6: Caracterização da dinâmica de Micro-organismos Magnetotáticos da região de Itaipu e Itaipuaçu.

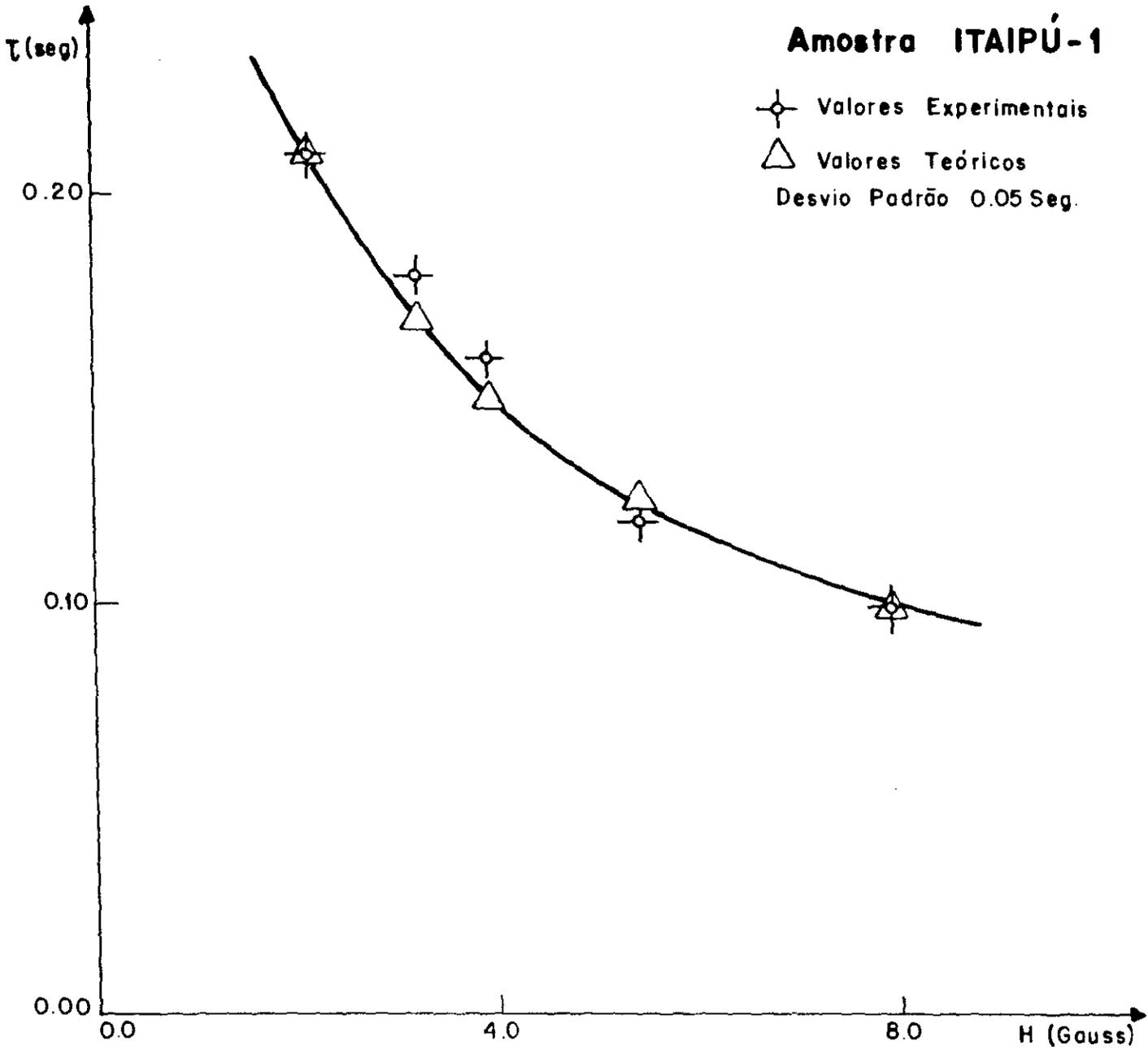


Fig. 4.1.4.6(a,b,c,d): Gráfico do tempo de reversão em função do campo magnético aplicado de micro-organismo de Itaipú e Itapuaçu.

- △ - valores obtidos pela equação 2.2.2.37
- ◆ - valores experimentais

### Amostra ITAIPÚ-2

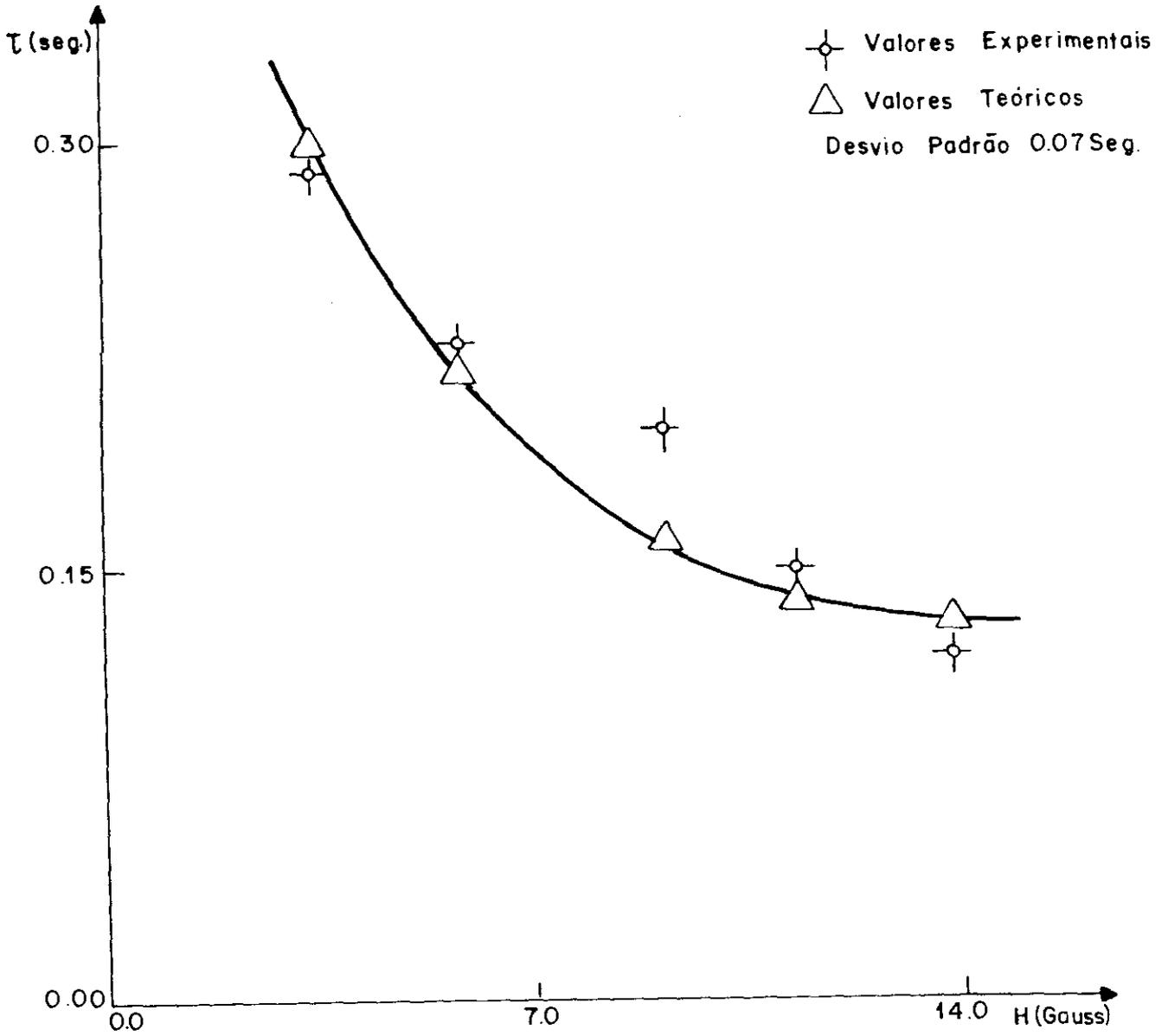


Fig. 4.1.4.6(b)

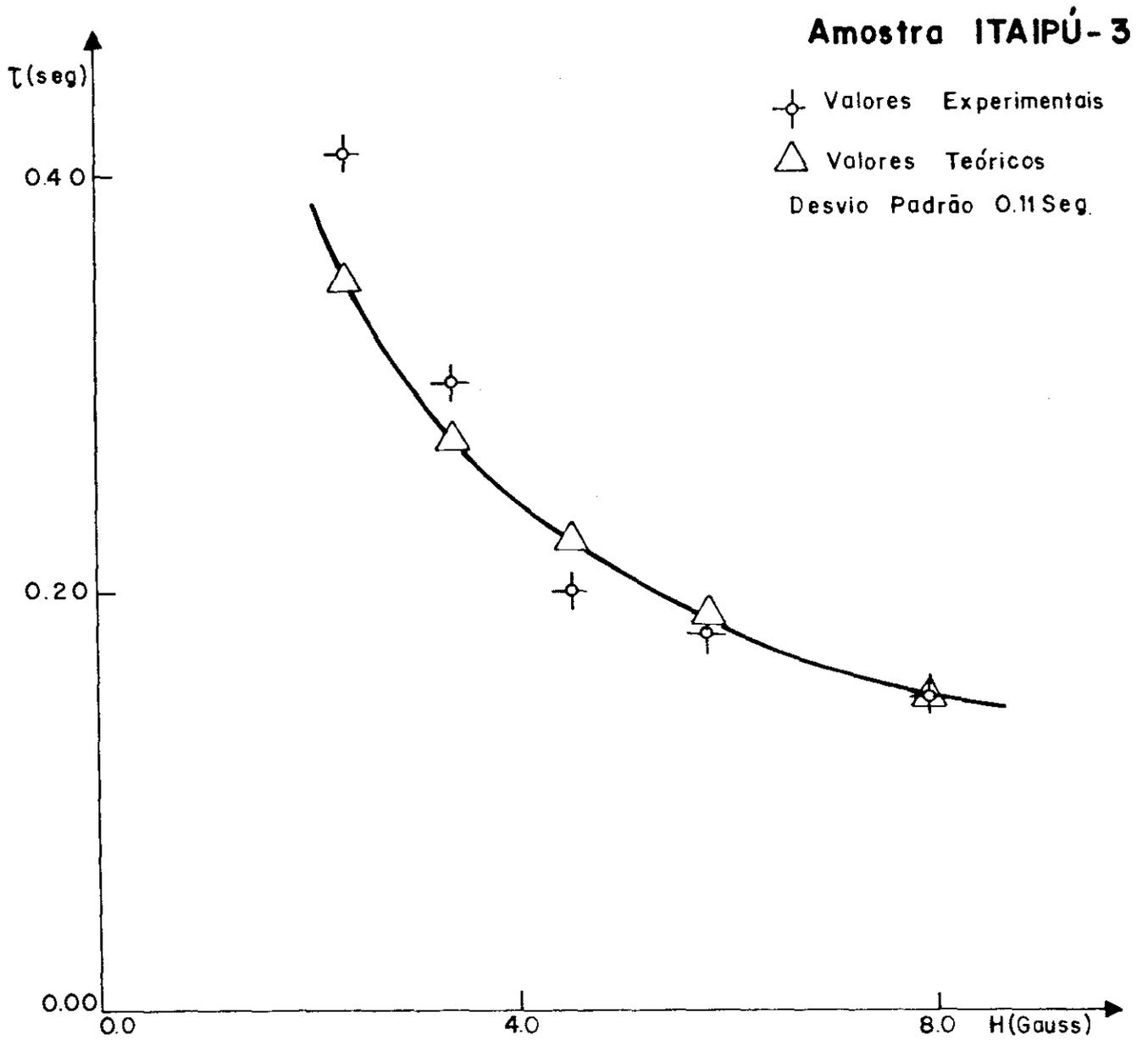


Fig. 4.1.4.6(c)

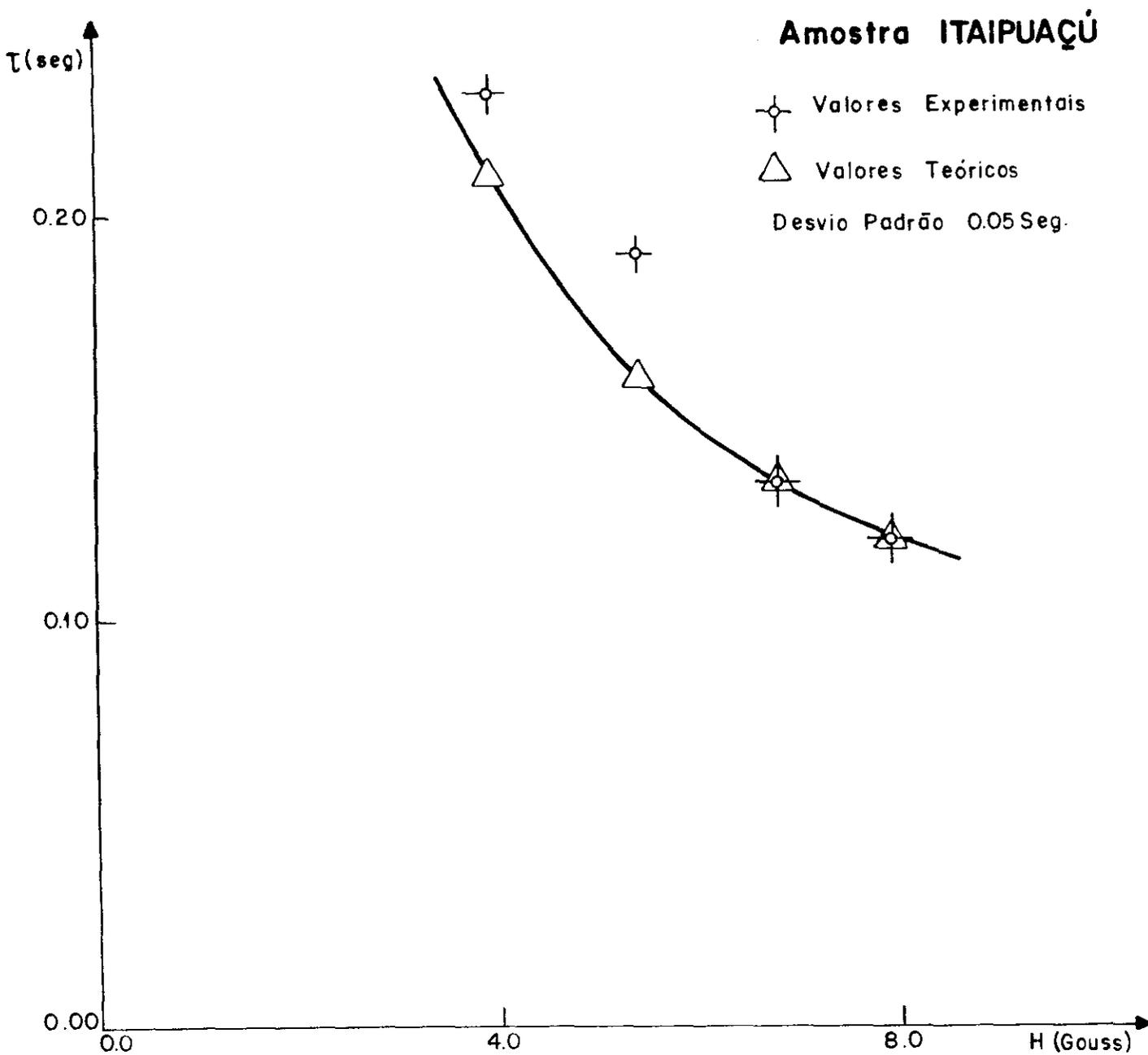


Fig. 4.1.4.6(d)

### ITAIPÚ I

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 141.916 + (-119.842 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .917018$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .957611$

DESVIO PADRÃO = 8.87224

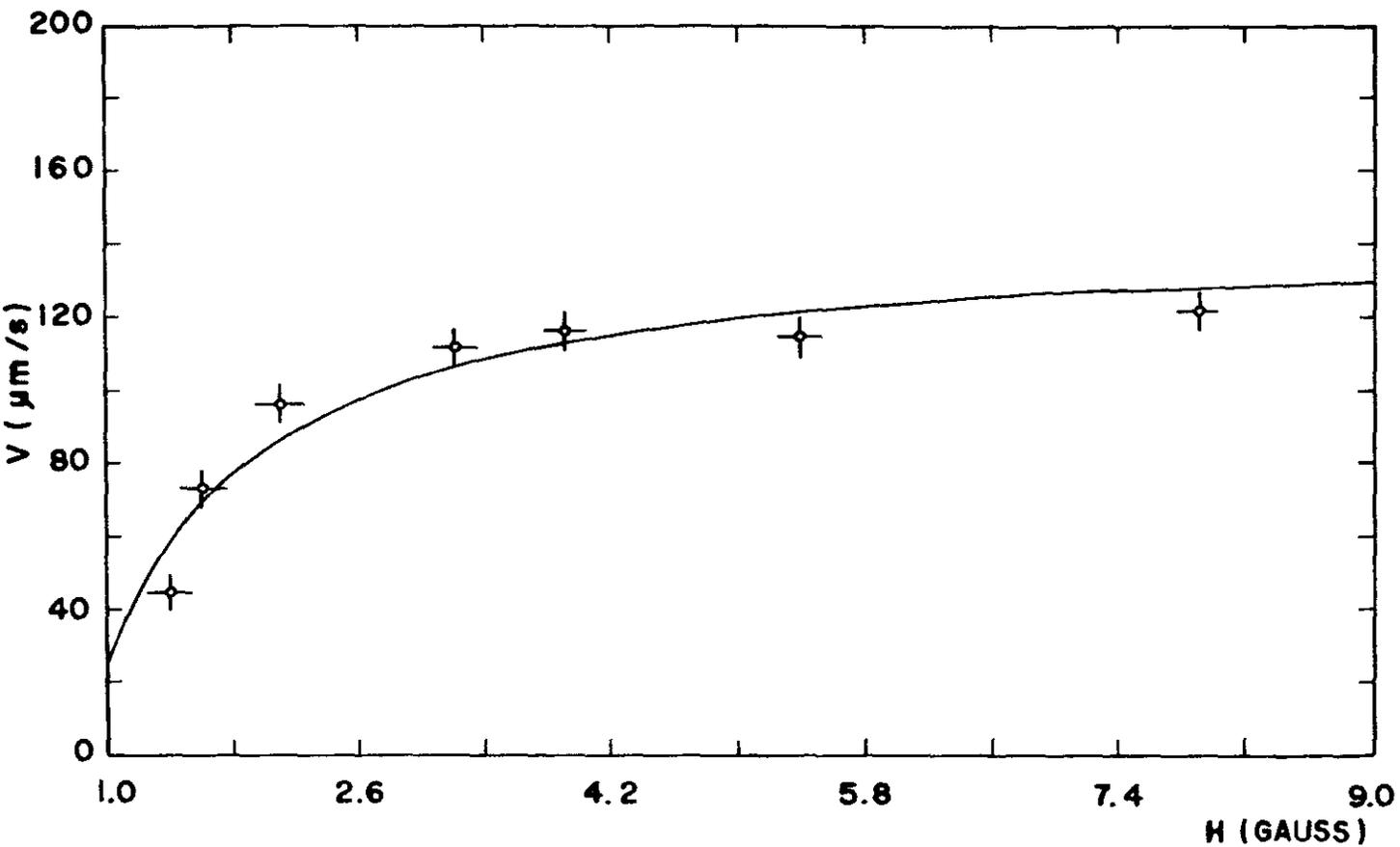


Fig. 4.2.1.7(a,b,c,...,g): Gráfico da velocidade de migração ( $v$ ) em função do campo magnético ( $H$ ), ajustado à curva de Langevin.

Amostra coletada em Itaipú e Itaipúçu.

◆ - dados experimentais

- - ajuste teórico

### ITAIPÚ 1A

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 153.653 + (-155.454 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .860302$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .927525$

DESVIO PADRÃO = 15.3814

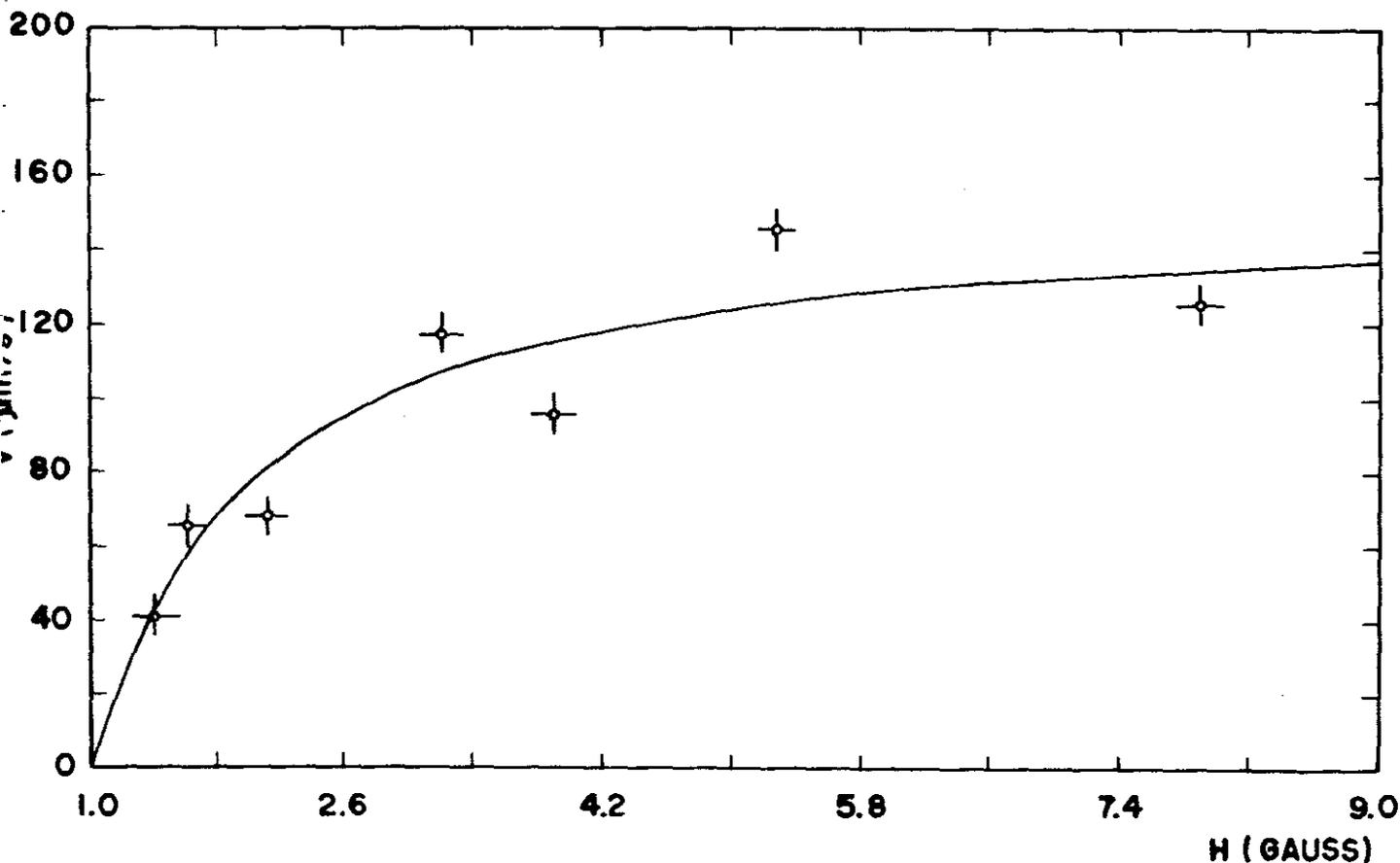


Fig. 4.2.1.7(b)

### ITAIPÚ 1B

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 285.018 + (-343.055 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .87949$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .937811$

DESVIO PADRÃO = 31.1808

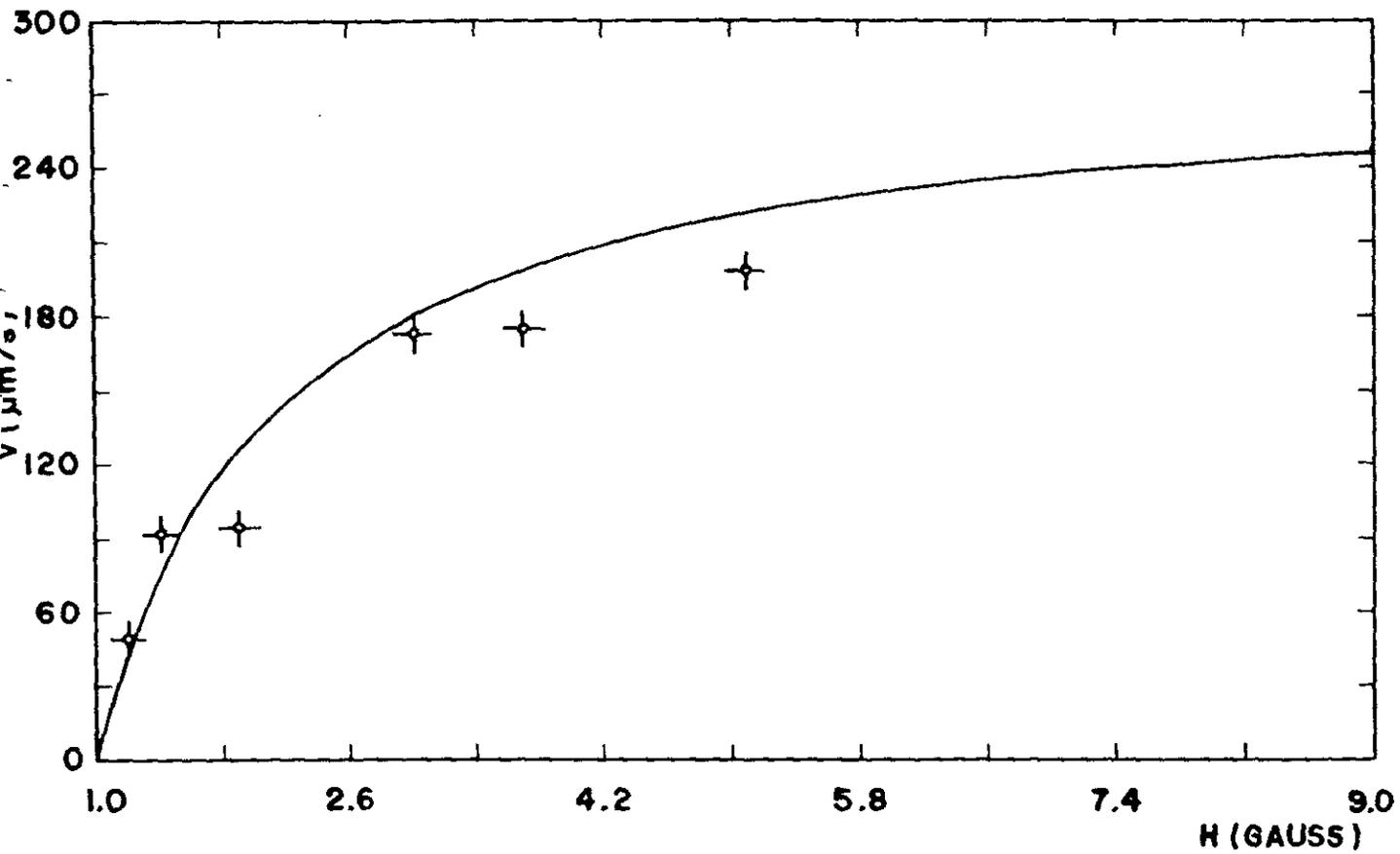


Fig. 4.2.1.7(c)

### ITAIPÚ 1C

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 347.282 + (-334.108 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .791351$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .889579$

DESVIO PADRÃO = 42.1247

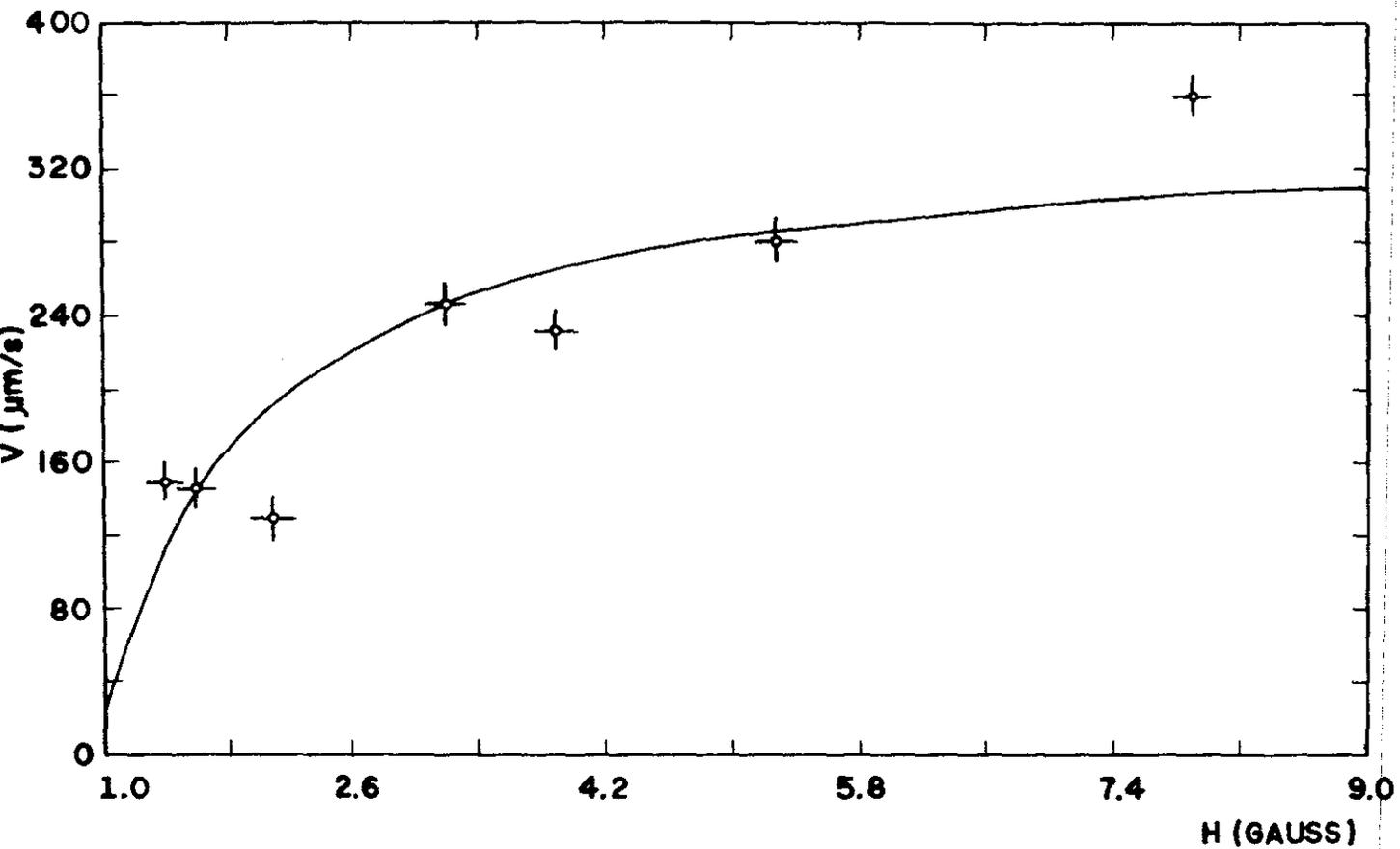


Fig. 4.2.1.7(d)

### ITAIPÚ 2

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 116.243 + (-111.168 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .842952$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .918124$

DESVIO PADRÃO = 9.71669

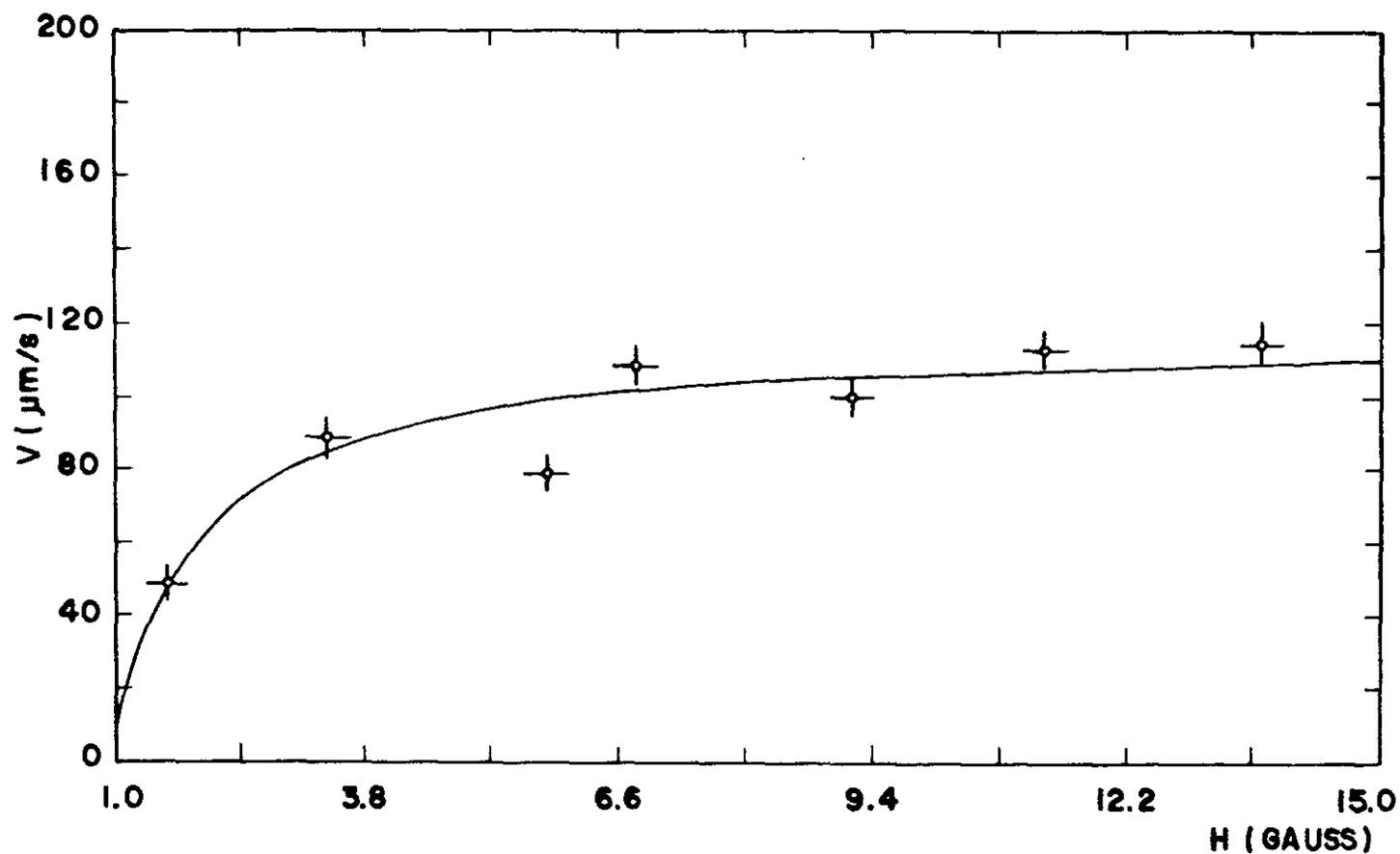


Fig. 4.2.1.7(e)

### ITAIPÚ 3

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 134.885 + (-42.5729 / X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .482129$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .694355$

DESVIO PADRÃO = 32.6144

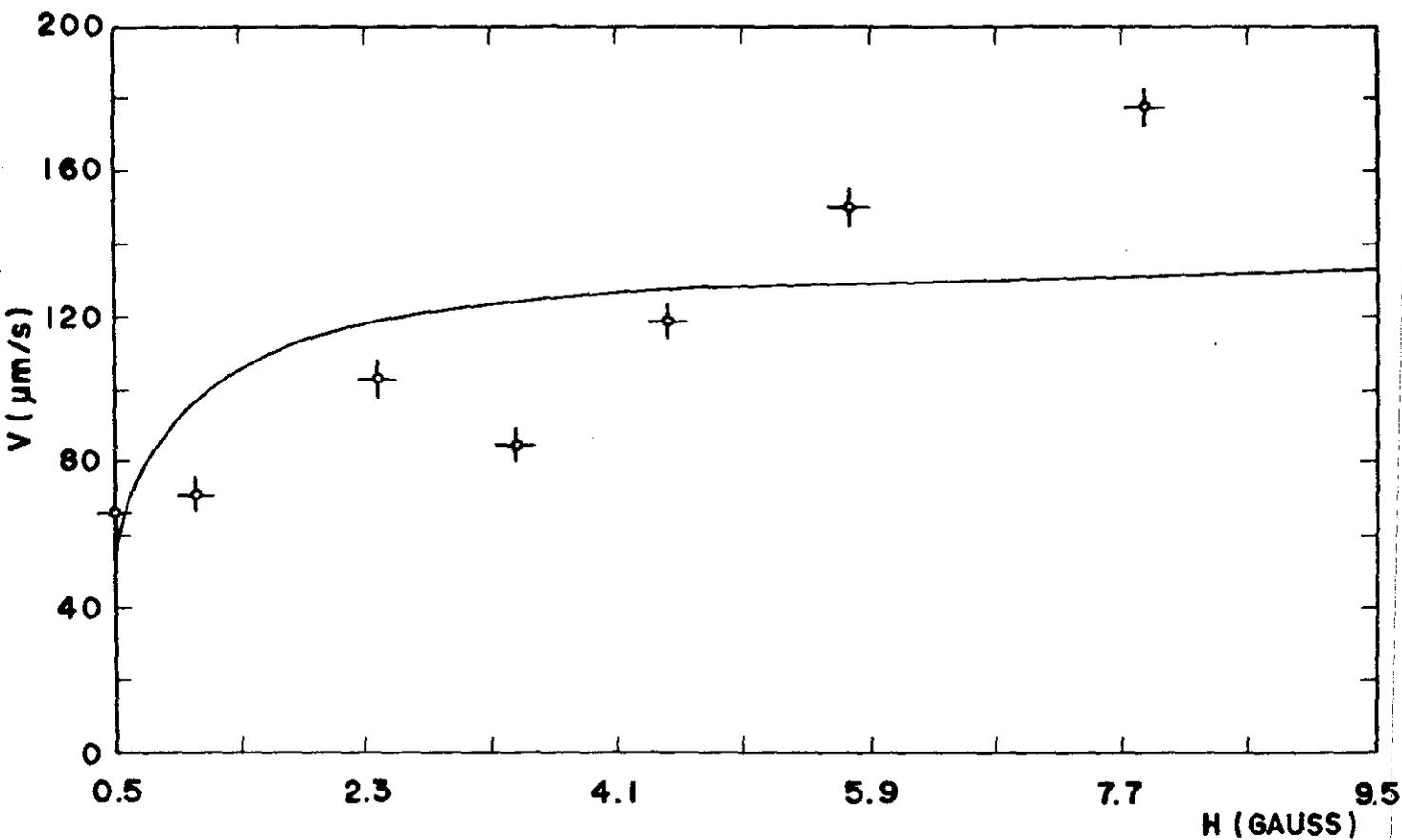


Fig. 4.2.1.7(f)

### ITAIPUAÇÚ

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA

$$Y = 123.585 + (-9.0942/X)$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .601316$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .775446$

DESVIO PADRÃO = 29.8654

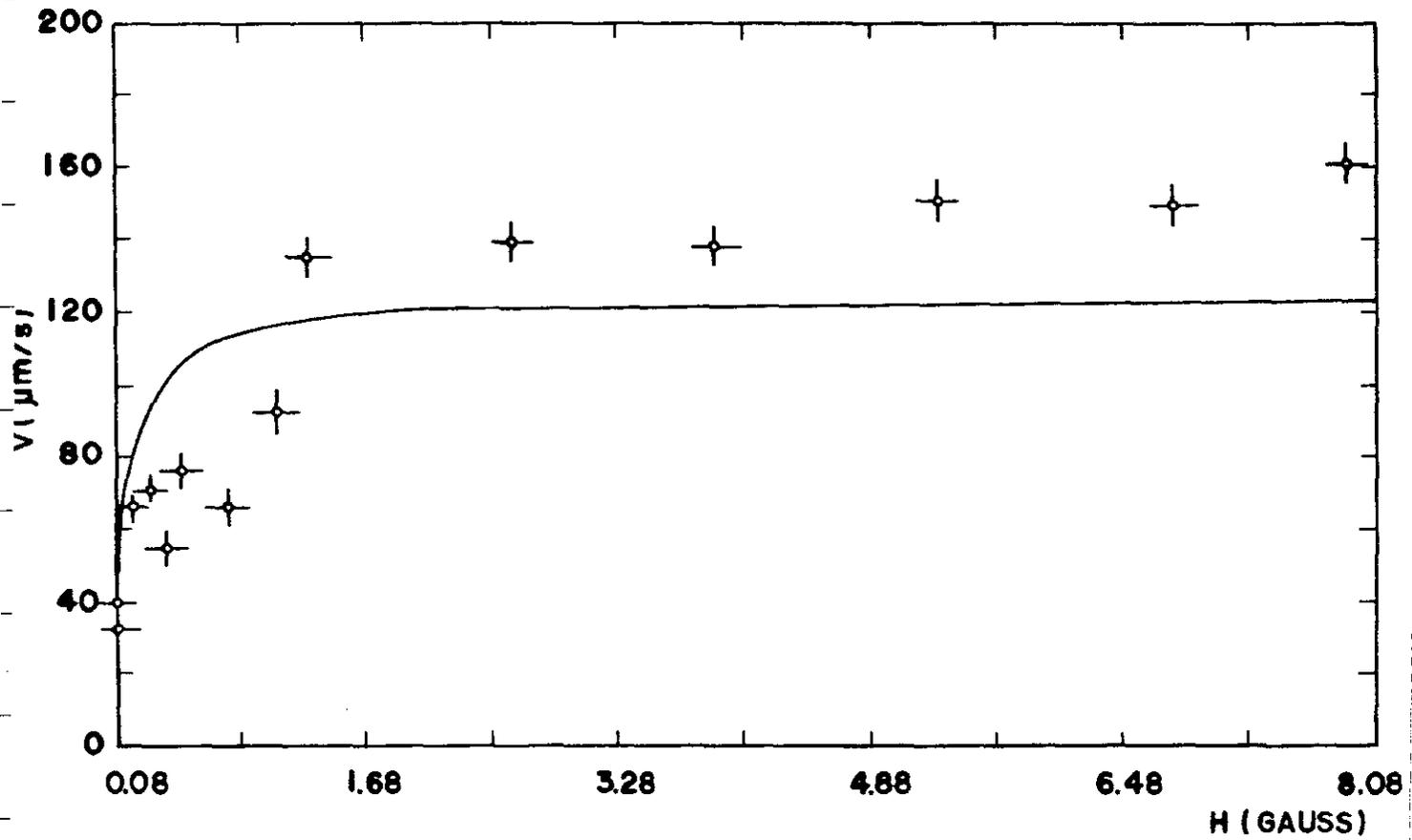


Fig. 4.2.1.7(g)

### ITAIPÚ 1

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA PURA

$$Y = 118.81 / X$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .999185$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .999593$

DESvio PADRÃO = 1.30235

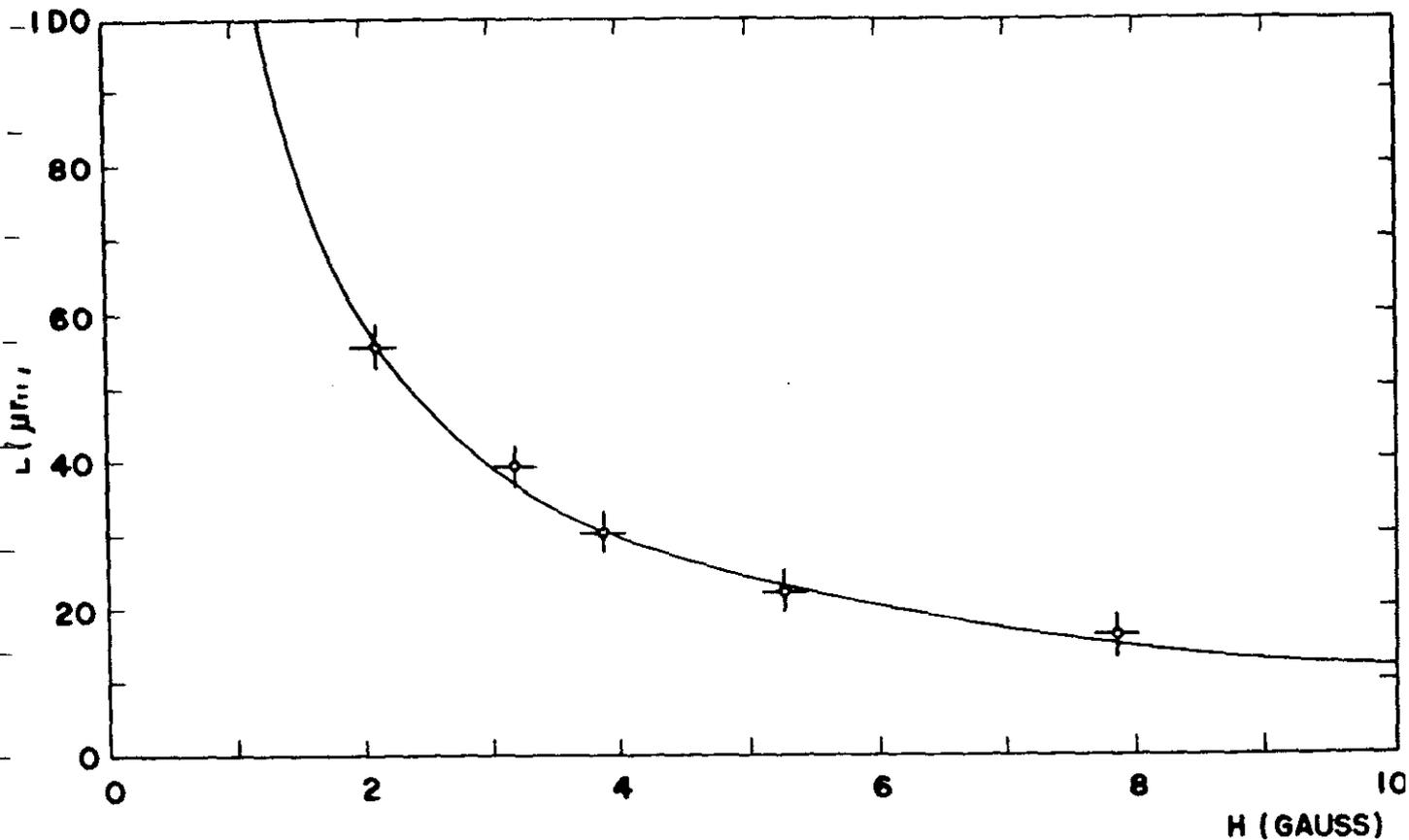


Fig.4.2.2.8(a,b,c,d) : Diâmetro (L) da volta em U em função do campo magnético aplicado (H), para cada amostra estudada. Apresentamos a equação correspondente ao ajuste da eq. 4.2.2.6, com o coeficiente de correlação e o desvio padrão correspondente.

◆ : dados experimentais

- : ajuste teórico

## ITAIPÚ 2

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA PURA

$$Y = 175.385 / X$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .999998$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .999999$

DESVIO PADRÃO = .0477352

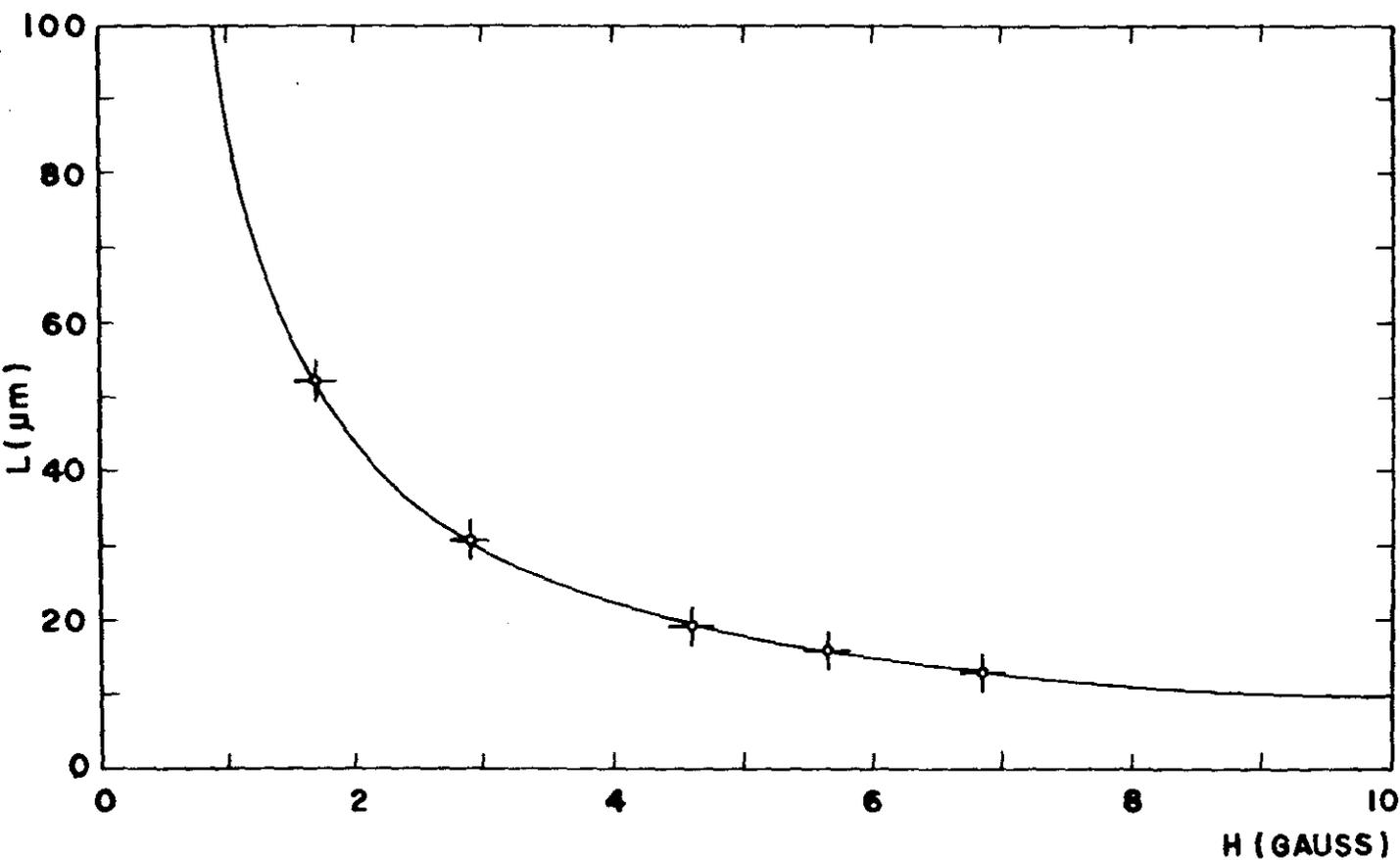


Fig. 4.2.2.8(b)

### ITAIPÚ 3

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA PURA

$$Y = 130.043 / X$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .999999$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = 1$

DESVIO PADRÃO = .0459988

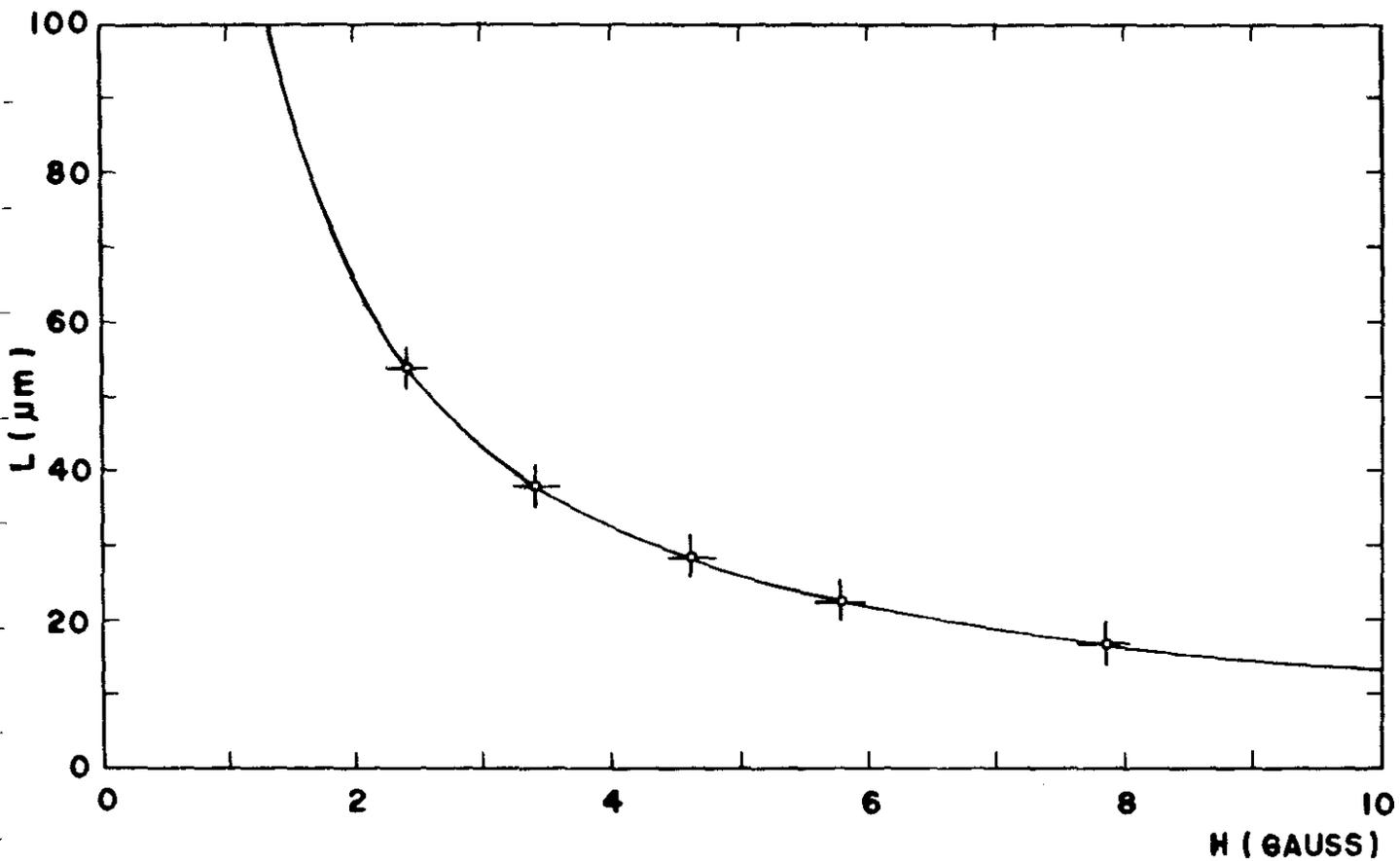


Fig. 4.2.2.8(c)

### ITAIPUAÇU

AJUSTE ESCOLHIDO : REGRESSÃO INVERSA PURA

$$Y = 65.5762 / X$$

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO  $R^2 = .997501$

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO  $R = .99875$

DESVIO PADRÃO = .846819

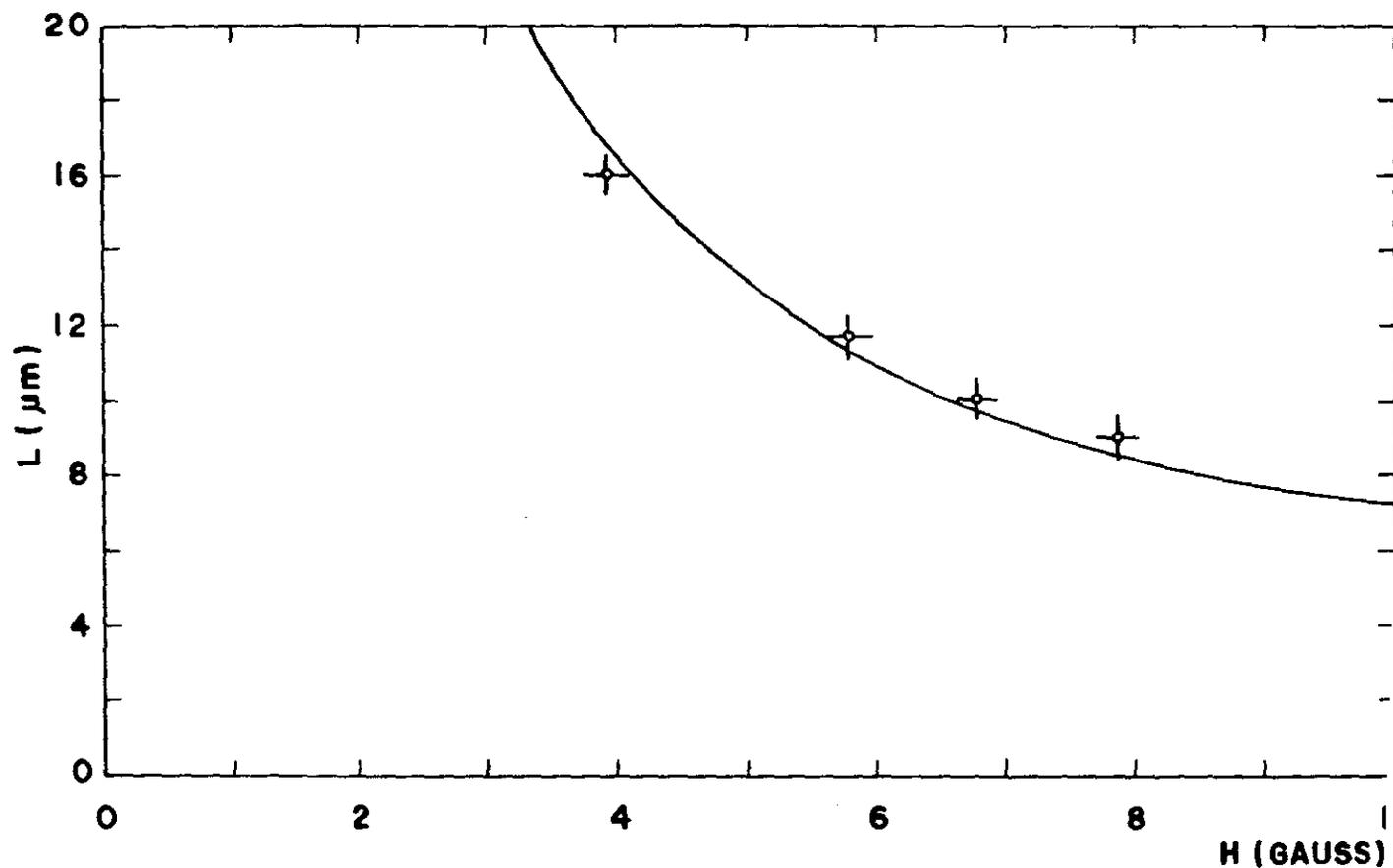


Fig. 4.2.2.8(d)

Tipo de Cadeia	Diâmetro( m)	Número de Cristais		m.10 <sup>-14</sup> (emu)	
		Cadeia-1	Cadeia-2	Cadeia-1	Cadeia-2
	1,56	6	7	71,31	65,20
	1,87	6	6	61,54	55,14
	1,56	8	6	67,90	54,90
	1,40	5	5	65,48	63,85
	1,82	7	-	39,51	-
	1,56	3	5	35,64	26,50
	1,30	4	5	40,09	49,01
	1,63	6	6	39,74	41,51
	1,50	4	4	39,54	48,70

Coluna 1: Representação esquemática da cadeia

Coluna 2: Raio medido pelo microscópio eletrônico de transmissão

Coluna 3: Número de cristais por cadeia

Coluna 4: Momento magnético de cada uma das cadeias

Tabela 4.2.3.3: Caracterização esquemática e parâmetros de Bactérias Magnetotáticas de Itaipuaçu, obtidos através da Microscopia Eletrônica de Transmissão com 22000 vezes de aumento.

## CONCLUSÕES

O estudo dos micro-organismos magnetotáticos da região de Itaipú e Itaipuaçu foi feito basicamente estudando as características de movimento destes micro-organismos.

Podemos dividir as conclusões deste trabalho em três categorias distintas: aquelas que dizem respeito às técnicas utilizadas, aquelas que mostram a adequação ou propriedades de teorias empregadas e, finalmente, aquelas que indicam aplicações mais amplas.

No primeiro grupo a mais importante está relacionada com o uso do vídeo como técnica de gravação de imagens em tempo real. Graças ao acoplamento câmara de vídeo-microscópio, foi possível uma documentação muito extensa do trabalho (caso estivéssemos utilizando processos de filmagem em 16mm ou super-8 o custo financeiro teria sido proibitivo).

A riqueza de documentação permitiu uma grande variedade de situações analisadas, com detalhes que, em geral, não são observadas, ou compreendidas, quando vistas somente algumas vezes. Cada segundo gravado foi analisado durante mais de cinco minutos. Além disso, os trechos mais representativos e nítidos foram reproduzidos em sistema de gravação quadro a quadro em que o movimento se apresenta muito lento e ainda definido. Assim sendo, cada tomada foi exaustivamente examinada e confrontada com resultados obtidos através de fotografias tiradas diretamente no microscópio e com iluminação de campo escuro. Para

terminar, cada tomada foi vista por pelo menos três pessoas diretamente envolvidas no trabalho.

O acoplamento vídeo-microscópio foi conseguido usando-se um elemento de lente de fotocopiadora obtida em sucata. A lente usada é uma lente biconvexa de raio de curvatura forte.

Quanto às conclusões relacionadas ao aspecto teórico, alguns pontos devem ser enfatizados. Em primeiro lugar, optamos por fazer uma estatística de população. Como foi explicado anteriormente, procuramos obter o maior número de medidas de organismos diferentes. Os resultados assim obtidos dizem respeito a médias de população. Como estivemos trabalhando com amostras naturais, sem qualquer enriquecimento químico, os resultados obtidos refletem, de forma bastante razoável, características das populações naturais. Isto, por si só, constitui um dado importante.

Podemos concluir sobre o aspecto de adaptabilidade de micro-organismos no meio natural; este ponto será aprofundado mais tarde. A escolha da estatística é crucial para o trabalho de comportamento, pois afeta diretamente o procedimento experimental e suas conclusões posteriores. Trabalhando com população de micro-organismos podemos obter informações sobre esta população. Os indivíduos que compõem esta população ficam despersonalizados e descaracterizados. Por outro lado, trabalhando com um único micro-organismo podemos cair numa situação incomoda: teremos resultados precisos de um organismo que não estará vivendo após o procedimento experimental.

Durante todo o trabalho nos apoiamos em dois modeu

los teóricos simples. O primeiro que foi tomado de empréstimo da teoria do paramagnetismo de Langevin, nos diz a orientação média dos dipolos em um meio à temperatura  $T$ . Neste modelo não introduzimos termos de energia (por exemplo, energia de flagelo) na função de partição. Isto pode parecer totalmente sem propósito, uma vez que a energia do flagelo é várias vezes superior ao termo de energia térmica. Por outro lado a força flagelar é periódica e, desta forma, não contribui para a desordem, uma vez que a média temporal é nula. Ao usarmos a orientação média dada pela teoria do paramagnetismo de Langevin, estamos dizendo que bactérias se comportam como dipolos isolados que não interagem entre si. Trata-se sem dúvida, de uma afirmação forte. O presente trabalho mostra que esta afirmação tem seu fundamento. Bactérias magnetotáticas apresentam um comportamento extremamente peculiar; elas são quase que sistemas físicos animados por seu metabolismo.

A outra teoria, se assim podemos falar, é a da volta em  $U$ , ou seja, o estudo da trajetória de um dipolo magnético que se desloca com a velocidade constante num meio viscoso quando o campo magnético é subitamente invertido. Neste caso as aproximações são excessivas. Abandonamos, logo de início, qualquer contribuição, devido ao flagelo. Consideramos células esféricas e momento de dipolo perfeitamente alinhado à direção de movimento. Obrigamos, no modelo, a uma situação de velocidade constante e nos limitamos ao caso de campos magnéticos relativamente elevados se comparados ao campo geomagnético (na realidade, a uma situação de  $mH/kT \gg 1$ ).

Sabemos, por microscopia eletrônica, que as célu-

las não são esféricas. A contribuição do flagelo é, sem dúvida, muito superior a termos de desordem térmica. As células não são obrigadas a ter velocidade constante. E, por último, nós nos restringimos a situação de campos altos ( $mH/kT \gg 1$ ). Ainda assim, obtivemos resultados bastante coerentes. Trabalho recente em simulação numérica do movimento flagelar em células magnetotáticas mostra que, de fato, o torque devido à rotação do flagelo, é cerca de 10 a 100 vezes superior ao torque magnético. Observamos que o torque magnético, no campo terrestre, é competitivo com o termo de agitação térmica. Assim sendo, o que domina no movimento é o torque do flagelo. Este resultado mostra, também, que o flagelo impede um completo alinhamento do momento magnético com o campo magnético.

A análise apresentada neste trabalho mostra que o estudo de velocidade em função do campo magnético aplicado, fornece informações bastante boas com relação ao momento magnético. Trata-se de uma técnica a mais, para calcular o momento magnético. Uma grande desvantagem desta técnica, entretanto, é o fato dela ser muito trabalhosa.

Outra conclusão é que as medidas de tempo de reversão e de diâmetro da volta em U podem fornecer bons resultados para o momento magnético.

Neste trabalho utilizamos um procedimento auto-consistente. Medimos a dependência da velocidade de migração em função do campo magnético e obtivemos o momento magnético ( $m_L$ ). O valor obtido para o momento magnético foi utilizado na expressão para o diâmetro (L) da volta em U e tempo de reversão ( $\tau_{exp}$ ), de forma que obtivemos o raio estimado da célula. Este valor foi

comparado com o obtido pela microscopia eletrônica. O valor do momento magnético ( $m_L$ ), foi também usado para obter o tempo de reversão ( $\zeta_u$ ). Finalmente comparamos  $\zeta_u$  com o tempo experimental  $\zeta_{exp}$ . Dessa forma podemos garantir que os valores obtidos para o momento estão bem estimados.

Estas conclusões mostram que a teoria desenvolvida para o estudo de bactérias magnetotáticas descrevem bastante bem o fenômeno de magnetotaxia. Aprimoramentos podem ser propostos. O primeiro, o mais óbvio, é introduzir dentro do formalismo, a ação do flagelo, através da introdução na equação de movimento, de um torque periódico. Darci e Henrique realizaram diversos cálculos onde o flagelo é considerado de forma explícita e obtiveram uma boa descrição de trajetória.

Finalmente temos as conclusões mais gerais do fenômeno da magnetotaxia. Os resultados obtidos para o momento magnético mostram que o momento de dipolo total das células é o responsável pela orientação magnética. Observamos um acordo surpreendente entre os momentos magnéticos de células obtidas de várias amostras coletadas na mesma região. Observamos, também, que células coletadas em região próxima apresentam um momento magnético diferente. Estes dois fatores podem indicar uma enorme adaptabilidade das células ao meio. Seria interessante desenvolver trabalho análogo com amostras coletadas em diversos locais que possuam características de água semelhantes, população de micro-organismos idênticos, mas cujo campo geomagnético seja diferente. Um trabalho desta natureza pode mostrar como que organismos da mesma espécie adaptam-se ao campo magnético local e como este campo é um fator importante para a presença de certas espé-

cies.

O campo geomagnético, por suas características e pela história particular que a biologia tem, nunca foi levado em consideração de forma sistemática no estudo dos seres vivos. O presente trabalho mostra que para as bactérias estudadas, este campo desempenha um fator fundamental para a sobrevivência da espécie. A inclusão, na rotina de laboratório, de medidas de campo poderá abrir um novo, e importante, ramo de biologia do comportamento, além de dar um maior conhecimento dos efeitos externos sobre os organismos.

## APÊNDICE A

### ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

Espectroscopia Mössbauer é o nome que se dá à técnica de absorção de raios  $\gamma$  pelo núcleo do átomo. A idéia básica está representada na fig. A.1, onde um núcleo excitado de massa  $M$ , com uma energia  $E_0$  acima de seu estado fundamental, decai para o nível fundamental emitindo um raio  $\gamma$ ,

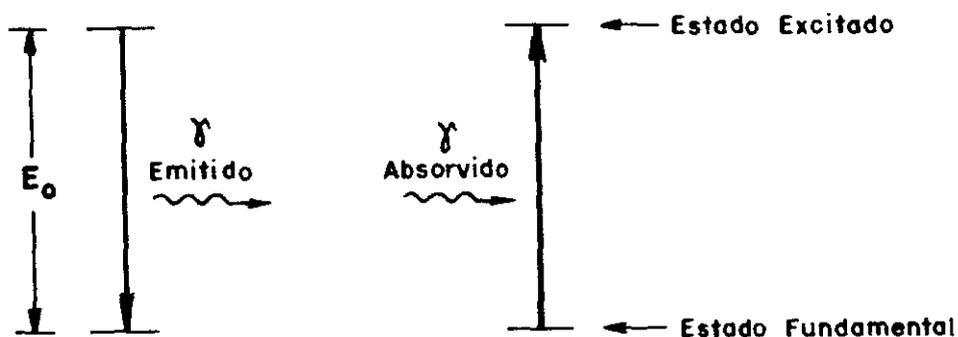


Fig. A.1: Esquemática do efeito Mössbauer.

Esse raio  $\gamma$  é, em seguida, absorvido por um núcleo não excitado, do mesmo tipo que o primeiro, efetuando uma transição para um estado excitado idêntico àquele em que se encontrava o núcleo emissor.

Pelo princípio de conservação de energia, era de se esperar que o raio  $\gamma$  emitido, tivesse a mesma energia  $E_0$ , perdida durante o processo de transição. Esta energia seria a necessária para iniciar o processo inverso. Entretanto isto ocorre porque, durante a emissão do raio  $\gamma$ , o núcleo emissor recua com uma certa energia  $R$ . Esta energia é devida ao momento linear que o núcleo emissor adquire quando emite o raio  $\gamma$ .

Pelo princípio de conservação da energia, temos:

$$E_0 = E_\gamma + R \quad \text{A.1}$$

como  $R$  é uma quantidade pequena comparada a  $E_0$  e  $E_\gamma$ , podemos dizer que

$$R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \cong \frac{E_0^2}{2Mc^2} \quad \text{A.2}$$

No caso da transição Mössbauer do Fe-57,  $E_0 = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$  e a energia de repouso do núcleo é da ordem de  $5,7 \cdot 10^{10} \text{ eV}$ . Assim, a eq. A.2 nos fornece uma quantidade para a energia de recuo da ordem de  $2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ , que não deve ser desprezada. Nas amostras de Aquaspirillum Magnetotactium foi medido o espectro Mössbauer do isótopo do Fe-57, conforme fig. 1.3.3.20.

## APÊNDICE B

### AJUSTE DAS CURVAS EXPERIMENTAIS

Um problema frequentemente encontrado no tratamento de resultados experimentais é o de ajuste de dados.

O método dos mínimos quadrados é o método mais empregado para se ajustar uma curva experimental e assim, evitar o critério individual no traçado da curva.

Vamos supor que as grandezas  $x$  e  $y$  estejam relacionadas através da função

$$Y = f(x, a, b, c \dots) \quad \text{B.1}$$

onde  $f$  é uma função postulada ou conhecida e  $a, b, c \dots$ , são parâmetros desconhecidos a serem determinados. Através do método dos mínimos quadrados é possível se determinar os valores desses parâmetros de tal forma que a soma dos desvios ao quadrado seja mínimo, isto é:

$$d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_N^2 = \text{mínimo} \quad \text{B.2}$$

onde

$$M = \sum_i d_i^2 = \sum_i [y_i - f(x_i, a, b, c, \dots)]^2 \quad \text{B.3}$$

A condição de mínimo impõe que  $M/a$ ,  $M/b$ , ..., sejam todos iguais a zero. Dessa maneira, teremos um sistema de equações com o mesmo número de parâmetros, ou seja:

$$\sum_i 2[y_i - f(x_i, a, b, c, \dots)] \cdot af(x_i, a, b, c, \dots) = 0 \quad \text{B.4}$$

$$\sum_i 2[y_i - f(x_i, a, b, c, \dots)] \cdot bf(x_i, a, b, c, \dots) = 0 \quad \text{B.5}$$

Neste trabalho foi desenvolvido um programa usando a linguagem BASIC para ajustar a função de Langevin (eq. 2.2.1.26) e o diâmetro da volta em U, quando da inversão do campo magnético (eq. 2.2.2.40).

Pelo modelo de regressão linear simples, as equações 2.2.1.26 e 2.2.2.40 foram escritas na forma

$$1/y = B + Ax$$

onde a constante B, na equação 2.2.1.26 é igual a um, porque nos campos magnéticos que trabalhamos, o termo  $\cothg(mH/kT) \approx 1$  enquanto, na equação 2.2.2.40, é nulo.

## REFERÊNCIAS

- [1] Walcott, C.; Gold, J.L.; Kirschvink, J.L.; "Pigeons have magnets". *Science*, 205 (1978).
- [2] Blakemore, R.P.; "Magnetotactic Bacteria". *Science*, 190 (1975).
- [3] Frankel, R.B.; Blakemore, R.P.; Torres de Araújo, F.F.; Esquivel, D.M.S. and Danon, J.; "Magnetotactic Bacteria at the Geomagnetic Equator". *Science*, 212 (1981).
- [4] Frankel, R.B.; Blakemore, R.P. and Wolfe, R.S.; "Magnetite in Freshwater Magnetotactic Bacteria". *Science*, 203 (1979).
- [5] Blakemore, R.P.; Maratea, D. and Wolf, R.S.; "Isolation and pure culture of a Freshwater Magnetic Spirillum in chemically defined medium". *Journ. Bacteriol*, 140 (1979).
- [6] Escalante Semenera, J.C.; Blakemore, R.P. e Wolfe, R.S.; "Nitrate dissimilation under microaerophilic conditions by a magnetic spirillum". *Appl. Environ. Microbiol.* 40 (1980).
- [7] Esquivel, D.M.S.; Lins de Barros, H.G.P.; Danon, J. and Oliveira, L.P.H.; "Algae Magnetotactic". *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 54 (1982).
- [8] Esquivel, D.M.S.; Lins de Barros, H.G.P.; Farina, M.; Aragão, P.H.A. e Danon, J.; "Microorganismes Magnetotactiques de la region de Rio de Janeiro". *Biol. Cell.* 47 (1983).
- [9] Farina, M.; Lins de Barros, H.G.P.; Esquivel, D.M.S.; Danon, J.; "Ultrastructure of a magnetotactic microorganism". *Biol. Cell.* 48 (1983).
- [10] Torres de Araújo, F.F.; Pires, M.A.; Frankel, R.B.; Bicudo, C.E.; "Magnetite and Magnetotaxis in Algae". *Biophy. Journ*, 50 (1986).

- [11] Lins de Barros, H.G.P.; Esquivel, D.M.S.; "Magnetismo em Ser Vivo. Por que não?"; Ciência e Sociedade - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 002 (1983).
- [12] Manson, L.F.; História de Ciências - "As primeiras Correntes do Pensamento Científico. E. Globo, 1ª Ed. (1962).
- [13] Curtis, H.; "Biologia"; Ed. Guanabara Koogan, 2ª ed. (1977).
- [14] Bozorth, R.M.; "Magnetism"; Reviews of Mod. Physics, 19 (1947).
- [15] Barbier, J.C.; "Magnétisme"; Monografias de Física XIII, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, (1963).
- [16] Reitz, J.R.; Milford, F.J. e Christy, R.W.; "Fundamentos da Teoria Eletromagnética"; Ed. Campus, 3ª ed. (1982).
- [17] Epifanov, G.I.; "Solid State Physics"; Mir Publisher, (1979).
- [18] Eisberg, R. e Resnick, R; "Física Cuântica, átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas". Editorial Limusa, 1ª ed. (1978).
- [19] Kolmijm, A.J.; "Biophysics of Geomagnetic field detection"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, MAG-17 (1981).
- [20] Kirchvink, J.L.; Gould, J.L.; "Biogenic Magnetite as a basis for magnetic field detection in animals"; Bio Systems, 13 (1981).
- [21] Mason, B.; "Meteorites"; John Wiley and Sons, Inc., New York, (1962).
- [22] Deer, W.A.; Howie, R.A. e Zussmon, J.; "An Introduction to the rock forming minerals"; Green and Co. Ltd., London (1966).
- [23] Dana, J.D.; "Manual de Mineralogia"; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 10ª ed. (1966).
- [24] Van Vlack, L.H.; "Princípios de Ciência dos Materiais" Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo (1970).
- [25] Wade, F.A. e Mattox, R.B.; "Elementos de Cristalografia e Mineralogia"; Ed. Omega, Barcelona (1963).

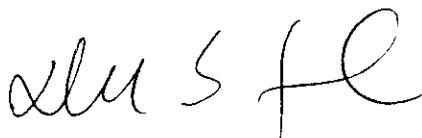
- [26] Takeuchi, H; Uyeda, S.; Konamori, H.; "A Terra, um planeta em debate"; Ed. Universidade de São Paulo, (1970).
- [27] Ernesto, M.; "Introdução à Geofísica"; Instituto Astronômico e Geofísico/USP, (1983).
- [28] Raven, P.H.; Evert, R.F.; Curtis, H.; "Biologia Vegetal"; Ed. Guanabara Dois, 2ª ed., (1976).
- [29] Eisner, T.; Wilson, E.O.; "O comportamento Animal"; H. Blume Ediciones, (1979).
- [30] Chauvin, R.; "A etologia"; Zahar Editores, (1977).
- [31] Kalmihn, Ad.J.; Blakemore, R.P.; "The magnetic behavior of mud bacteria. Animal Migration, Navegation and Homing"; (K. Schumidt-Koenig and W.T. Keeton, eds), Berlim, (1978).
- [32] Blakemore, R.P.; Frankel, R.B. and Kalmijn, Ad.J.; "South-seeking magnetotactic bacteria in the Southern Hemisphere"; Nature, 286 (1980).
- [33] Butler, R.F. and Banergee, S.K.; "Theoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite"; Journal Geophysics, 80 (1975).
- [34] Frankel, R.B.; Blakemore, R.P.; "Navegational compass in magnetic bacteria"; Journal of magnetism and magnetic materials, 15 (1980).
- [35] Bean, C.P.; Personal Communication.
- [36] Lins de Barros, H.G.P. and Esquivel, D.M.S.; "Magnetotactic Microorganisms Found in Muds from Rio de Janeiro. A General View. In Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in organisms"; J.L. Kirschvink; D.S. Jones and B.J. Mac Fodden, eds. Plenum Publishing corp. New York, (1985).
- [37] Esquivel, D.M.S.; Lins de Barros, H.G.P.; "Motion of Magnetotactic microorganisms". J. exp. Biol., 121, (1986).
- [38] Pires, M.A.; "Razão das polaridades de bactérias magnetotáticas próxima à região do Equador Geomagnético e Magnetotactismo em Algas"; Tese de Mestrado, Dep. Física da Universidade Federal do Ceará (1986).

- [39] Wajnberg, E.; Salvo de Souza, L.H.; Lins de Barros, H.G.P. e Esquivel, D.M.S.; "A study of magnetic properties of Magnetotactics bacteria"; Biophysics Journal, 50 (1986).
- [40] Lins de Barros, H.G.P. e Esquivel, D.M.S.; "An Upper size limit to magnetotactic microorganism"; Notas de Física - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 029/87, (1987).
- [41] Shanes, I.H.; "Mechanics of Fluids"; Mc Graw-Hill book Company, (1962).
- [42] Pathria, R.K.; "International Series in Natural Philosophy-Statistical Mechanics"; vol.45, Pergamon Press, (1977).
- [43] Kikoin, A.K. e Kikoin, I.K.; "Física Molecular"; Ed.Mir 1ª ed. (1979).
- [44] Berg, H.C.; "Random Walks in Biology"; Princenton University Press, (1983).
- [45] Purcell, E.M.; "Life at low Reynolds number"; American Journal of Physics, 45, (1977).
- [46] Moench, T.T. and Konetzka, W.A.; "A novel method for the isolation and study of magnetotactic bacterium"; Arch. Microbiol. 119, (1978).
- [47] Resenbloth, C.; Torres de Araújo. F.F.; Frankel, R.B.; "Birefringence Determination of Magnetic Moments of Magnetotactic Bacteria"; Biophys. Journal, 40, (1982).
- [48] Rosenblatt, C.; Torres de Araújo, F.F.; Frankel, R.B.; "Light Scattering determination of magnetic moment of magnetotactic bacteria"; J. Appl. Phys., 53, (1982).
- [49] Jackson, J.D.; "Classical Electrodynamics", John Wiley e Sons, Inc., (1962).
- [50] Towe, K.M. and Moench, T.T.; "Electron-optical characterization of bacterial magnetite"; Earthand Planetary Science Letters, 52, (1981).
- [51] Matsuda, T.; Endo, J.; Osakabe, N.; Tomomura, A. and Arai, T.; "Morphology and Structure of Biogenic Magnetite Particles". Nature 302, (1983).

"BACTÉRIAS MAGNETOTÁCTICAS:  
PROPRIEDADES MAGNÉTICAS ATRAVÉS DO ESTUDO DE MOVIMENTO  
EM FUNÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO"

PEDRO HENRIQUE ARRUDA ARAGÃO

Tese de Mestrado apresentada no Centro  
Brasileiro de Pesquisas Físicas do Con-  
selho Nacional de Desenvolvimento Cien-  
tífico e Tecnológico, fazendo parte da  
Banca Examinadora os seguintes profes-  
sores:



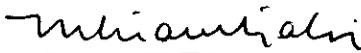
Darci Motta de Souza Esquivel - Presidente



Ronald Dennis Paul Kenneth Clive Ranvaud



Henrique Gomes de Paiva Lins de Barros



Mario Giambiagi